

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ESTUDIO Y COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
MECÁNICO DE PRISMAS DE ALBAÑILERÍA TUBULAR  
REFORZADA**

Tesis para optar por el título profesional de  
**INGENIERO CIVIL**

**AUTORES**

**Espinoza Valdivia, Carlos Andrés Ángel  
Bazalar Palacios, José Manuel**

Asesores

**Daniel Quiun Wong  
Nicola Tarque Ruiz**

Lima, Marzo, 2021

## RESUMEN

La albañilería confinada es un sistema constructivo muy aplicado en Perú, se aprecia en edificios construidos desde la década de 1940. A pesar de que existe una normativa consolidada (Norma técnica peruana E.070 Albañilería), muchas de las viviendas ya construidas no cumplen con estas disposiciones. La llamada autoconstrucción y el uso de materiales no idóneos en albañilería confinada solo conllevan a que la estructura se vuelva vulnerable ante un evento sísmico. Un ejemplo de este error en construcción, quizás el más evidente, es el uso de ladrillos pandereta en muros portantes de albañilería confinada. Esta problemática motiva a encontrar un método de reforzamiento enfocado a los muros inadecuadamente constituidos de una estructura ante sollicitaciones sísmicas de manera económica. Se propone investigar la propuesta de reforzamiento de los muros portantes de ladrillo pandereta haciendo uso de mallas electrosoldadas y mortero reforzado con fibra de acero galvanizado y fibra de basalto. Para esto, se construirán 9 pilas y 12 muretes reforzados y no reforzados con los refuerzos mencionados, para estudiar si se logra un aumento en la resistencia a compresión axial y a corte. Los resultados indican que, para los refuerzos con mortero de fibras de acero y basalto, las propiedades mecánicas se ven influenciadas en la etapa elástica; además, en todos los especímenes se logra cambiar la forma de falla de una falla frágil y explosiva a una dúctil, lenta y progresiva. Esto es de suma importancia en un evento sísmico lo que daría chance a los ocupantes de viviendas construidas con este sistema de resguardar sus vidas.

## AGRADECIMIENTOS

A cada persona que estuvo a nuestro lado apoyándonos desde el comienzo de la investigación, le extendemos nuestros más sinceros agradecimientos. A nuestras familias, que han sabido comprendernos e incentivarnos en el logro de nuestros objetivos; el apoyo incondicional desde que empezamos nuestras carreras ha sido de gran importancia en nuestra formación académica y personal. Le agradecemos también a nuestros asesores, el Mg. Daniel Quiun y el Dr. Nicola Tarque, que han sabido orientarnos y aconsejarnos a lo largo del periodo de investigación, sin ellos este proyecto no hubiera sido posible. A los trabajadores del laboratorio, por su carisma y buena disposición a apoyarnos cada vez que lo necesitamos. Y no podríamos dejar pasar la oportunidad de agradecer por el apoyo moral brindado por el Sr. Ricardo Milos.

*Muchas gracias por todo*



## TABLA DE CONTENIDOS

1.	Generalidades .....	1
1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Descripción y formulación del problema.....	3
1.3.	Objetivos e hipótesis de la investigación.....	4
1.4.	Justificación de la investigación .....	5
1.5.	Alcance de la investigación .....	5
2.	Estado del arte .....	7
2.1.	Primeros ensayos en albañilería confinada.....	7
2.2.	Refuerzo de albañilería confinada con mallas en México.....	9
2.3.	El uso de unidades tubulares de albañilería como problemática en el Perú.....	11
2.4.	Control de trituración de unidades de albañilería en el Perú .....	14
2.5.	Ensayos en muros de albañilería tubular reforzados con malla electrosoldada	15
	Ensayos de Araoz-Velez-Moro (2012).....	15
	Ensayos de Mamani (2015).....	15
	Ensayos de Díaz et al (2017).....	17
2.6.	Ensayos de resistencia a corte en muretes reforzados con malla electrosoldada	18
	.....	18
2.7.	Refuerzo de albañilería con mortero reforzado con fibras textiles y materiales	19
	compuestos .....	19
	Ensayos de Yacila y Salsavilca con steel reinforced grout (2019) .....	22
3.	Metodología.....	25
3.1.	Etapas del proyecto.....	25
3.2.	Técnicas de ensayo .....	28
	Compresión axial.....	28
	Compresión diagonal.....	29
4.	Control de materiales.....	31
4.1.	Unidades de albañilería.....	31
	Variación dimensional.....	32
	Resistencia a la compresión simple .....	34
	Alabeo.....	39
	Absorción.....	41
4.2.	Mortero .....	42
	Mortero para revoques.....	42
	Mortero para asentado de unidades .....	46

4.3.	Malla electrosoldada .....	48
4.4.	Banda de fibra de acero galvanizado .....	48
4.5.	Malla de fibra de basalto.....	50
5.	Construcción de elementos a ensayar.....	52
5.1.	Pilas.....	52
	Proceso constructivo de pilas .....	52
	Reforzamiento de pilas con malla electrosoldada .....	53
	Reforzamiento de pilas con TRM de fibra de basalto .....	54
5.2.	Construcción de muretes.....	55
	Procedimiento constructivo de muretes.....	55
	Reforzamiento de muretes con malla electrosoldada .....	57
	Reforzamiento de muretes con TRM de fibra de basalto .....	58
	Reforzamiento de muretes con TRM de fibra de acero galvanizado .....	60
6.	Ensayos de especímenes.....	62
6.1.	Ensayos de compresión simple .....	62
	Pilas sin refuerzo .....	63
	Pilas reforzadas con malla electrosoldada .....	66
	Pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto .....	69
6.2.	Ensayo de compresión diagonal.....	72
	Muretes sin refuerzo .....	74
	Muretes con reforzamiento de malla electrosoldada .....	76
	Muretes reforzados con sistema TRM de malla de fibra de basalto.....	79
	Muretes reforzados con sistema TRM de malla de fibra de acero galvanizado .....	83
7.	Análisis de resultados .....	88
7.1.	Estimación de propiedades mecánicas-resistencia a compresión y módulo de elasticidad.....	88
	Pilas sin refuerzo .....	88
	Pilas reforzadas con malla electrosoldada .....	92
	Pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto .....	95
7.2.	Estimación de las propiedades mecánicas-resistencia a corte y módulo de corte	99
	Muretes sin refuerzo .....	99
	Muretes reforzados con malla electrosoldada .....	102
	Muretes reforzados con sistema TRM de fibra de basalto. ....	105
	Muretes reforzados con sistema TRM de fibra de acero galvanizado.....	108
	Gráficas de esfuerzo deformación unitaria.....	112
8.	Análisis de costos .....	117
9.	Conclusiones.....	121

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1. Viviendas particulares con material noble predominante en las paredes exteriores según departamento (INEI, 2017).</i> .....	1
<i>Figura 1-2. Viviendas de cinco y seis niveles de ladrillo pandereta en San Martín de Porres.</i> .....	2
<i>Figura 2-1. Muros ensayados en la fase B por Pineda (1996).</i> .....	10
<i>Figura 2-2. Esfuerzo cortante vs deriva en ensayos de Alcoccer (1995) en muros reforzados con malla electrosoldada.</i> .....	11
<i>Figura 2-3. Bloques de mortero formados en el interior de las unidades tubulares. (Salinas y Lázares, 2007).</i> .....	12
<i>Figura 2-4. Esfuerzo cortante vs. deriva de entepiso en muros con ladrillo King Kong y muros con ladrillo pandereta. (Salinas y Lázares, 2007).</i> .....	13
<i>Figura 2-5. Comparación de envolventes de fuerza cortante entre ensayos de Mamani (MR-01 y MR-02) y Araoz-Velezmoro (M1 y M2) (Mamani, 2015)</i> .....	16
<i>Figura 2-6. Sistema de aplicación de cargas laterales para ensayos. (Díaz et al., 2017).</i> .....	17
<i>Figura 2-7. Curvas de capacidad en términos de esfuerzos cortantes (Díaz et al., 2017).</i> .....	18
<i>Figura 2-8. Tejidos de acero trefilado (izquierda) y de carbono (Pérez, Marco, 2014)</i> .....	21
<i>Figura 2-9. Muro típico reforzado y reparado por Yacila et al. (2019).</i> .....	23
<i>Figura 2-10. Resultados de ensayos en muros reforzados con SRG de Yacila et al, (2019).</i> .....	24
<i>Figura 3-1. Pilas de albañilería a ser reforzada</i> .....	26
<i>Figura 3-2. Murete de albañilería a ser reforzada</i> .....	27
<i>Figura 3-3. Ensayo de compresión axial en pilas de albañilería. (Mamani, 2015).</i> .....	29
<i>Figura 3-4. Ensayo de compresión diagonal en murete de albañilería.</i> .....	30
<i>Figura 4-1. Unidades de albañilería tubular</i> .....	31
<i>Figura 4-2. Ensayo de compresión simple (Díaz et al, 2017).</i> .....	34
<i>Figura 4-3. Ensayo de compresión simple (Hernández et al, 2018).</i> .....	37
<i>Figura 4-4. Colocación de cuña sobre punto de flecha máxima en unidad cóncava (Díaz, et al, 2017).</i> ....	39
<i>Figura 4-5. Cuña graduada y ensayo de alabeo por convexidad (Villegas, 2008).</i> .....	40
<i>Figura 4-6. Ensayo de absorción (Díaz et al, 2017).</i> .....	41
<i>Figura 4-7. GeoCalce Antisísmico.</i> .....	43
<i>Figura 4-8. Cal Comacsa y Cemento Sol.</i> .....	43
<i>Figura 4-9. Apisonado de especímenes.</i> .....	44
<i>Figura 4-10. Especímenes enrasados.</i> .....	44
<i>Figura 4-11. Probetas de mortero (arriba: Cemento-Cal; abajo: Kerakoll).</i> .....	45
<i>Figura 4-12. Falla trapezoidal de mortero C-2.</i> .....	45
<i>Figura 4-13. Mortero TOPEX empleado para el asentado.</i> .....	47
<i>Figura 4-14. Textil de fibra de acero (a) (Santis et al., 2015) – Malla GeoSteel G600 (b).</i> .....	49
<i>Figura 4-15. Aplicación de fibra de acero galvanizado con mortero GeoCalce (Manual Técnico, 2018).</i> ..	49
<i>Figura 4-16. Malla de fibra de basalto</i> .....	51
<i>Figura 5-1. Mortero de para asentado de ladrillo de pila.</i> .....	53
<i>Figura 5-2. Mortero de para asentado de ladrillo de pila.</i> .....	53
<i>Figura 5-3. Pila reforzada con malla electrosoldada.</i> .....	54
<i>Figura 5-4.. Primera capa de mortero en malla de fibra de basalto.</i> .....	54
<i>Figura 5-5. Murete con esquinas reforzadas con mortero (dimensiones en cm).</i> .....	56
<i>Figura 5-6. Construcción de segunda hilada de murete.</i> .....	56
<i>Figura 5-7. Muretes de albañilería confinada a ser reforzados.</i> .....	57
<i>Figura 5-8. Puntos a perforar en murete para refuerzo con M.E.</i> .....	57
<i>Figura 5-9. Murete reforzado con malla electrosoldada.</i> .....	58
<i>Figura 5-10. Esquema de murete reforzado con M.E.</i> .....	58
<i>Figura 5-11. Malla de fibra de basalto.</i> .....	59
<i>Figura 5-12. Corte de malla de fibra de basalto.</i> .....	60
<i>Figura 5-13. Malla de fibra de acero galvanizado.</i> .....	61
<i>Figura 5-14. Proceso de reforzamiento con malla de fibra de acero.</i> .....	61

Figura 6-1. Colocación de capping en las pilas de albañilería tubular. ....	62
Figura 6-2. Ensayo de compresión de pila P-1 .....	63
Figura 6-3. Falla de la fila P-1.....	64
Figura 6-4. Ensayo de compresión de pila P-2. ....	64
Figura 6-5. Falla de Pila P-2. ....	65
Figura 6-6. Ensayo de compresión de Pila P-3. ....	65
Figura 6-7. Falla de pila P-3. ....	66
Figura 6-8. Ensayo de compresión pila PE-1. ....	66
Figura 6-9. Falla pila PE-1. ....	67
Figura 6-10. Ensayo de compresión de pila PE-2. ....	67
Figura 6-11. Falla pila PE-2. ....	68
Figura 6-12. Ensayo de compresión en pila PE-3. ....	68
Figura 6-13. Falla de pila PE-3.....	69
Figura 6-14. Ensayo de compresión de pila PB-1. ....	70
Figura 6-15. Falla de pila PB-1. ....	70
Figura 6-16. Ensayo de compresión de pila PB-2. ....	71
Figura 6-17. Falla local en pila PB-2. ....	71
Figura 6-18. Ensayo de compresión de pila PB-3. ....	72
Figura 6-19. Estado de malla en pila PB-3.....	72
Figura 6-20. Preparación de ensayos de compresión diagonal. ....	73
Figura 6-21. Ejes y colocación de dispositivos LVDT en diagonales. ....	73
Figura 6-22. Amplificador de señales HBM.....	74
Figura 6-23. Falla de murete M-1.....	75
Figura 6-24. Falla murete M-2. ....	75
Figura 6-25. Falla murete M-3. ....	76
Figura 6-26. Falla murete ME-1. ....	77
Figura 6-27. Detalle de falla murete ME-1. ....	77
Figura 6-28. Falla murete ME-2. ....	78
Figura 6-29. Detalle de falla murete ME-2. ....	78
Figura 6-30. Falla ME-3.....	79
Figura 6-31. Detalle de falla ME-3.....	79
Figura 6-32. Falla MB-1. ....	80
Figura 6-33. Autopsia MB-1. ....	80
Figura 6-34. Falla MB-2. ....	81
Figura 6-35. Detalla de falla de MB-2.....	81
Figura 6-36. Desgaste de malla de MB-2.....	82
Figura 6-37. Falla MB-3. ....	82
Figura 6-38. Rotura de malla durante ensayo de MB-3. ....	83
Figura 6-39. Malla aún adherida al mortero de MB-3. ....	83
Figura 6-40. Falla MA-1. ....	84
Figura 6-41. Fibras de acero tensas con desprendimiento de polímero.....	85
Figura 6-42. Banda de fibra de acero adherida a mortero.....	85
Figura 6-43. Falla MA-2. ....	86
Figura 6-44. Detalle falla MA-2.....	86
Figura 6-45. Falla de MA-3.....	87
Figura 6-46. Desgaste de fibras poliméricas.....	87
Figura 7-1. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila P-1. ....	90
Figura 7-2. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila P-2. ....	90
Figura 7-3. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila P-3.....	91
Figura 7-4. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PE-1. ....	93
Figura 7-5. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PE-2. ....	94
Figura 7-6. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PE-3. ....	94
Figura 7-7. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PB-1. ....	96
Figura 7-8. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PB-2. ....	97
Figura 7-9. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PB-3.....	97
Figura 7-10. Gráfica Fuerza-Deformación en murete M-1. ....	100
Figura 7-11. Gráfica Fuerza-Deformación en murete M-2. ....	101

Figura 7-12. Gráfica Fuerza-Deformación en murete M-3. ....	101
Figura 7-13. Gráfica Fuerza-Deformación en murete ME-1. ....	104
Figura 7-14. Gráfica Fuerza-Deformación en murete ME-2. ....	104
Figura 7-15. Gráfica Fuerza-Deformación en murete ME-3. ....	105
Figura 7-16. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MB-1. ....	107
Figura 7-17. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MB-2. ....	107
Figura 7-18. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MB-3. ....	108
Figura 7-19. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MA-1. ....	110
Figura 7-20. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MA-2. ....	110
Figura 7-21. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MA-3. ....	111
Figura 7-22. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete ME-1. ....	113
Figura 7-23. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación angular en murete ME-1. ....	113
Figura 7-24. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MB-1. ....	114
Figura 7-25. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MB-1. ....	114
Figura 7-26. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MA-3. ....	115
Figura 7-27. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MA-3. ....	115



## LISTA DE SÍMBOLOS

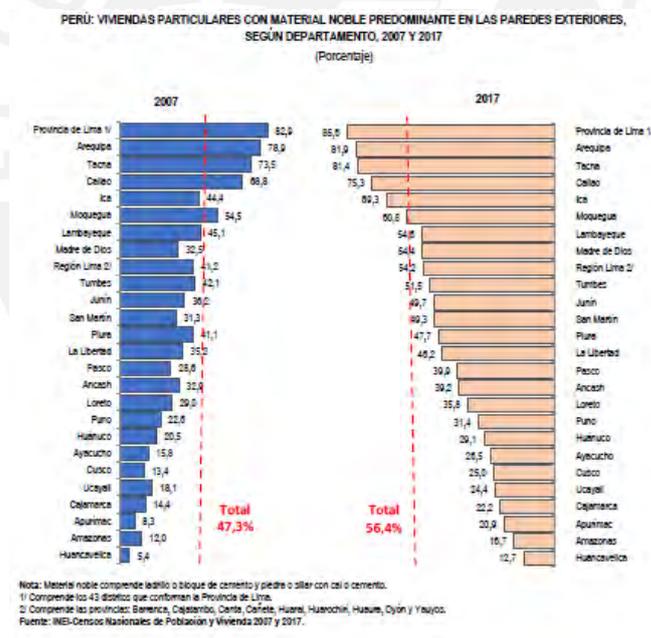
- $f'm$  = Resistencia característica a compresión en ensayos de pilas.  
 $v'm$  = Resistencia característica a cortante en ensayos de muretes  
 $Vr$  = Fuerza cortante resistente en muros de albañilería  
 $\mu$  = Ductilidad  
 $Em$  = Módulo de elasticidad de albañilería  
 $Gm$  = Módulo de corte de albañilería  
 $fb$  = Resistencia a compresión de la unidad de albañilería  
 $\sigma$  = Desviación estándar



# 1 GENERALIDADES

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En el Perú, gran cantidad de las estructuras con fines de vivienda han sido construidas bajo el concepto de albañilería confinada, sistema cuyo desarrollo en nuestro país data desde la década del 40 (San Bartolomé, Quiun y Silva, 2018). El censo del año 2017 revela que en el Perú existen 4 298 274 (55.8%) viviendas particulares en las que en sus muros exteriores predomina el ladrillo o bloque de concreto como material de construcción (Figura 1-1). Sin embargo, sobre el total de viviendas de la provincia de Lima, este porcentaje asciende a un 85.6% (Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017).



**Figura 1-1. Viviendas particulares con material noble predominante en las paredes exteriores según departamento (INEI, 2017).**

Para preocupación de muchos, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento reveló que más del 60% de estas construcciones de albañilería son informales, es decir que fueron diseñadas sin criterio técnico (Kuroiwa, 2016). El principal error refiere al uso

de unidades tubulares no permitidas para muros portantes por la norma E.070 en zonas de alta sismicidad (Tabla 1.1) lo que denota un desconocimiento de la población y constructores sobre el uso de las normativas desarrolladas en ese rubro. Este hecho conlleva a que la vulnerabilidad, definida por las características estructurales de las viviendas, se vea incrementada.



**Figura 1-2. Viviendas de cinco y seis niveles de ladrillo pandereta en San Martín de Porres.**

En la figura 1-2 se puede observar la existencia de viviendas de varios niveles con la problemática presentada en el párrafo anterior en un mismo vecindario en el distrito de San Martín de Porres.

El uso de unidades tubulares es una práctica común en la zona analizada; el problema se vuelve más crítico al tratarse de viviendas de hasta 6 niveles en donde las fuerzas sísmicas aumentan a medida que la masa también lo hace. Las unidades empleadas, muy probablemente, se verán trituradas en un sismo severo, con drástica caída en la capacidad resistente de los muros, por lo que el comportamiento sísmico no será el deseado y podría causar perjuicio a los habitantes de estas viviendas. Ante el peligro al cual se ven expuestas las estructuras que adoptan el sistema estructural de albañilería confinada con muros de ladrillo pandereta, se vuelve una necesidad encontrar un refuerzo económico, de manera que se pueda mejorar sus propiedades mecánicas y, así, mejorar el desempeño sísmico para poder salvaguardar vidas humanas ante un sismo fuerte.

## 1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El uso de unidades tubulares para muros portantes se ha propagado en gran medida dentro de todo el Perú, lo que conlleva a un aumento de la vulnerabilidad que depende, en gran parte, de la estructuración del edificio, de su rigidez y su capacidad para incursionar en el rango inelástico, es decir, qué tan susceptible es la estructura para sufrir daños durante un sismo. Los ladrillos tubulares en muros portantes han sido prohibidos por la norma E.070 para construcción de edificaciones en la zona sísmica 4 (costa del Perú) por su falla de carácter frágil y explosiva, a menos que se demuestre que estos muros no tienen responsabilidad sísmica (ver tabla 1.1). A partir de esto, surge el interés en buscar una manera en la que estos muros puedan alcanzar desplazamientos importantes durante un evento sísmico sin acercarse al colapso y, en caso se dé, darles a los ocupantes suficiente tiempo para resguardar su vida. A esto se le denomina un buen desempeño sísmico, y es el objetivo principal de la ingeniería sismoresistente según la Norma E.030 (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de Construcción [SENCICO], 2016).

Tabla 1.1. Limitaciones en el uso de la unidad de albañilería para fines estructurales (SENCICO, 2006)

TIPO	ZONA SÍSMICA 2 Y 3		ZONA SÍSMICA 1
	Muro portante en edificios de 4 pisos a más	Muro portante en edificios de 1 a 3 pisos	Muro portante en todo edificio
<b>Sólido Artesanal*</b>	No	Sí, hasta dos pisos	Sí
<b>Sólido Industrial</b>	Sí	Sí	Sí
<b>Alveolar</b>	Sí Celdas totalmente rellenas con grout	Sí Celdas parcialmente rellenas con grout	Sí Celdas parcialmente rellenas con grout
<b>Hueca</b>	No	No	Sí
<b>Tubular</b>	No	No	Sí, hasta 2 pisos

La norma sismoresistente y la norma de albañilería solo permite una deriva de entrepiso (desplazamiento lateral entre altura del muro) igual a 0.005 asociada al deterioro de la estructura de edificios de albañilería. Para lograr un buen desempeño sísmico, el comportamiento de los muros debe mostrar resistencia a carga lateral y controlar la deriva de entrepiso. Para esto, en el presente trabajo de tesis se seguirá la línea de investigación

de reforzamiento de muros de albañilería confinada hechos con unidades de albañilería tubular en viviendas. Los refuerzos propuestos son tres: malla electrosoldada de diámetro  $D= 4.5$  mm con un espaciamiento entre barras de acero igual a 150 mm, sistemas de mortero reforzado con fibra de basalto y mortero reforzado con fibra de acero galvanizado (Textile Reinforced Mortar, TRM).

Una vez propuestos los refuerzos surge la primera interrogante: ¿Podrá el refuerzo propuesto mejorar el comportamiento sísmico en muros de albañilería confinada? Si esto es así, se podría solucionar una parte de la problemática observada en las ciudades del Perú: el mal comportamiento sísmico de muros portantes de albañilería confinada debido al uso indebido de unidades tubulares para su construcción.

Asimismo, para entender el comportamiento de los muros de albañilería se deberán conocer las propiedades mecánicas del material. Se busca conocer de qué manera influenciará el reforzamiento en las propiedades mecánicas de albañilería de unidades tubulares. Esta investigación se enfocará en ciertos parámetros mecánicos elásticos de la albañilería reforzada tales como valores de esfuerzos de compresión axial, esfuerzos cortantes, módulo de elasticidad y módulo de corte.

### **1.3 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

En base a las preguntas de investigación planteadas se definirán los objetivos del presente proyecto de investigación. De manera general se busca discutir si el uso de malla electrosoldada o morteros reforzados con fibras de basalto y acero galvanizado mejorará el comportamiento sísmico en muros de albañilería confinada de unidades tubulares.

Como objetivos específicos, se plantea identificar si el uso del refuerzo propuesto aumenta cuantitativamente las propiedades mecánicas mencionadas de la albañilería confinada de unidades tubulares en etapa elástica.

Como hipótesis principal en el comportamiento de los prismas de albañilería tubular, se plantea que el refuerzo con malla electrosoldada y el refuerzo con un sistema TRM de fibra de basalto y de acero galvanizado aumentará la resistencia característica de los prismas. Los valores de la resistencia a compresión y corte aumentarán en aproximadamente 15% al presentar refuerzo. En un muro a escala natural, la ductilidad se

vería grandemente incrementada; sin embargo, en la etapa lineal estos beneficios que brinda el refuerzo no se podrán apreciar como sí se haría en la etapa inelástica.

#### **1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El uso de un ladrillo no estructural (capaz de soportar las fuerzas de gravedad y producidas por los sismos) en muros portantes de albañilería confinada representa un riesgo en la vida de los propietarios ante un sismo severo en todo el Perú. Como se ha mencionado anteriormente, los ladrillos tubulares han sido prohibidos por la norma E.070 para construcciones de edificaciones en zonas sísmicas como Lima y otras ciudades de la costa. Sin embargo, se puede observar que existen numerosas viviendas en las que aún se emplea este material para la construcción de muros con responsabilidad sísmica.

El ingeniero Hernando Tavera, presidente del Instituto Geofísico del Perú, afirma que la ciudad de Lima se encuentra en silencio sísmico desde el año 1746 con un sismo asociado de 9 Mw. Por otro lado, el último sismo que trajo consigo grandes consecuencias para la infraestructura y población, registrado en la costa, fue el de Pisco en el año 2007 (Mw 8.0) a 220 km de Lima; sin embargo, en Lima, la energía sigue acumulándose, producto de la convergencia de placas a medida que el tiempo sigue transcurriendo. Por esta razón, se cree que el siguiente sismo severo cerca de la capital será de un nivel catastrófico y, sostiene Tavera, no está preparada para un evento de esta magnitud (Instituto Geofísico del Perú [IGP], 2014).

Juntando estas dos premisas: un sismo futuro de gran magnitud y viviendas deficientemente construidas, el evidente resultado será una gran cantidad de daños materiales y vidas perdidas. Por esta razón, nace el interés en enfocarse en la población vulnerable y dar ideas para reforzar sus viviendas de una manera económicamente viable de tal manera que el comportamiento sísmico mejore y en el evento mencionado la estructura no colapse provocando la muerte de sus habitantes.

#### **1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

La problemática se centra en la ciudad de Lima, principalmente en zonas constituidas en el cono norte (Los Olivos, San Martín de Porres, Independencia), la cual pertenece a la zona sísmica 4 ( $Z=0.45$ ), según se establece en el mapa de isoaceleraciones presentado en

la Norma E.030 (2018). Por ello, los resultados de la investigación y el análisis de resultados de esta son solo aplicables a zonas de iguales o similares características geográficas y sísmicas. Los ensayos realizados, los resultados obtenidos y las conclusiones inferidas son asociadas al uso de unidades tubulares de albañilería de un proveedor conocido en la ciudad de Lima.

El tipo de refuerzo a utilizar es una malla electrosoldada cuyo diámetro de barra es de 4.5 mm y con una cocada de 150 mm x 150 mm, malla de fibra de basalto adherida en una matriz inerte de mortero de cal (TRM) y fibra de acero galvanizado adherida en una matriz inerte de mortero de cal (TRM). El tipo de materiales limita la comparación de resultados a obtenerse en futuros ensayos, por lo que se deberá utilizar refuerzos, materiales y procedimientos de las mismas características.



## 2 ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se hará referencia a algunas de las investigaciones realizadas hasta la fecha sobre el refuerzo de sistemas de albañilería en el Perú y otros países. Se empezará con los primeros ensayos de albañilería confinada en el Perú e irá avanzando con el desarrollo de diversos tipos de refuerzo llegando así a los métodos de reforzamiento más actuales como lo son el empleo de las fibras de polímeros o el uso de morteros con fibras textiles como sistema de reforzamiento.

### 2.1 PRIMEROS ENSAYOS EN ALBAÑILERÍA CONFINADA.

Hasta el año 1982 los resultados de los ensayos en la albañilería confinada eran escasos (San Bartolomé et al, 2018); fue entonces que el ingeniero Ángel San Bartolomé empieza con una gran labor de investigación en estructuras de albañilería. Fue 1983 el año en el que el ingeniero San Bartolomé realizó ensayos cíclicos de carga lateral en muros de albañilería confinada, en los cuales se pudo analizar su comportamiento y relacionar los esfuerzos obtenidos en los ensayos de prismas de albañilería (ensayo de compresión axial en pilas y el ensayo de compresión diagonal en muretes) con el comportamiento de muros de albañilería a escala natural.

Estos primeros ensayos mostraron que, después del agrietamiento diagonal, los elementos de confinamiento no eran eficientes, especialmente en la zona central donde las grietas eran más pronunciadas. A partir del agrietamiento diagonal, se generaban concentraciones de esfuerzos y degradación de la resistencia y rigidez del muro, mostrando así un comportamiento súbito y frágil en el estado de falla. Además, se relaciona la resistencia al corte correspondiente al agrietamiento diagonal de un muro de albañilería ( $V_r$ ) con la resistencia característica al corte correspondiente a ensayos en muretes ( $v'm$ ). Esta primera investigación propuso la relación  $V_r = 0.56xv'm$  la cual posteriormente fue ajustada y adaptada en la norma E 0.70 del 2006 (San Bartolomé, 1983) a un valor de  $V_r = 0.50xv'm$ .

Por otro lado, en Europa, los ingenieros Matsumura (1987) y Tomažević (1999) propusieron relaciones que dependían de la resistencia en prismas de albañilería, cuantías, esfuerzos de fluencia del acero vertical y horizontal, relación entre altura y ancho del

muro (relación de aspecto), precompresión y área de la sección transversal. La expresión propuesta por Matsumura es:

$$Vn = \left[ k_u k_p \left( \frac{0.76}{\frac{h}{a} + 0.7} + 0.012 \right) \sqrt{f'm} + 0.2\sigma + 0.18\gamma\delta\sqrt{\rho_h f_{yh} f'm} \right] (0.875td),$$

mientras la de Tomažević es:

$$Vn = A_w \left( \frac{f_t}{b} \right) \sqrt{\frac{\sigma}{f_t} + 1} + \Phi A_{sh} f_{yh} + 1.026 A_{sv} \sqrt{f_j f_{yv}}.$$

Entre las variables que se presentan en estas fórmulas se encuentra la resistencia a compresión axial, la resistencia a corte, cuantías de acero, esfuerzos de tracción de fluencia del refuerzo horizontal y vertical, la relación de aspecto, los valores de esfuerzos de pre compresión y el área transversal de la sección. En específico se tiene:

ku: factor según tipo de grouting (yeso y cemento)

f'm: resistencia característica a la compresión de la albañilería

$\sigma$ : esfuerzo normal de pre compresión

$\gamma$ : peso específico de la albañilería

ph: cuantía horizontal

f<sub>yh</sub>: esfuerzo de fluencia del acero horizontal

A<sub>w</sub>: área perpendicular al plano de aplicación de carga

f<sub>c</sub>: resistencia de compresión del concreto

f<sub>t</sub>: resistencia de tracción del concreto

A<sub>sh</sub>: área de acero horizontal

A<sub>sv</sub>: área acero resistente a corte

f<sub>j</sub>: resistencia a la compresión del mortero de relleno

f<sub>yv</sub>: esfuerzo de fluencia de acero vertical

Para albañilería confinada, la relación de Matsumura mostró mejor desempeño. La mayoría de códigos en el mundo preestablecían una independencia de variables como el

aporte de la albañilería, carga axial, y acero de refuerzo. Sin embargo, para los autores, esta asunción era errónea ya que las expresiones reconocen interdependencia entre las variables involucradas en el mecanismo de resistencia al corte. (Aguilar y Sandoval, 2014)

A partir de las investigaciones anteriores, se concluyó que la albañilería confinada necesitaba un refuerzo para poder controlar las grietas que se generaban debido a fuerzas laterales. Un primer intento por estudiar el refuerzo de muros de albañilería fue impulsado por Pastorutti (1985). En esta investigación, se ensayaron diferentes propuestas de refuerzo horizontal y vertical. Se pudo verificar que, a mayor área de acero de refuerzo horizontal, aumentaba el número de grietas, pero estas tenían un espesor considerablemente menor debido a la redistribución de esfuerzos. Se concluyó que después de que empieza el agrietamiento en el muro, el refuerzo horizontal empieza a trabajar y controla las grietas producidas por cargas laterales. (Pastorutti, 1985).

## **2.2 REFUERZO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA CON MALLAS EN MÉXICO**

A lo largo de los años se han venido estudiando métodos de reforzamiento para los sistemas comunes como la albañilería confinada o armada. Sin embargo, si se desea llegar a derivas de un orden comparable a las dadas durante un evento sísmico de magnitud considerable sin llegar a una falla explosiva y frágil, se deben reforzar los muros portantes a una mayor escala.

México tenía una práctica constructiva similar a la peruana, la albañilería era el método de construcción más frecuente (Alcocer et al, 1995). Por esta razón se inició un programa de investigación impulsado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres para estudiar el refuerzo con mallas electrosoldadas en los muros de albañilería. Este fue el primer estudio en la zona que involucra un reforzamiento en dos direcciones para muros de albañilería. Se realizaron dos tipos de ensayos, fase A y fase B. En la fase A, se reparó una estructura de tres dimensiones de dos niveles previamente ensayada hasta la deriva tolerable (Ruiz 1995). En la fase B, Pineda (1996) reforzó tres muros aislados a escala real para ser sometidos a un ensayo de carga lateral estática cíclica (Figura 2-1). Los resultados mostraron valores alentadores con respecto a este método de reforzamiento.

Los muros reforzados presentaban una distribución más uniforme de grietas y una mejora sustancial en la disipación de energía por cargas laterales. El sistema de la fase A, aumentó su resistencia en 25%, de un esfuerzo cortante de 0.37 MPa a 0.5 MPa, y su deriva máxima alcanzó valores de 0.014 a comparación del 0.005 obtenido en la etapa sin refuerzo (Alcocer et al, 2006).

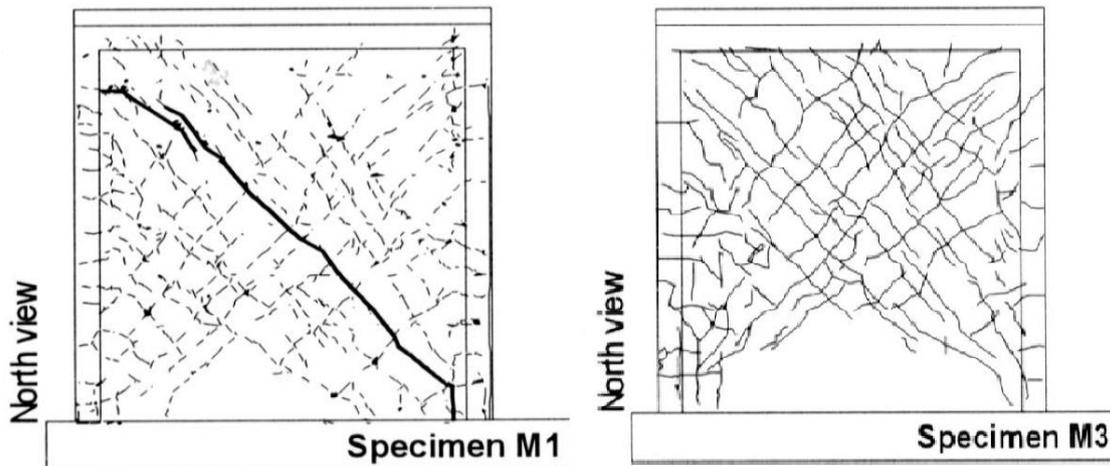


Figura 2-1. Muros ensayados en la fase B por Pineda (1996).

Se presentó un incremento notable en la resistencia y la capacidad de deformación. Para un muro aislado, con una cuantía de acero del orden de  $1.5 \text{ cm}^2/\text{m}$ , la capacidad ante fuerzas laterales se incrementó a casi el doble a comparación de un muro sin reforzamiento alguno. En la figura 2-2 se aprecian los resultados de los ensayos realizados en donde se observa claramente que los muros reforzados en la investigación, M1 y M3, tuvieron un aumento considerable en el esfuerzo cortante soportado y su desplazamiento unitario con respecto a un ensayo anterior de un muro sin reforzamiento (M0) (Alcocer et al, 2006).

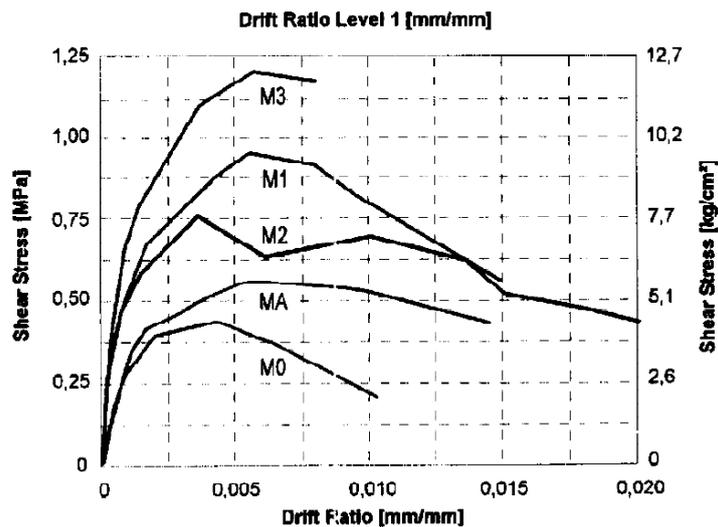


Figura 2-2. Esfuerzo cortante vs deriva en ensayos de Alcocer (1995) en muros reforzados con malla electrosoldada.

### 2.3 EL USO DE UNIDADES TUBULARES DE ALBAÑILERÍA COMO PROBLEMÁTICA EN EL PERÚ

En el año 2007, año de ocurrencia del último gran sismo en las costas del Perú, el ingeniero Ángel San Bartolomé estudió los defectos que incidieron en el comportamiento de las construcciones de albañilería ocasionados por el movimiento telúrico. Se mostraron los diferentes efectos en los elementos de estructuras pertenecientes a las ciudades afectadas (Pisco, Chincha e Ica), tales como efecto en cimentaciones, suelo y muros de albañilería; es en este último tipo de elemento sobre el cual resaltan los defectos en la concepción del diseño y la construcción misma, lo que denota una problemática, aún latente, en el aspecto técnico. En lo que respecta a la albañilería, las columnas cortas, falta de arriostramiento en los parapetos y principalmente el material de construcción fueron los factores que más incidieron en el mal comportamiento sísmico de las viviendas en la localidad; el mal uso del adobe y de las unidades de ladrillo pandereta no hicieron más que agravar los daños ocasionados por las malas concepciones en los diseños y en los procesos constructivos (San Bartolomé, 2007).

Para ese mismo año, en el Perú se evidenciaba una problemática que venía desde la década del 90. Las unidades huecas de albañilería, e incluso tubulares, no aptas para el uso en muros portantes en zonas sísmicas, estaban siendo utilizadas cada vez con más

frecuencia. Una encuesta realizada por Salinas y Lázares (2006) mostraba que en los distritos de San Martín de Porres y Los Olivos el uso de unidades tubulares de arcilla cocida (pandereta) en viviendas llegaba al 57% del total de la muestra (168). Estas unidades están diseñadas para la separación de ambientes (tabiquería) mas no para soportar cargas verticales ni horizontales.

Ensayos realizados por estos investigadores muestran la baja resistencia a compresión de estas unidades (2.74 MPa); sin embargo, la resistencia a cortante mostraba valores elevados (0.80 MPa) comparables con las unidades estructurales. Esto puede estar asociado a la unión producida entre el mortero y la cara lateral de los ladrillos pandereta. El mortero penetra en el interior de los vacíos tubulares formando así unos pequeños bloques de mortero que podrían actuar como llaves de corte incrementando su resistencia en el plano de falla (Figura 2-3).



**Figura 2-3. Bloques de mortero formados en el interior de las unidades tubulares. (Salinas y Lázares, 2007).**

Salinas y Lázares (2006) realizaron, por primera vez en el Perú, ensayos en muros de albañilería confinada con unidades tubulares. El tipo de falla que provocó la disminución de la capacidad resistente fue del tipo tracción diagonal (corte) con deformaciones unitarias cercanas a 0.005. Los lazos histéricos angostos revelaban una baja capacidad de disipación de energía ante cargas laterales. La carga lateral máxima soportada, en promedio, fue de 15.6 toneladas con una deformación de 12.5 mm y una ductilidad promedio de  $\mu= 6.6$ .

En la figura 2-4 se muestra la comparación entre dos muros hechos por Salinas y Lázares con ladrillo pandereta y un tercer muro portante hecho de ladrillo King Kong; se observa la diferencia entre capacidad resistente a fuerzas laterales entre muros diseñados para soportar cargas verticales y horizontales (portantes) y otros muros que no deberían usarse para estos fines. Los muros de albañilería con unidades tubulares mostraron una resistencia 60% menor que el muro de ladrillos sólidos comparado. De esta manera se evidenciaba el mal desempeño de las unidades tubulares para desarrollar responsabilidad sísmica en construcciones de este tipo (Salinas y Lázares, 2007). Los muros hechos con ladrillo pandereta en esta investigación apenas pueden compararse con los muros sin reforzamiento de la investigación de Pineda en México. A pesar que el muro M0 de la investigación de Pineda posee una resistencia máxima de 0.46 MPa se puede observar que los muros Pandereta-I y Pandereta-A apenas se acercan a este valor en su etapa de sobrerresistencia. Se puede observar también cómo el muro estructural estudiado por Salinas y Lázares posee una mayor resistencia, lo cual puede deberse a diferencia de materiales de cada región.

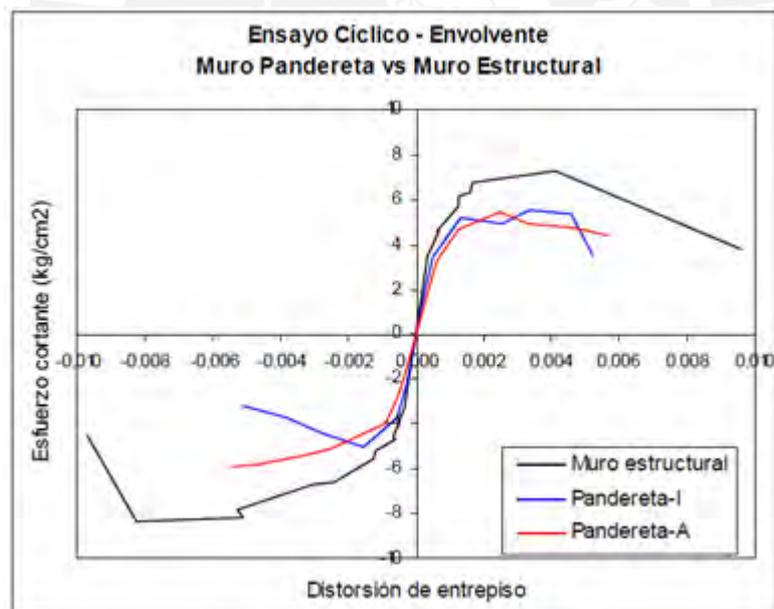


Figura 2-4. Esfuerzo cortante vs. deriva de entrepiso en muros con ladrillo King Kong y muros con ladrillo pandereta. (Salinas y Lázares, 2007).

## 2.4 CONTROL DE TRITURACIÓN DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA EN EL PERÚ

Quiun en el año 2005, a partir del desempeño observado, luego de ocurrido el terremoto del Ático (2001), por las estructuras de muros confinados compuestas por unidades de concreto típicos de Tacna que sufrieron fallas, decidió estudiar los incrementos en carga lateral por parte de las estructuras conformadas por este tipo de unidades; en ese sentido, se llevó a cabo la construcción de 02 muros hechos con bloques de concreto (B1 y B2). B1 fue ensayado sin refuerzo; luego, ese mismo espécimen reforzado constituyó el muro B3. B2 fue reforzado con malla de alambre. Los incrementos de resistencia a la carga lateral fueron de 56% para el muro B2 y 48% para el muro B3. Lo rescatable no fue solo el aumento en resistencia a cargas laterales, sino el cambio de modo de falla por parte de los muros: B1 falló por corte con grietas gruesas, mientras que B3 falló en las uniones columna – muro, con grietas mucho más finas (Quiun, 2018).

Paredes y Caycho (2009), ante el uso de unidades huecas de albañilería en muros portantes, buscaban controlar la trituración de los ladrillos huecos ante cargas laterales, en este caso, ladrillo King Kong con un porcentaje de vacíos mayor al 30% permitido por la norma para unidades aptas en muros portantes. Se propuso un refuerzo netamente horizontal en una cuantía de 0.001 entre las juntas de mortero en los muros de albañilería confinada. El acero controló las grietas en cierta medida; sin embargo, antes de llegar a la deriva de 0.005 varias unidades ubicadas en las esquinas se trituraron y la resistencia empezó a descender ligeramente. Se concluyó que el acero horizontal en las juntas no era suficiente para evitar la trituración de las unidades de albañilería huecas.

Barr y Pineda (2011) continuaron la investigación de Paredes y Caycho con la consigna de encontrar un sistema que evite la trituración en unidades King Kong huecas. Esta vez se utilizó el método de refuerzo usado en México por Alcocer et al (1996): malla electrosoldada. El refuerzo cambió el tipo de falla de corte (muro sin refuerzo) a falla por flexión. El refuerzo controló las grietas y, por lo tanto, la pérdida de resistencia del muro hasta que se generó una grieta vertical en la columna, lo que propició la falla del sistema.

En general, se observó un aumento de propiedades mecánicas, pero al momento de verificar la resistencia unitaria no hubo un aumento de esfuerzos consistente, contrario a

los resultados en México. En esta ocasión no se presentó trituración en ninguna unidad de ladrillo hueco, dando así resultados satisfactorios a la investigación realizada. Los cálculos para la predicción del comportamiento del muro reforzado se realizaron con valores aproximados ya que hasta ese momento no se habían realizado ensayos en prismas con malla electrosoldada, necesarios para tener predicciones más consistentes con los resultados reales (Barr y Pineda, 2011).

## **2.5 ENSAYOS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA TUBULAR REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA**

### **2.5.1 ENSAYOS DE ARAOZ-VELEZMORO (2012)**

Las investigaciones en unidades huecas dieron resultados satisfactorios para controlar las grietas y aumentar la resistencia en los muros de albañilería confinada con malla electrosoldada. Araoz y Velezmoro (2012) intentaron extrapolar el buen resultado de este refuerzo en unidades de albañilería tubular. En esta ocasión se utilizó una malla con acero de diámetro de 4.5 mm espaciada a 150 mm.

En esta investigación se ensayó un muro a escala natural con el refuerzo mencionado y se mostró un aumento de 48% en la resistencia ante cargas laterales del muro. La falla se debió a una grieta vertical concentrada en la columna por sollicitaciones de flexocompresión. Debido a altos esfuerzos en los extremos, se perdió la adherencia entre el acero vertical y el concreto de la columna de confinamiento. La tendencia en aumento de resistencia se vio reflejada también en los esfuerzos cortantes a pesar de tener un área transversal diferente debido a las diferencias de espesor del tarrajeo. La malla logró cambiar el tipo de falla de corte a flexión debido al refuerzo colocado, sin embargo, la predicción de los valores no se pudo aproximar debido a la falta de ensayos de pilas y muretes con el refuerzo estudiado (Araoz y Velezmoro, 2012).

### **2.5.2 ENSAYOS DE MAMANI (2015)**

La investigación de Mamani (2015) le dio un enfoque más completo a la problemática de la construcción informal con unidades tubulares. Esta vez, se realizó por primera vez en el laboratorio de la PUCP ensayos en pilas y muretes reforzados con malla electrosoldada externamente a la albañilería. Los valores en los ensayos de compresión denotaron un aumento en la resistencia por fuerzas axiales, pero se mostraron valores desalentadores en

los ensayos de compresión diagonal ya que se presentaron fallas locales en las zonas de aplicación de cargas por lo que los resultados no son aplicables en la predicción de esfuerzos en el muro ensayado. En promedio, no se llegó a un aumento sustancial de la resistencia a corte directo (0.9 MPa).

La diferencia más notable en los ensayos realizados por Mamani fue que se analizaron dos muros reforzados con mallas electrosoldadas difiriendo la carga vertical aplicada en cada muro, y luego sometidos a carga lateral cíclica. El comportamiento observado fue un aumento de resistencia a carga lateral (14 %) debido al aumento de carga vertical. Para ambos casos, se cambió el tipo de falla de los muros partiendo de una falla de corte a una falla por flexión. La falla se presentó en los talones de las columnas de concreto armado mas no por agrietamiento diagonal. En la figura 2-5 se observa una comparación entre los resultados de Mamani y Araoz-Velezmoro. Se ve el aumento de resistencia entre las dos investigaciones en la que la malla electrosoldada y el aumento de la carga vertical aumenta la resistencia a cargas laterales.

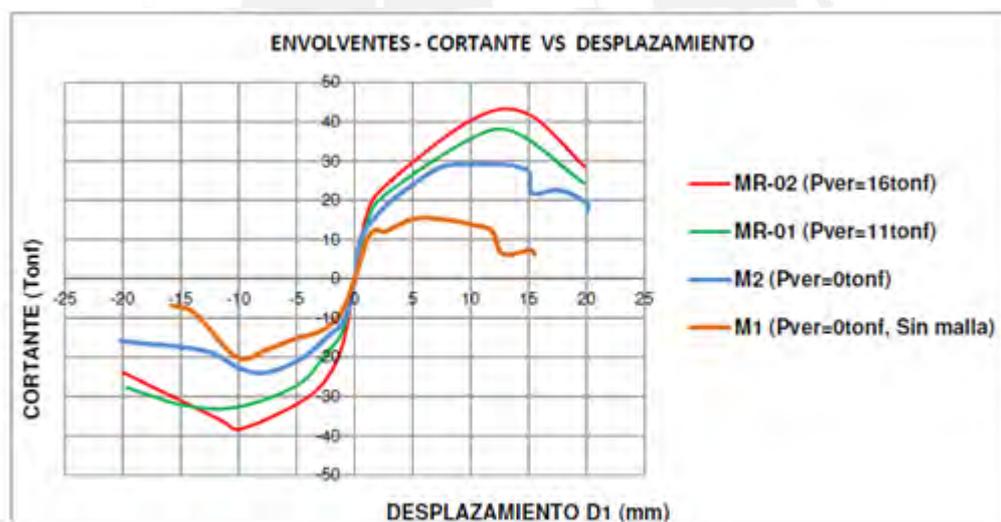


Figura 2-5. Comparación de envolturas de fuerza cortante entre ensayos de Mamani (MR-01 y MR-02) y Araoz-Velezmoro (M1 y M2) (Mamani, 2015)

En cuanto al agrietamiento diagonal, los muros tuvieron una mayor resistencia por agrietamiento que la calculada con los valores de los ensayos de prismas de albañilería. Esto se debió a que el acero de los muretes no desarrolló su verdadera resistencia a corte directo por la falla local presentada en el ensayo. Es vital, para lograr una mejor

predicción de resultados en muros de albañilería, realizar ensayos en prismas de albañilería con el refuerzo a estudiar en los que no se presenten fallas locales ya que el refuerzo no alcanzará su verdadera resistencia y los resultados no reflejarán aumento en resistencia alguna (Mamani, 2015).

### 2.5.3 ENSAYOS DE DÍAZ ET AL (2017)

Díaz (2017) mejoró la técnica de reforzamiento empleada por Zavala et al. en el 2009, malla electrosoldada en ambas caras del muro. Expandió el refuerzo hasta las columnas de confinamiento y ancló la malla a dovelas que estaban conectadas con la cimentación del muro. Dos tipos de ladrillos fueron utilizados para esta investigación, el ladrillo sólido artesanal y el ladrillo pandereta industrial. Se construyeron 4 muros a escala natural, 2.5 metros de alto con 2.4 metros de ancho. Dos eran de ladrillos pandereta (MTUB y MTUB-R) y los otros dos de unidades artesanales de albañilería (MART y MART-R), uno sin reforzar y el otro reforzado de cada tipo. Estos muros fueron sometidos a ensayos de carga lateral cíclica además de una carga axial de 200 kN a los muros de unidades artesanales y 100 kN a los similares de ladrillos tubulares. Los sistemas de aplicación de carga y medición de deformaciones se muestran en la figura 2-6.

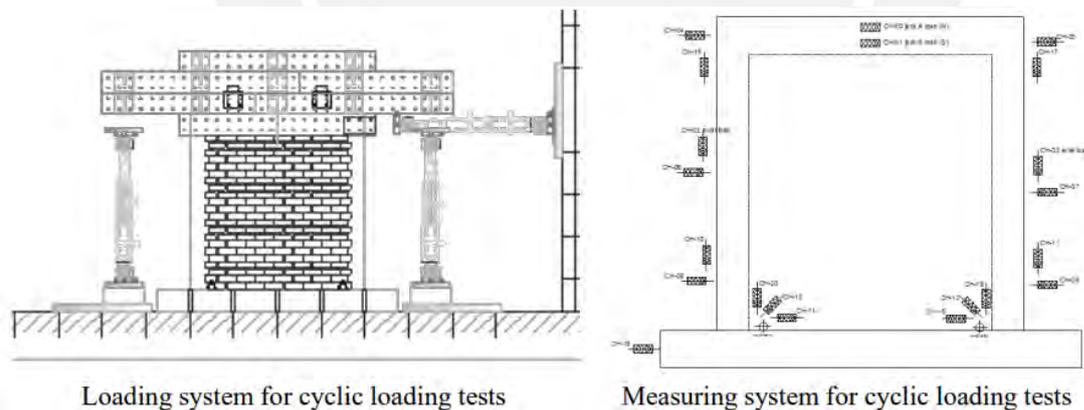


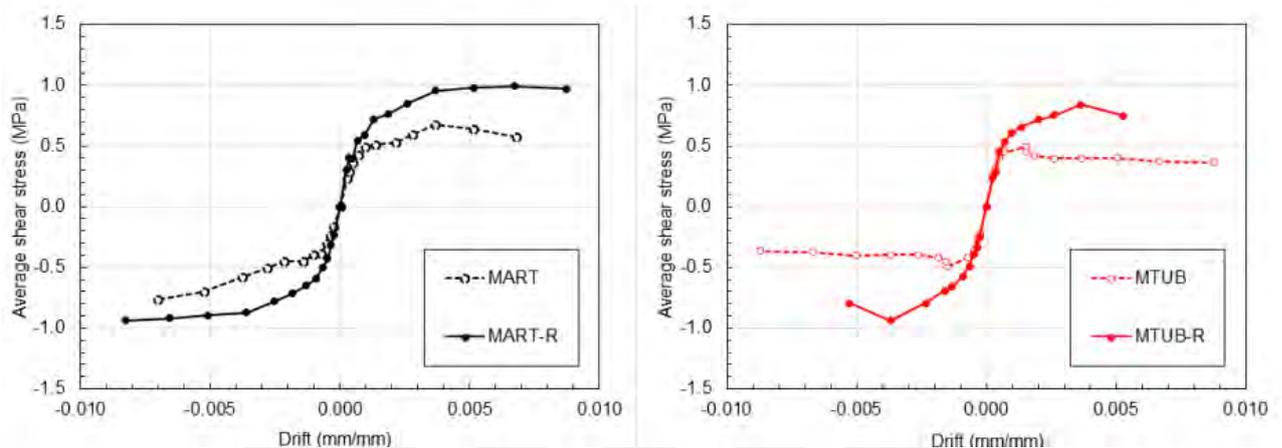
Figura 2-6. Sistema de aplicación de cargas laterales para ensayos. (Díaz et al., 2017).

La figura 2-7 muestra cómo el sistema de reforzamiento aumentó la resistencia a esfuerzo cortante en ambos especímenes. El aumento de esfuerzo cortante máximo debido al reforzamiento es de 54% y 83% para los muros de unidades macizas artesanales y de unidades tubulares industriales respectivamente. Por otro lado, la deriva aumentó un 88%

y un 136% para los mismos muros respectivamente. En la tabla 2.1 se puede apreciar los valores de los ensayos para los muros ensayados. Además, se puede observar la baja deriva que se tuvo al ensayar un muro de albañilería confinada de unidades tubulares sin reforzamiento, el valor de 0.0015 alarma a los investigadores a que este sistema de albañilería no debería usarse sin reforzamiento (Díaz et al, 2017).

**Tabla 2.1. Comparación del máximo esfuerzo cortante promedio (Díaz et al, 2017).**

Espécimen	MART	MART-R	MTUB	MTUB-R
Esfuerzo de corte promedio (MPa)	0.67	1.02	0.48	0.89
Porcentaje de deriva (%)	0.36	0.67	0.15	0.36



**Figura 2-7. Curvas de capacidad en términos de esfuerzos cortantes (Díaz et al., 2017).**

## 2.6 ENSAYOS DE RESISTENCIA A CORTE EN MURETES REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA

En diversas investigaciones en las que se estudiaba el efecto del refuerzo por mallas electrosoldadas en albañilería confinada con unidades tubulares se enfatiza la falta de ensayos en pilas y muretes con el refuerzo a estudiar. Con esta premisa, Díaz y Cevallos (2018) realizaron ensayos de compresión diagonal para así encontrar la influencia de la malla electrosoldada en la resistencia a corte directo de las unidades tubulares reforzadas.

Se ensayaron nueve muretes, tres de ellos sin refuerzo, a otros tres muretes se les reforzó con malla de tarrajeo y a los últimos se le reforzó con malla electrosoldada. Los

resultados no fueron satisfactorios. Se presentaron fallas locales en los puntos de aplicación de la carga por lo que nuevamente los valores obtenidos, en promedio, no mejoraban la resistencia al corte directo para muretes de albañilería ya que el conjunto malla-albañilería no alcanzó su verdadera capacidad de resistencia. Solo un espécimen de los tres ensayados no manifestó falla concentrada, este mismo mostró valores alrededor de los 1.1 MPa en comparación a los valores presentados en los muretes sin reforzar de 0.96 MPa (Díaz y Cevallos, 2018).

Ya que la necesidad de encontrar valores que reflejen el aumento de resistencia en albañilería tubular reforzada con malla electrosoldada sigue siendo tema de interés, se necesita encontrar una forma efectiva de realizar el ensayo de compresión diagonal de muretes en los que se evite totalmente la falla concentrada en los puntos de aplicación de cargas. En ensayos anteriores se rellenaron las esquinas de los muretes con mortero a una profundidad de 10 cm. Este relleno ha resultado ineficiente tanto en los ensayos de Mamani (2015) como en los de Díaz y Cevallos (2018) por lo que se necesita un relleno más eficaz en el que se proteja a toda la unidad tubular, según recomendaciones de los mismos investigadores.

Díaz y Cevallos (2018) recomendaron aumentar la longitud del capping colocado en los bordes para que no sea del mismo tamaño que la superficie de contacto con el instrumento que aplica cargas durante el ensayo. El objetivo de este proyecto es encontrar valores de resistencia característica en prismas de albañilería con unidades tubulares para así poder conocer a detalle las propiedades mecánicas de estos elementos.

## **2.7 REFUERZO DE ALBAÑILERÍA CON MORTERO REFORZADO CON FIBRAS TEXTILES Y MATERIALES COMPUESTOS**

Así como se ha ido desarrollando a lo largo de la historia diferentes métodos para reforzar las estructuras de albañilería, tales como, inicialmente, los tratamientos de superficie (shotcrete o ferrocemento), inyecciones de grout o preesfuerzo interno o externo usando amarres de acero, se han producido avances y metodologías que consisten en los usos de capas de mallas compuestas de metales o polímeros. (Patnaik, Puli, Mylavarapu, 2004). Tumilan, Vatovec y Kelley (2009) estudiaron el refuerzo de muros de albañilería con

polímeros fibro-reforzados (FRP). Estas fibras fueron exitosamente probadas ante sollicitaciones de corte y flexión. Aumentaron la capacidad de resistencia ante cargas coplanares y perpendiculares y controlaron exitosamente las fisuras; sin embargo, la falta de adherencia entre las fibras y la superficie del muro donde fue adherido solo permitió que se desarrolle cerca del 30% y 40% de su capacidad a tracción.

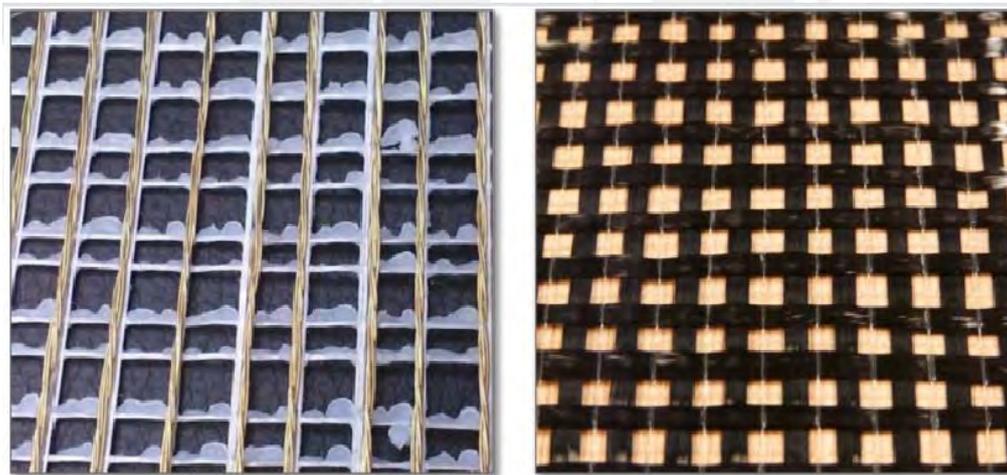
Así como se realizaron estos intentos de refuerzos con polímeros (FRP) en el exterior, en la localidad también se registraron estudios satisfactorios con resultados similares usando polímeros de carbono en Perú y Chile (Coronel y San Bartolomé, 2009; Torrealva, 2005; Acaíno y Santa María, 2008). El uso de materiales compuestos, basados en fibras de vidrio, carbono o aramida, en el refuerzo estructural de edificaciones de albañilería empezó a tomar fuerza en los últimos veinte años y está remplazando gradualmente las técnicas tradicionales de reforzamiento con acero y concreto armado debido a sus propiedades competitivas en tanto a la resistencia a tracción, densidad, durabilidad, comportamiento a la fatiga y propiedades no corrosivas (Gattesco y Boem, 2017).

La idea de usar un compuesto de una malla de alta resistencia y una matriz de mortero data del final de los años 1840s, en el origen del concreto armado. Josef-Louis Lambot propuso el uso de cables de hierro embebidos en mortero para la construcción de botes, tanques de agua, etc. Un siglo después, Pier Luigi Nervi empleó el patentado ferrocemento, un tipo de mortero reforzado que consistía en yeso de cemento aplicado en una o más capas de una malla de acero delgada para construir cascarones estructurales en techos o para tanques de agua. Recientemente, una tecnología similar conocida como TRC (Textile Reinforced concrete) fue desarrollada. Los sistemas TRC usan el vidrio resistente al álcali, carbón y aramida combinada con cemento de alta calidad finamente gradado. Gracias a su alta resistencia a compresión y tracción son muy útiles al construir estructuras delgadas tales como encofrados permanentes, fachadas y puentes peatonales (Santis, Giulia y Felice, 2015).

El uso de mortero reforzado con fibras, Fiber Reinforced Mortar (FRM), según sus siglas en inglés, o el mortero reforzado con textiles, Textile Reinforced Mortar (TRM), según sus siglas en inglés, es uno de los métodos más adecuados para la albañilería y solicitados en la última década. El uso de una matriz inorgánica en vez de una resina epóxica asegura

una mejor adhesión en superficies irregulares tales como la de la albañilería. Su uso provee una adecuada resistencia a temperaturas altas, protección ante los rayos UV e incluso disminuye el riesgo a la salud de los trabajadores causado por la volatilidad de los componentes tóxicos de la resina. Esto los convierte en un sistema efectivo, práctico y rentable como alternativa de solución para el reforzamiento y reparación sísmica de estructuras (Santis, Giulia y Felice, 2015). Además, su ratio entre alta resistencia- peso ha significado un fuerte incremento en la capacidad estructural con un mínimo incremento de masa (Santis y Felice, 2015).

Después de la difusión de los polímeros reforzados con fibras (FRP), los materiales basados en compuestos de mortero se empezaron a desarrollar rápidamente, lo cual ha desembocado en el empleo de fibras continuas en forma de mallas, conocidos como textiles de alta resistencia externamente adherida con cemento o mortero de cal. Estos sistemas son conocidos como los mencionados morteros reforzados con textiles (TRM). En la figura 2-8 se pueden apreciar dos de estos textiles.



**Figura 2-8. Tejidos de acero trefilado (izquierda) y de carbono (Pérez, Marco, 2014)**

Numerosos materiales textiles pueden ser usados, tales como el carbón, vidrio, acero, basalto PBO y fibras naturales. Particularmente los refuerzos basados en acero proveen un buen comportamiento mecánico gracias a los altos esfuerzos de tracción que se soportan y la buena interacción entre la malla y la superficie. Los textiles de acero están constituidos por micro fibras de acero de alta resistencia a tracción (UHTSS, por sus

siglas en inglés) que fueron inicialmente pensadas para el reforzamiento de neumáticos para vehículos. La primera aplicación en la ingeniería de esos elementos fue en el reforzamiento de vigas a esfuerzos de flexión tomando el nombre de Steel Reinforced Grout (SRG). Esta ha sido también usada en reforzamiento de vigas de concreto, arcos de albañilería y muros. (Santis, Giulia y Felice, 2015).

La fibra de acero forma parte también de la gama de opciones que se manejan actualmente para el refuerzo de estructuras de albañilería. En el año 2012, Flores, Pacheco y Carrillo construyeron, ensayaron, reforzaron y volvieron a ensayar 02 muros de albañilería confinada. Los refuerzos utilizados fueron fibras de acero con recubrimiento de mortero y mallas soldadas de fibra de acero.

Por otro lado, los polímeros reforzados con fibra de basalto son considerados alternativas viables a las fibras de carbono, vidrio y aramida, cuyo uso radica en el reforzamiento de estructuras de concreto armado (Patnaik, Puli, Mylavarapu, 2004). Este tipo de refuerzo se define como una técnica que abarca desde los aspectos más convencionales en cuanto a modo de refuerzo, y modernas respecto al tipo de material y su composición. Una de las ventajas de usar la fibra de basalto es su bajo costo comparado con fibra de carbono o sílice, resistencia al fuego y gran resistencia a la tensión (2000-4000MPa), alta resistencia a los ácidos y a los ambientes alcalinos, naturaleza inerte, resistencia a la corrosión y a la radiación por emisión de rayos UV. (Papanicolaou, Triantafillou, Lekka, 2010).

### **2.7.1 ENSAYOS DE YACILA Y SALSAVILCA CON STEEL REINFORCED GROUT (2019)**

En la Pontificia Universidad Católica del Perú se realizaron ensayos con el sistema TRM con fibras de acero galvanizado, conocido como Steel Reinforced Grout (SRG) por L. Yacila, J. Salsavilca, N. Tarque y G. Camata (2019). La investigación se basó en las investigaciones previas de Manchego, J. (2016) y Lujan, M. (2016) en la que se habían ensayado nueve muros, con diferentes solicitaciones de carga axial, de albañilería confinada con ladrillos King Kong con menos del 60% de área neta. Tres de estos muros fueron llevados hasta el límite máximo reparable de deriva permitido por la norma E.070 que es 0.005 (0.125%). Otros tres, fueron llevados hasta el colapso con una deriva de

0.833% y los tres restantes fueron ensayados con una carga de 170 kN y llevados hasta el colapso (0.625%).

De estos nueve especímenes, se escogieron tres para ser reparados y posteriormente reforzados con fibras de alta resistencia de acero galvanizado en el sistema conocido como SRG. Se utilizaron criterios de reforzamiento del código peruano en el que se optó por utilizar bandas de 1 cm de espesor y 10 cm de ancho, recomendación del CNR-DT. El mortero utilizado tenía como componentes principales materiales naturales, inertes y reciclados con baja emisión de CO<sub>2</sub> con cal como material base. Esta matriz de mortero natural basado en cal cumplía con la resistencia M15 acorde al EN 998-2 y como R1 según el EN 1504-3.

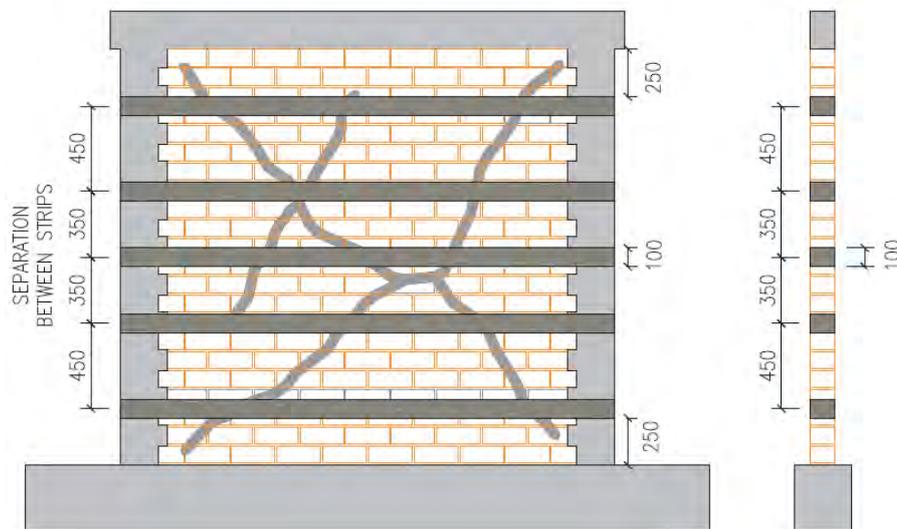


Figura 2-9. Muro típico reforzado y reparado por Yacila et al. (2019).

En la figura 2-9 se puede apreciar el arreglo típico de los muros reparados y posteriormente ensayados. El sistema de reforzamiento SRG se basó en una capa de mortero de 5 mm de espesor, la aplicación de la banda de acero galvanizado de 100 mm de ancho y la aplicación de otra capa superior de mortero de 5mm de espesor para recubrir la malla. Los ensayos se realizaron a carga lateral cíclica con control de desplazamientos. La velocidad de ensayo fue de 0.25 ciclos/minuto con un desplazamiento lateral máximo logrado de 30 cm.

La primera grieta diagonal en el primer muro (RW-01) se obtuvo en una deriva de 0.23%. Debido a que se aumentó el desplazamiento lateral máximo a 30 cm se abrieron las grietas reparadas y se mostraron nuevos patrones de fisuración. En este muro, se pudo observar cómo dos bandas de fibra de acero galvanizado fueron llevados hasta la rotura, lo que demuestra que se desarrolló el total de su resistencia. Por otro lado, los muros RW-02 y RW-03 mostraron su primera grieta diagonal en las derivas de 0.83% y 0,45% respectivamente. En estos dos últimos no se produjo la rotura de las fibras lo cual indica que estas tuvieron más resistencia de la estimada. En cuanto a la ductilidad, en la figura 2-10 se puede apreciar como el muro RW-01 pudo desarrollar un aumento del 100% en los desplazamientos laterales y los muros RW-02 y RW-03 desarrollaron un incremento de desplazamiento con un valor mínimo de 50%. Esto es un indicio de cómo las propiedades sísmicas de muros portantes se ven incrementadas gracias al refuerzo propuesto y alienta a la posterior investigación de estos sistemas.

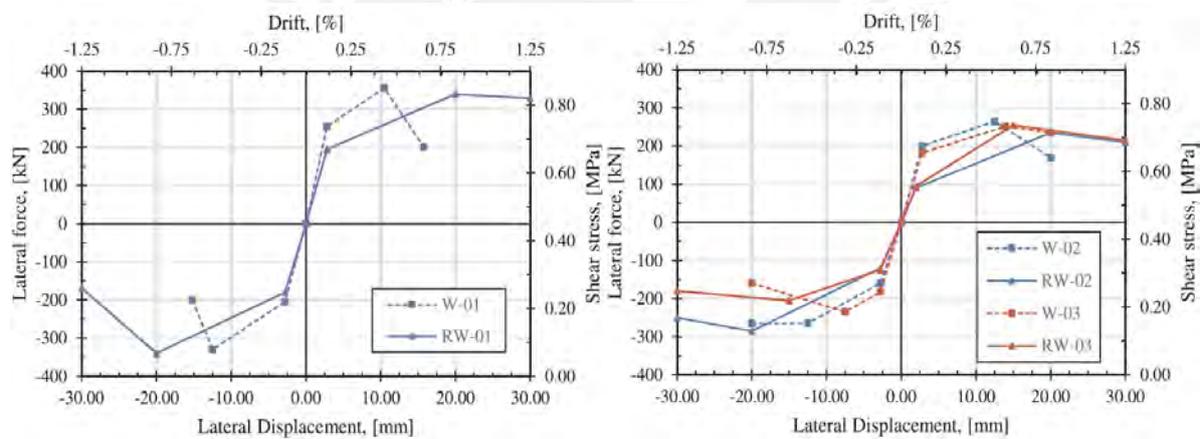


Figura 2-10. Resultados de ensayos en muros reforzados con SRG de Yacila et al, (2019).

## 3 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se exponen las etapas por las que atraviesa la investigación. Se explica de manera breve los tipos de ensayos que se realizarán a los prismas de albañilería reforzados, con la respectiva norma técnica peruana empleada. Además, se plantea una cantidad de ensayos para cada uno de los refuerzos.

### 3.1 ETAPAS DEL PROYECTO

El estudio se inicia con el control de calidad de los materiales utilizados y revisión de la bibliografía de otras investigaciones en las que se han usado los mismos materiales o similares, a través de los ensayos especificados en la Norma Técnica Peruana, determinados por la norma E.070, para conocer las propiedades mecánicas y físicas de estos. Los materiales que se utilizan son los siguientes:

**Ladrillo Pandereta:** Se utilizará un ladrillo de marca conocida para la zona de estudio; los valores obtenidos de los ensayos ejecutados serán asociados a las propiedades de la unidad especificada en su respectiva ficha técnica y ensayos de investigaciones anteriores.

**Malla Electrosoldada:** Se utilizará una malla electrosoldada tipo QE-106 de marca PRODAC cuya cocada es de 150 mm x 150 mm; no se ejecutarán ensayos sobre la misma, ya que se cuentan con las especificaciones técnicas de la malla, las cuales fueron brindadas por el proveedor al momento de la adquisición.

**Malla de Fibra de Basalto:** Se utilizará la malla Geo Steel Grid 200 de la marca Kerakoll. Esta malla cuenta con su respectiva ficha técnica y resultados de investigaciones anteriores por lo que no se realizarán ensayos de caracterización.

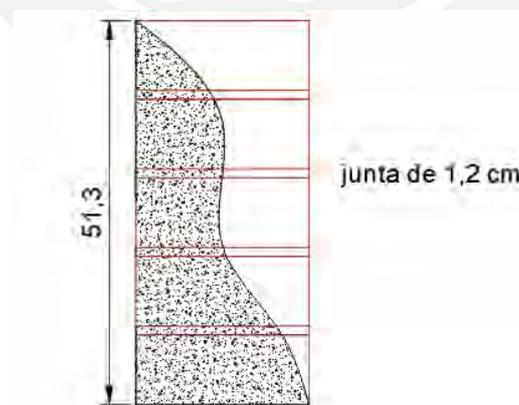
**Malla de Fibra de Acero Galvanizado:** Se utilizará la malla Geo Steel G600 de la marca Kerakoll en bandas de 100 mm de ancho, según recomendaciones de ensayos anteriores con el mismo material (Yacila y Salsavilca, 2019).

**Mortero:** El mortero a utilizar será sometido a un control de resistencia, los cuales se realizarán a muestras cúbicas de 50 mm de lado según las especificaciones americanas del ASTM C109/C109M-16a.

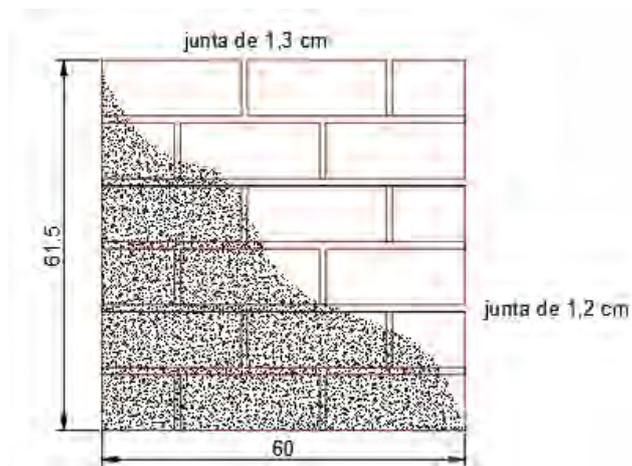
Se procede luego a la construcción de las pilas y muretes, los cuales se ensayarán a compresión simple y compresión diagonal respectivamente, para poder calcular la resistencia a compresión ( $f'm$ ) y resistencia al corte ( $v'm$ ).

De manera referencial se ensayarán tres (03) pilas y tres (03) muretes sin refuerzo alguno para obtener parámetros a condiciones normales, cuyos resultados serán comparados con investigaciones anteriores a fin de obtener valores de resistencia cada vez más fiables. Además, se procederá a construir y ensayar seis (06) pilas y nueve (09) muretes que serán reforzadas con mallas de acero electrosoldadas de 4.5mm de diámetro y cocada de 150 mm, bandas de fibra de acero de 100 mm de ancho y mallas de fibra de basalto, de manera equitativa (03 cada uno).

Las pilas consisten en el apilamiento de 5 unidades de ladrillo pandereta (ver Figura 3-1). Los muretes serán de sección cuadrada de dimensiones 600 mm x 600 mm (ver Figura 3-2). Una vez construidos, serán almacenados a una temperatura no menor a los 10°C durante 28 días para luego ser reforzadas y posteriormente ensayadas.



**Figura 3-1. Pilas de albañilería a ser reforzada**



**Figura 3-2. Murete de albañilería a ser reforzada**

Previo ensayo, se verificará la colocación del capping compuesto de yeso-cemento sobre las zonas de los muretes que estén en contacto con la máquina de ensayo, para evitar, en la medida de lo posible, la presencia de fallas locales que conlleven a distorsión de resultados. Previos investigadores recomendaron que la longitud del capping sea mayor a la del instrumento de aplicación de carga. En el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) la longitud de la superficie de contacto con los muretes es de 100 mm. Por esta razón, se propone que la longitud del capping sea de 150 mm a más.

La principal fuente de error en ensayos anteriores, y por la que se originó una falla local en los puntos de aplicación de carga, fue el relleno de las esquinas con mortero. En investigaciones anteriores se usó un relleno de profundidad de 100 mm. Para asegurar que no ocurra una falla local, se propone rellenar las esquinas con 200 mm de profundidad con mortero de una relación 1:3 de arena y cemento. Con estas dos consideraciones se espera que la falla local no se presente y así poder apreciar el aporte del refuerzo en la resistencia en los prismas a ensayar.

Durante la ejecución del ensayo, se mide la resistencia al corte y resistencia a la compresión simple. Posteriormente, se calculan los módulos de corte y módulo de elasticidad del conjunto albañilería-refuerzo. Para los módulos de elasticidad y corte se colocarán instrumentos de medición de deformaciones (LVDT's) en la zona central de los prismas a ensayar para así medir las deformaciones locales. Con las deformaciones

locales y la fuerza aplicada en estos instantes se puede calcular la relación de esfuerzos y deformaciones unitarias y encontrar el módulo de elasticidad en el caso de las pilas, y el módulo de corte para los muretes.

## 3.2 TÉCNICAS DE ENSAYO

Los ensayos serán ejecutados sobre los prismas contruidos, para ambos casos, con y sin refuerzo. De este modo, se podrá calcular los valores de compresión axial y resistencia característica a corte utilizando en los cálculos la carga máxima de rotura y las áreas brutas (transversal o diagonal) de los prismas. Asimismo, se deberá tomar en cuenta las desviaciones estándar obtenidas a partir de las muestras ensayadas para el cálculo de ambos parámetros, las cuales deben ser restadas de los valores promedios de las muestras ensayadas, según lo dispuesto por la norma E.070.

### 3.2.1 COMPRESIÓN AXIAL

Este ensayo se ejecuta bajo los parámetros especificados por la norma técnica peruana NTP 399.613 y NTP 339.604. Fue efectuado sobre las pilas contruidas, reforzadas y sin refuerzo, a una velocidad uniforme. El tiempo de duración se estima en 3 - 4 minutos y se ejecuta controlando la velocidad de la carga, la cual será aproximadamente 50 kN/min, hasta que la pila llegue a la rotura. Para obtener los valores de la resistencia característica a compresión, el valor de la carga máxima "P" deberá ser dividido por el área de la sección transversal de las pilas.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$f'_m = f_m(\text{prom}) - \sigma \quad (2)$$

Donde:

$f_m$  = Resistencia a compresión axial

$f_m(\text{prom})$  = Promedio de los valores  $f_m$

$f'_m$  = Resistencia característica a compresión

P = Carga máxima axial en la pila

A= Área de la sección transversal al eje de aplicación de carga.

$\sigma$ = Desviación estándar de la muestra



Figura 3-3. Ensayo de compresión axial en pilas de albañilería. (Mamani, 2015).

### 3.2.2 COMPRESIÓN DIAGONAL

Este ensayo se ejecuta bajo los parámetros especificados por la norma técnica peruana NTP 399.621 y NTP 399.605. Fue efectuado sobre los muretes construidos, reforzados y sin refuerzo, a una velocidad uniforme de 10 kN/min. Se realizó después de 28 días de la construcción, en el caso de los muretes no reforzados y 28 días después del reforzamiento para los muretes reforzados. Las instrumentaciones utilizadas son dispositivos LVDT que se encargan de medir deformaciones en el eje donde han sido colocados. Como se ve en la figura 3-4, se colocan dos dispositivos LVDT, uno en cada diagonal principal del murete. Los valores obtenidos representan el acortamiento de la diagonal vertical y el estiramiento de la diagonal horizontal. Estos valores serán utilizados para calcular el módulo de corte de cada murete. Para obtener los valores de la resistencia característica a corte se aplicó una carga “P”, cuya magnitud irá incrementándose hasta que el murete llegue hasta su punto de rotura; la carga debe dividirse entre el área bruta de la diagonal cargada (Dt).

$$vm = \frac{P}{Dt} \quad (3)$$

$$v'm = vm(prom) - \sigma \quad (4)$$

Donde:

$v_m$ = Resistencia al corte diagonal

$v_m(\text{prom})$ = promedio de los valores de  $v_m$

$v'_m$ = Resistencia característica al corte diagonal

$P$ = Carga axial máxima sobre la diagonal del murete

$D_t$ = Área diagonal perpendicular al eje de aplicación de carga.

$\sigma$ = Desviación estándar de la muestra



Figura 3-4. Ensayo de compresión diagonal en murete de albañilería.

## 4 CONTROL DE MATERIALES

Los materiales utilizados en la presente investigación fueron de calidad industrial, proveídos por empresas comerciales cuyos productos son de uso común en la zona de estudio.

No todos los materiales fueron sometidos a ensayos para verificar sus propiedades mecánicas; por lo que se tomaron como referencia investigaciones ya realizadas a los materiales de las mismas características (tipo, marca) y, en la medida que estos superen los resultados presentados en las fichas técnicas entregadas por los proveedores, serán calificados como materiales competentes para la presente investigación. La revisión de literatura de los materiales no ensayados en la presente investigación son generalmente los ladrillos pandereta, para el resto de materiales se revisó a detalle la ficha técnica o se realizaron ensayos en el laboratorio. Los investigadores que emplearon los mismos materiales que en la presente investigación son Díaz y Cevallos (2018) en la variación dimensional, alabeo y absorción; Díaz y Cevallos (2018) y Hernández y Sotomayor (2018) en los ensayos de compresión simple de unidades tubulares de albañilería.

### 4.1 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA

La unidad que se utilizó para la presente investigación fue el ladrillo industrial tubular (ver figura 4-1), utilizada de manera amplia en el distrito de Los Olivos y San Martín de Porres. La marca del ladrillo fue Pirámide y fue escogido considerando que es una marca comercial en la ciudad de Lima, la accesibilidad que se tuvo para conseguirlas y la facilidad de transporte hacia el laboratorio.



Figura 4-1. Unidades de albañilería tubular

Como se mencionó anteriormente, se obtuvo información de las unidades adquiridas; sin embargo, no se llevaron a cabo pruebas con estos materiales, más bien, se decidió trabajar con información de investigadores anteriores sobre el mismo tipo de ladrillo y de la misma marca. A continuación, se muestran las características de las unidades según ficha técnica ofrecida por la misma empresa:

- Peso (kg): Mínimo – Máximo: 2.050-2.200
- Largo, Ancho, Alto (m): 23.0, 11.0, 9.3
- Absorción de agua (%): < 22%
- Área de Vacíos (%): 66-70
- Alabeo (mm): <4.0
- Densidad (gr/cm<sup>3</sup>): 1.90-2.00
- Eflorescencia: No presenta
- Resistencia a la flexo-tracción (kg/cm<sup>2</sup>): >40.0
- Resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>): 25 kg/cm<sup>2</sup>

Asimismo, Diaz y Cevallos (2018) llevaron a cabo ensayos de resistencia a la variación dimensional, resistencia a la compresión simple, alabeo y absorción a unidades de ladrillo tubular acanalado de la marca Pirámide, el mismo tipo y marca que los utilizados para la presente investigación. Se tomarán estos resultados como referencia y, a continuación, se detallarán los procedimientos que emplearon en su investigación y resultados de estos, los cuales servirán para la validación de la ficha técnica del producto y, en ese sentido, de las unidades utilizadas en la presente investigación.

#### **4.1.1 VARIACIÓN DIMENSIONAL**

Diaz y Cevallos (2018) determinaron la variación dimensional de la unidad de albañilería, según procedimiento indicado en la Norma Técnica Peruana 399.613 y 399.604. Se muestrearon diez (10) especímenes, cuyas dimensiones (largo, ancho, altura) fueron medidas, tal como se muestra en la Tabla 4.1. Tomadas las medidas, Diaz y Cevallos (2018) determinaron la variación (%) para cada una de las dimensiones de las unidades, como se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.1. Determinación de las dimensiones de las muestras de albañilería (Díaz y Cevallos, 2018).**

Espécimen	Largo (mm)					Ancho (mm)					Altura (mm)				
	L1	L2	L3	L4	Lo	A1	A2	A3	A4	Ao	H1	H2	H3	H4	Ho
<b>1</b>	231.0	230.9	230.2	231.1	230.8	112.7	112.5	112.8	112.7	112.6	94.1	94.4	94.5	94.3	94.3
<b>2</b>	230.8	230.8	227.9	228.8	229.5	111.5	112.0	111.6	111.8	111.7	93.0	93.1	93.5	93.9	93.3
<b>3</b>	230.8	230.7	227.9	227.7	229.2	112.3	112.1	111.3	111.2	111.7	94.1	93.0	93.5	93.4	93.5
<b>4</b>	230.6	231.1	230.0	229.3	230.2	112.0	112.1	112.3	111.9	112.0	94.0	94.3	94.0	94.6	94.2
<b>5</b>	230.5	230.1	231.0	230.9	230.6	111.4	111.5	111.6	110.6	111.2	93.0	93.0	93.3	93.2	93.1
<b>6</b>	229.0	228.1	229.1	230.0	229.0	112.9	112.2	112.5	112.9	112.6	94.1	94.6	94.8	94.2	94.4
<b>7</b>	227.0	226.2	226.0	227.1	226.5	111.2	111.1	111.1	111.2	111.1	93.1	93.8	92.8	93.5	93.3
<b>8</b>	231.8	230.3	228.8	229.2	230.0	115.6	110.1	111.5	111.8	112.2	91.7	92.1	91.7	91.4	91.7
<b>9</b>	225.4	225.7	225.3	224.1	225.1	109.2	110.7	109.0	110.0	109.7	90.2	90.7	91.5	93.2	91.4
<b>10</b>	226.0	224.5	224.5	227.4	226.4	109.9	109.8	190.6	108.4	109.4	93.3	93.4	93.0	92.6	93.0

**Tabla 4.2. Determinación de variación dimensional de unidades de albañilería (Díaz y Cevallos, 2018).**

Largo (mm)		Ancho (mm)		Altura (mm)	
<b>Suma</b>	2287.7	<b>Suma</b>	1114.6	<b>Suma</b>	932.4
<b>Lp</b>	228.7	<b>Ap</b>	111.4	<b>Hp</b>	932.0
<b>Le</b>	230.0	<b>Ae</b>	110.0	<b>He</b>	94.0
<b>V%</b>	0.53	<b>V%</b>	-1.33	<b>V%</b>	0.8

La norma E.070 clasifica el tipo de unidad en base a la variación dimensional máxima establecida para sus dimensiones mayores de 150 mm, hasta 150 mm y hasta 100 mm; en ese sentido, la clase de utilizada es LADRILLO V (ver tabla 4.3).

**Tabla 4.3. Clase de unidad de albañilería para fines estructurales, según variación dimensional (Norma Técnica E.070 Albañilería, 2006).**

CLASE	VARIACIÓN DE LA DIMENSIÓN (Máxima en porcentaje)		
	Hasta 100 mm	Hasta 150 mm	Más de 150 mm
<b>LADRILLO I</b>	± 8	± 6	±4
<b>LADRILLO II</b>	± 7	± 6	± 4
<b>LADRILLO III</b>	± 5	± 4	± 3
<b>LADRILLO IV</b>	± 4	± 3	± 2
<b>LADRILLO V</b>	± 3	± 2	± 1

## 4.1.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Se considera el parámetro más importante de la albañilería no solo porque de esta propiedad depende el desempeño estructural del sistema, sino que define el nivel de resistencia a la intemperie (Ramírez, 2001). En este caso, se tomarán como referencia los ensayos de resistencia a la compresión simple ejecutados por Díaz y Cevallos (2018) y Hernández y Sotomayor (2018), ya que sus investigaciones tratan el comportamiento del mismo tipo de ladrillo (pandereta tubular), del mismo proveedor (Pirámide).

### 4.1.2.1 DETERMINACIÓN DE $f_b$ POR DÍAZ Y CEVALLOS (2018)

Preparados y refrendados los cinco (05) especímenes, se ensayaron aplicando carga sobre la superficie de asentado; esta carga se aplicó hasta llegar a la mitad de la máxima carga esperada, para que la carga remanente sea aplicada a velocidad constante en un tiempo entre un minuto y dos minutos hasta llegar a la falla (ver figura 4-2) (Díaz y Cevallos, 2018). Se tomaron medidas el ancho, largo y altura, superior e inferior, de las unidades antes de ser ensayadas, de manera que se pueda calcular las resistencias últimas.

$$f_b = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

$f_b$ : Resistencia a la compresión del espécimen

P: Máxima carga, indicada por la máquina de ensayo

A: Promedio del área bruta de las superficies de contacto superior o inferior



Figura 4-2. Ensayo de compresión simple (Díaz y Cevallos 2018).

Asimismo, para determinar la resistencia a la compresión característica de la unidad se determinó la desviación estándar de los registros obtenidos de los ensayos.

A continuación, se mostrarán los resultados de resistencia a la compresión simple del ladrillo pandereta obtenidos por Díaz y Cevallos (ver Tabla 4.4).

**Tabla 4.4. Resultados de ensayo de compresión simple de unidades de albañilería (Díaz y Cevallos 2018).**

Especímen	Largo prom.	Ancho prom.	Carga Máxima	Área Bruta	fb
	(mm)	(mm)	(kN)	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)
1	229.3	114.3	159.6	26215	5.89
2	225.4	110.1	166.4	24828	6.70
3	226.5	110.7	163.0	25085	6.50
4	226.2	109.5	148.3	24774	6.00
5	229.0	112.2	179.3	25694	6.98

Se obtuvo a partir de estos resultados, la desviación estándar y así, la resistencia a la compresión característica, calculada mediante la siguiente fórmula:

$$f'b = fb(prom) - \sigma \quad (2)$$

Donde:

$f'b$  = Resistencia a la compresión característica

$fb(prom)$  = Promedio de la resistencia a compresión de los especímenes considerados

$\sigma$  = Desviación estándar

**Tabla 4.5. Resultados finales de ensayo de compresión simple.**

<b>fb (MPa)</b>	6.45
<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>	0.41
<b><math>f'b</math> (MPa)</b>	6.04

#### 4.1.2.2 DETERMINACIÓN DE $f'b$ POR HERNÁNDEZ Y SOTOMAYOR

Hernández y Sotomayor (2018), desarrollaron la investigación de la “Influencia del Período de Inmersión al Agua en la Resistencia a la compresión de Muros de Albañilería,

Construidos con Ladrillo Industrial y Artesanal”. Ellos utilizaron las mismas unidades que la presente investigación y llevaron a cabo ensayos de compresión simple para el control de sus unidades de albañilería. Este estudio se enfoca en cuatro tipos de unidades y la medida en que varían sus propiedades mecánicas al ser sometidas a ciertas condiciones desfavorables, en este caso, inmersión al agua debido a fenómenos naturales.

Al igual que los resultados presentados por Diaz y Cevallos (2018), se tomará como referencia los resultados de los ensayos de compresión simple en estado seco ejecutados a las unidades de ladrillo pandereta marca Pirámide. Asimismo, se considerará válida la referencia en la medida que los parámetros de resistencia que brinden los ensayos sean mayores a los indicados en la ficha técnica del proveedor.

Se inició tomando las medidas de las 3 dimensiones (largo, ancho y alto) de cinco (05) especímenes (P1, P2, P3, P4 Y P5, ver Tabla 4.6). Las muestras fueron secadas durante veinticuatro horas, a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Debido a que la prensa hidráulica en la cual se ensayaron las muestras no cubre toda el área de asiento, se cortaron y ensayaron la mitad de las unidades (ver figura 4-3), según lo dispuesto por la Norma Técnica Peruana 399.613. Luego, se calculó el área bruta del espécimen ensayado (ver tabla 4.7).

**Tabla 4.6. Dimensiones de ladrillos para ensayo a compresión (Hernández et al, 2018).**

Especímen	L1	L2	Largo prom.	A1	A2	Ancho prom.	H1	H2	Altura prom.
	(mm)			(mm)			(mm)		
<b>P1</b>	22.9	22.5	22.7	10.7	10.7	10.7	9.2	9.1	9.15
<b>P2</b>	22.4	22.5	23.0	11.1	10.9	11.0	9.2	9.1	9.15
<b>P3</b>	22.5	22.4	22.45	11.0	10.8	10.9	9.2	9.2	9.2
<b>P4</b>	22.2	22.7	22.45	10.9	10.9	10.9	9.2	9.3	9.3
<b>P5</b>	22.6	22.5	22.45	10.9	11	10.95	9.2	9.4	9.4



Figura 4-3. Ensayo de compresión simple (Hernández et al, 2018).

Tabla 4.7. Cálculo de área bruta de especímenes ensayados (Hernández et al, 2018).

Especímen	Largo prom.	Ancho prom.	Área bruta
	mm	mm	mm <sup>2</sup>
P1	120.0	130.5	15660
P2	121.0	130.0	15730
P3	122.5	130.5	15986
P4	122.0	130.5	15921
P5	118.5	130.0	15405

El ensayo fue ejecutado utilizando una prensa hidráulica con capacidad de 1200 kN de carga; no se dio detalles de la velocidad de ensayo. Los resultados se muestran en la tabla 4.8. Este resultado nos indica que la resistencia a compresión simple del lote analizado es igual a **4.26 MPa**; este resultado cumple con los parámetros indicados en la ficha técnica, la cual señala que la resistencia a compresión simple es mayor a **2.45 MPa**; sin embargo, la norma E.070 establece un mínimo de  $f'b$  para que unidad sea considerada para fines estructurales: este valor es de **4.9 MPa**. Esto significa que el ladrillo perteneciente al lote analizado no podrá ser utilizado para la conformación de muros portantes.

Tabla 4.8. Resultados de ensayo de compresión simple (Hernández et al, 2018).

Especímen	Área bruta	Carga	$f'b$	$f'b$ prom.
	mm <sup>2</sup>	kN	MPa	MPa
P1	11717	49.2	4.2	4.3
P2	12293	26.0	2.1	
P3	12017	75.8	6.2	
P4	12099	49.1	4.0	
P5	12018	59.2	4.8	

Por otro lado, el lote analizado por Díaz y Cevallos (2018) dio una resistencia  $f'b$  igual a **6.04 MPa**, valor mucho mayor al indicado por la ficha técnica (**2.45 MPa**); asimismo, este valor se encuentra en el intervalo de ladrillo clase I y II. Esto da cabida a que las unidades del lote analizado por Díaz y Velezmoro pudieron haber sido utilizados para fines estructurales, sin embargo, la norma E.070 restringe su uso a zonas de baja sismicidad y no podrían ser usadas en la zona de la costa del Perú (alta sismicidad).

Para la presente investigación, en base a los resultados estudiados, se asumirá el lote como competente (es decir, que supera los valores mínimos de la ficha técnica) y se considerará que su uso está restringido para fines estructurales. En la tabla 4.9 se mostrará como referencia los valores requeridos por la norma de albañilería para que las unidades sean catalogadas como estructurales y puedan ser utilizadas para este fin.

**Tabla 4.9. Clasificación de unidades de albañilería para fines estructurales (Norma E.070, 2006).**

<b>CLASE DE UNIDA DE ALBAÑILERÍA PARA FINES ESTRUCTURALES</b>	
<b>CLASE</b>	<b><math>f'b</math> (kg/cm<sup>2</sup>) mínimo sobre área bruta</b>
<b>LADRILLO I</b>	50
<b>LADRILLO II</b>	70
<b>LADRILLO III</b>	95
<b>LADRILLO IV</b>	130
<b>LADRILLO V</b>	180

#### 4.1.4 ALABEO

Esta es una prueba clasificatoria de la unidad, al igual que lo son las de compresión simple y variación dimensional. Se determina si la unidad presenta una superficie cóncava o convexa. El mayor alabeo puede repercutir en el espesor de la junta, provocando que sea mayor que la debida; asimismo, en las zonas de superficie alabeadas, el área de contacto entre la unidad y el mortero tiende a disminuir debido a los vacíos generados y generar fallas de tracción por flexión. (San Bartolomé, et al, 2018)

En caso exista concavidad, para determinarla, se coloca una regla metálica de canto sobre la diagonal de la cara de asiento del ladrillo, y luego se introduce la cuña metálica en el punto correspondiente a la flecha máxima (ver Figura 4-4) para obtener la medida de la deformación (Villegas, 2008).



Figura 4-4. Colocación de cuña sobre punto de flecha máxima en unidad cóncava (Díaz y Cevallos, 2018).

Asimismo, si se da el caso que el espécimen presente convexidad, para determinarla, se colocará la regla de canto que conecte en sus diagonales opuestas sobre la superficie de asiento de la unidad y se insertará la cuña graduada en los vértices de sus aristas opuestas y se ajustará la regla de manera que se obtengan medidas iguales (ver figura 4-5).

Díaz y Cevallos (2018), sobre una superficie plana, llevaron a cabo el muestro de 10 especímenes. Se tomaron las medidas correspondientes a las dos diagonales de las caras inferior y superior tomando las consideraciones mencionadas anteriormente. Los resultados se muestran en la Tabla 4.10.

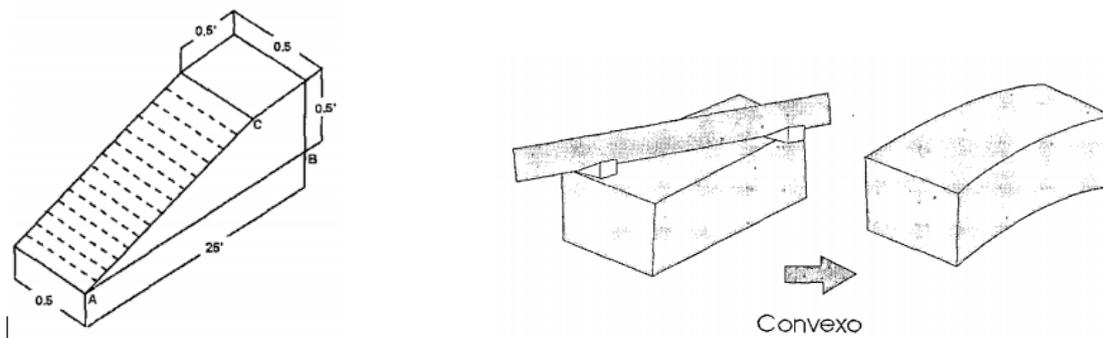


Figura 4-5. Cuña graduada y ensayo de alabeo por convexidad (Villegas, 2008).

Tabla 4.10. Determinación del alabeo (Díaz y Cevallos, 2018).

Especímen	Cara Superior				Cara Inferior				Prom. Cóncavo	Prom. Convexo
	Cóncavo		Convexo		Cóncavo		Convexo			
1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.0	0.375	0.250
2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.250	0.125
3	0.0	0.0	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.375	0.500
4	0.0	0.0	0.5	1.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.750	0.375
5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.125	0.250
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000
7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.125	0.375
8	1.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.550	0.500
9	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.125
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.000	0.375

Tabla 4.11. Promedio de concavidad y convexidad (Díaz y Cevallos, 2018).

	Promedio cóncavo	Promedio convexo
Promedio (mm)	0.255	0.287
Promedio final (mm)	0.271	

Tal como se observa en la tabla anterior, el promedio de los valores de alabeo por convexidad y concavidad fueron menores a 2 mm. Este resultado nos permite nuevamente clasificar las unidades utilizadas según la tabla 4.12, propuesta por la norma E.070.

Tabla 4.12. Clasificación de unidad tubular mediante ensayo de alabeo (Díaz y Cevallos, 2018).

Clase de Unidad de Albañilería para fines estructurales	
CLASE	Alabeo
LADRILLO I	10
LADRILLO II	8
LADRILLO III	6
LADRILLO IV	4
LADRILLO V	2

#### 4.1.5 ABSORCIÓN

El ensayo de absorción es una medida de la permeabilidad de la unidad de albañilería (Aguirre, 2004). Díaz y Cevallos (2018) llevaron cabo los ensayos de absorción ensayando cinco (05) unidades, según lo estipulado por la Norma Técnica Peruana 399.613. Se colocó las muestras en un horno a una temperatura de 112°C durante 24 horas (Fig. 4-6), para luego ser enfriados a temperatura ambiente; se pesó (peso seco) y luego se sumergieron los ladrillos durante 24 horas en agua para obtener, así, el peso saturado. Se muestra a continuación (ver tabla 4.13) los resultados obtenidos por Díaz y Cevallos (2018).

La norma E.070 establece un límite máximo de absorción igual al **22%**, por lo que el lote analizado por Díaz y Cevallos (2018) cumple con lo estipulado por la normativa, al ser la absorción promedio igual al **10.9%**.



Figura 4-6. Ensayo de absorción (Díaz y Cevallos, 2018).

**Tabla 4.13. Resultados obtenidos de ensayo de absorción.**

<b>Espécimen</b>	<b>Wd (gr)</b>	<b>Ws (gr)</b>	<b>Absorción (%)</b>
<b>1</b>	2098.8	2340.1	11.50
<b>2</b>	2164.8	2417.4	11.67
<b>3</b>	2156.8	1382.0	10.44
<b>4</b>	2216.1	2467.5	11.34
<b>5</b>	2216.0	2425.2	9.44
		<b>Promedio</b>	<b>10.9</b>

## **4.2 MORTERO**

En la investigación se han usado dos tipos de mortero. Para la construcción de muros se utilizó un mortero preparado para el asentado; el mortero utilizado fue de la marca TOPEX. Se realizaron ensayos a tres cubos de mortero de 50 mm de lado para verificar la información brindada por la ficha técnica del fabricante. Para los revoques de las unidades sin refuerzo y con malla electrosoldada se utilizó un mortero similar de la misma marca, pero con una dosificación diferente (1:4 de cemento-arena).

### **4.2.1 MORTERO PARA REVOQUES**

Se tuvo en consideración el uso del mortero GeoCalce Antisísmico (ver figura 4-7). Este es un geomortero ideal para ser utilizado en conjunto con los refuerzos planteados en la presente investigación y su buen comportamiento con la albañilería en sí. Sus propiedades mecánicas (ver tabla 4.14) la convierten en mejor opción con respecto a otros morteros. Asimismo, está compuesto por elementos naturales cuya huella de carbono es baja con respecto a la que implica la fabricación de otros productos en el mercado. Sin embargo, debido a que este producto es de origen italiano, no está disponible en el mercado local. Además, el laboratorio no contaba con el material suficiente y en las condiciones óptimas para su empleo. Por estas razones se opta por realizar una dosificación de cemento, cal y arena para realizar el debido reforzamiento.



Figura 4-7. GeoCalce Antisísmico.

Tabla 4.14. Propiedades mecánicas del GeoCalce Antisísmico (Ficha Técnica Geocalce Antisísmico).

GeoCalce Antisísmico		
Esfuerzo a tracción	MPa	>5
Resistencia a Compresión	MPa	>15
Adhesión	MPa	>0.8
Adhesión sobre ladrillo	MPa	>1
Módulo de elasticidad a compresión	GPa	>9

Para la preparación del mortero de cal y cemento se utilizó la cal hidráulica Comacsa y cementos Sol tipo 1. Se escogieron estos materiales debido a la trayectoria de dichas marcas a lo largo de los años. Se muestra en la figura 4-8 los materiales utilizados para dicha mezcla de mortero.



Figura 4-8. Cal Comacsa y Cemento Sol.

El mortero finalmente utilizado fue elaborado a base de cemento, cal y arena, (1:1:4). Este mortero fue sujeto a comparación con los parámetros mecánicos del GeoCalce Antisísmico disponible en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas y los valores mostrados en la ficha técnica.

Para llevar a cabo esta comparación, se ejecutaron ensayos de compresión simple de 3 cubos de mortero de 50 mm x 50 mm x 50 mm por cada tipo de mortero analizado.

Los cubos de mortero fueron colocados en un molde lubricado, el cual fue cubierto hasta aproximadamente la mitad de los moldes; con ayuda de un pisón y en un total de 32 golpes, se fue apisonando cada espécimen, asegurando recorrer toda el área de llenado y lograr uniformidad en la mezcla; luego, en un segundo ciclo, se terminó de llenar el volumen del molde y repitió el ciclo de 32 golpes (ver figura 4-9). Este procedimiento fue realizado para ambos tipos de mortero. Una vez llenados los moldes, se dejó reposar 30 minutos para la exudación y se procedió a enrasar los especímenes (ver figura 4-10).



**Figura 4-9. Apisonado de especímenes.**



**Figura 4-10. Especímenes enrasados.**

Las muestras fueron curadas durante 7 días, luego de ese periodo, se desencofró el molde y fueron sometidos a ensayos de compresión simple a una velocidad de 30 kN/min hasta llegar a la falla (ver figuras 4-11 y 4-12).



**Figura 4-11. Probetas de mortero (arriba: Cemento-Cal; abajo: Kerakoll).**



**Figura 4-12. Falla trapecoidal de mortero C-2.**

Los resultados que se obtuvieron del ensayo de los 6 cubos de mortero ensayados fueron los que se muestran en la tabla 4.15. Las probetas K corresponden al mortero Kerakoll, mientras que las probetas C corresponden al mortero de cemento y cal. Así, se obtuvieron los esfuerzos de compresión máximos de las probetas prismáticas (ver tabla 4.16).

Se seleccionó el mortero a base de cal y cemento para ser usado como mortero de los refuerzos TRM de malla de fibra de basalto y bandas de fibra de acero. Por otro lado, se utilizará el mortero TOPEX – tarrajeo, para el revoque de los prismas sin refuerzo y reforzados con malla electrosoldada.

**Tabla 4.15. Resistencia a compresión de probetas prismáticas.**

Probeta N°	LARGO (mm)		ANCHO (mm)		ESPESOR (mm)		CARGA MÁXIMA (kN)
	L1	L2	A1	A2	E1	E2	
<b>K1</b>	51	51	50.85	50.9	50.55	50.65	9.03
<b>K2</b>	51.25	51.1	51.15	50.7	50.6	51.7	9.61
<b>K3</b>	51	51.1	50.9	50.9	50.7	51.1	9.46
<b>C1</b>	51.75	51.5	51	50.85	50.8	50.8	41.96
<b>C2</b>	51.4	51.35	50.9	50.75	50.8	50.8	41.24
<b>C3</b>	51.25	51.6	50.85	50.5	50.95	50.95	40.32

**Tabla 4.16. Esfuerzos promedio de muestras de mortero.**

Probeta N°	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Prom (MPa)	Desviación estándar (MPa)	f'c mortero (MPa)
<b>K1</b>	3.48	3.60	0.11	3.49
<b>K2</b>	3.69			
<b>K3</b>	3.64			
<b>C1</b>	15.96	15.74	0.25	15.49
<b>C2</b>	15.79			
<b>C3</b>	15.47			

#### **4.2.2 MORTERO PARA ASENTADO DE UNIDADES**

El mortero para el asentado de unidades de todos los especímenes a analizar fue el mortero preparado TOPEX (ver figura 4-13). Se eligió esta opción para poder tener una dosificación estándar para todos los prismas y valores comparables al momento de analizar resultados.



Figura 4-13. Mortero TOPEX empleado para el asentado.

De manera que se pueda validar las propiedades mecánicas del mortero con los datos brindados por el proveedor en la ficha técnica, se ejecutaron ensayos de compresión simple a 3 cubos de mortero de 50 mm de lado. En la tabla 4.17 se muestran los valores obtenidos del ensayo de compresión de los cubos de mortero. Posteriormente en la tabla 4.18 se calculan los esfuerzos promedios y se llega a un valor de  $f'_c$  del mortero a utilizar.

Tabla 4.17. Resistencia a compresión de probetas prismáticas de mortero.

Probeta N°	LARGO (mm)		ANCHO (mm)		ESPESOR (mm)		CARGA MÁXIMA (kN)
	L1	L2	A1	A2	E1	E2	
1	51	51	51	51	51	51	45.36
2	51	51	51	51	51	51	45.45
3	51	51	51	51	51	51	45.09

Tabla 4.18. Esfuerzos promedio y característico del mortero usado.

Probeta N°	ESFUERZO (MPa)	ESFUERZO PROMEDIO (MPa)	Desviación estándar (MPa)	$f'_c$ mortero (MPa)
1	17.43	17.41	0.07	17.34
2	17.47			
3	17.33			

### **4.3 MALLA ELECTROSOLDADA**

La malla electrosoldada PRODAC QE-106 fue utilizada como una de las alternativas de refuerzo. Estas mallas están conformadas por barras corrugadas laminadas en frío y nos brinda ventajas respecto al refuerzo convencional, como por ejemplo menor tiempo de instalación, adherencia efectiva al concreto debido a sus uniones sólidas y menor tiempo en la ejecución de las obras. Estas mallas fueron fabricadas según lo dispuesto por las normas ASTM A496 “Especificaciones estándar para el alambre corrugado utilizado como refuerzo en el concreto” y ASTM A497 “Especificaciones para la fabricación de mallas electrosoldadas corrugadas utilizado como refuerzo en el concreto”.

Las especificaciones técnicas del refuerzo a utilizar son las extraídas del catálogo técnico del producto y son las que se muestran a continuación:

- Medidas (m): 2.4x5.0
- Cocada (mm): 150x150
- Diámetro (mm): 4.5
- Peso malla (kg/m<sup>2</sup>): 1.66
- Resistencia a la rotura (MPa): 550
- Límite de Fluencia (MPa): 490

### **4.4 BANDA DE FIBRA DE ACERO GALVANIZADO**

La banda de fibra de acero galvanizado (recubierto con zinc) es un tejido de refuerzo desarrollado por la empresa Kerakoll cuya denominación es GeoSteel G600, utilizado en la presente investigación (ver figura 4-14).

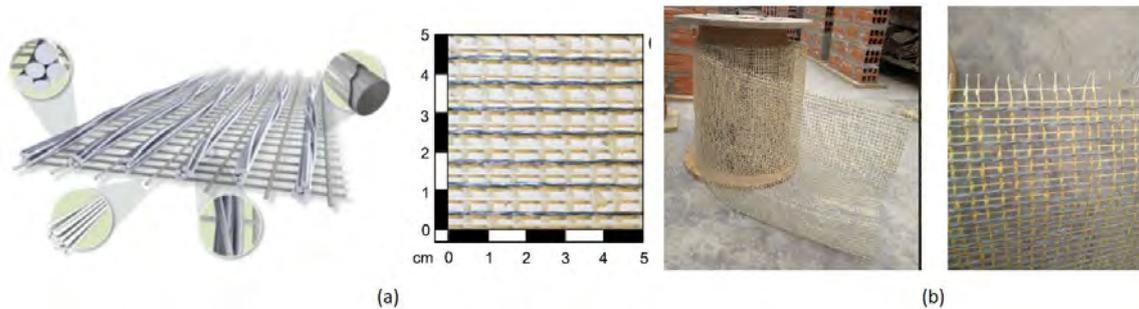


Figura 4-14. Textil de fibra de acero (a) (Santis et al., 2015) – Malla GeoSteel G600 (b).

De requerirse resultados fiables para el sistema de refuerzo, se recomienda su aplicación junto con el uso de mortero GeoCalce Kerakoll, cuyo procedimiento está establecido por el Manual Técnico “Directrices para la Consolidación, Refuerzo Estructural y Seguridad Sísmica con Nuevas Tecnologías Green”, elaborado en el 2018 (ver Figura 4-15). En la tabla 4.19 se muestran los valores obtenidos por la investigación de Yacila y Salsavilca (2019).



Figura 4-15. Aplicación de fibra de acero galvanizado con mortero GeoCalce (Manual Técnico, 2018).

Tabla 4.19, Propiedades de malla GeoSteel G600 (Salsavilca et al, 2019).

Materiales			
<b>Acero Galvanizado</b>	Esfuerzo a tracción	MPa	3000
	Módulo de Elasticidad	MPa	190000
	Deformación última	%	2.44
	Densidad de fibras	cord/mm	0.157
	Espaciamiento de fibras	mm	6.35
	Espesor equivalente	mm	0.084

<b>Mortero Geocalce</b>	Esfuerzo a compresión	MPa	22
	Esfuerzo a tracción	MPa	2.9
	Módulo de elasticidad	GPa	9.1
<b>Sistema TRM</b>	Esfuerzo a tracción	MPa	>3060
	Módulo de elasticidad	MPa	>15600

## 4.5 MALLA DE FIBRA DE BASALTO

La malla de fibra de basalto es un refuerzo de FRP (Fiber Reinforced Polymer); la que se utilizó en la presente investigación es conocida como GeoSteel Grid 200, de la marca Kerakoll.

La empresa proveedora de la malla cuenta con datos técnicos de calidad propia, en la cual se brindan datos como el aspecto, naturaleza del material (basalto y acero Inoxidable 304), el largo, ancho del rollo y ancho de malla, entre otras características del producto adquirido; sin embargo, también nos muestra sus propiedades mecánicas, las cuales se muestran a continuación:

**Tabla 4.20. Propiedades mecánicas de malla de fibra de basalto.**

<b>Materiales</b>			
<b>Fibra de Basalto</b>	Esfuerzo a tracción	MPa	>3000
	Módulo de Elasticidad	MPa	>87000
<b>Acero Inox. AISI 304</b>	Esfuerzo a tracción	MPa	>750
	Módulo de elasticidad	MPa	>200000
<b>Datos de la Malla</b>	Esfuerzo a tracción	MPa	>1700
	Módulo de elasticidad	MPa	>70000
	Deformación última	%	1.9

Al igual que la malla de fibra de acero (ver Figura 4-16), esta malla forma parte de un sistema de refuerzo estructural en conjunto con el mortero GeoCalce de Kerakoll, cuya implementación es recomendada si se quiere alcanzar las propiedades e igualar o mejorar el comportamiento descrito en el Manual Técnico “Directrices para la Consolidación, Refuerzo Estructural y Seguridad Sísmica con Nuevas Tecnologías Green,”, elaborado el año 2018.



**Figura 4-16. Malla de fibra de basalto**

Para finalizar, se presenta en la tabla 4.21 los materiales adquiridos y las respectivas cantidades a ser empleadas en el trabajo de investigación. Cabe resaltar que la malla electrosoldada PRODAC fue una donación de la fábrica para la investigación y las mallas GeoGrid pertenecen al laboratorio de estructuras de la PUCP.

**Tabla 4.21. Materiales adquiridos en la investigación**

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Ladrillo pandereta	un.	500
Mortero TOPEX	bolsa	4
Mortero tarrajeo TOPEX	bolsa	2
Cal Comacsa	bolsa	2
Cemento Sol tipo I	bolsa	2
Arena fina (30 kg)	bolsa	2
Malla electrosoldada	un.	1
Malla GeoSteel Grid 200	un.	1
Malla GeoSteel Grid G600	un.	1

## **5 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS A ENSAYAR**

Este capítulo abarca los procedimientos y consideraciones tomadas para la construcción de pilas y muretes de ladrillo pandereta. Estos especímenes son pequeños y fueron ubicados en áreas libres para la facilidad de movimiento durante su construcción; asimismo, las unidades tubulares adquiridas fueron transportadas a la zona de construcción, junto con el mortero embolsado (TOPEX), la cal hidráulica y el cemento de manera que esté al alcance del albañil.

### **5.1 PILAS**

#### **5.1.1 PROCESO CONSTRUCTIVO DE PILAS**

Como parte de la construcción de primas de albañilería, para evaluar la capacidad estructural de las unidades con las que se componen las estructuras de la zona de estudio, se procedió a construir un total de nueve (09) pilas, los cuales serán sometidos a ensayos de compresión axial, haciendo uso de los materiales mencionados en el capítulo anterior. De este modo, se podrá determinar el módulo de elasticidad de los sistemas estructurales de albañilería reforzada y su resistencia a compresión.

El número de ladrillos apilados (5), la altura del ladrillo (93 mm), el espesor de ladrillo (125 mm) y el espesor promedio de las juntas (12 mm) permiten conservar una esbeltez (altura/espesor) comprendida entre 4 y 5 (4.66), valor representativo del comportamiento de la albañilería a compresión (San Bartolomé et al, 2018).

El asentado de las unidades fue con el mortero en bolsa de la marca TOPEX, cuya relación cemento – arena fue de 1:3, mientras que la cantidad de agua fue regulada de manera que la mezcla sea trabajable (ver figura 5-1).

Sobre una superficie nivelada, y haciendo uso de un escantillón y un nivel de burbuja, se procuró mantener la verticalidad y horizontalidad de las pilas; se procuró, además, mantener el espesor de las juntas horizontales en el intervalo de 10 mm – 15 mm (se tomó



**Figura 5-1. Mortero de para asentado de ladrillo de pila.**

en promedio 120 mm de junta), especificado por la Norma E.070 (ver figura 5-2). Este procedimiento se dio bajo las mismas condiciones para las 06 pilas a ensayar.



**Figura 5-2. Mortero de para asentado de ladrillo de pila.**

Finalmente, levantadas las 9 pilas, se esperó 28 días para que estas puedan ser reforzadas, proceso que será explicado más adelante.

### **5.1.2 REFORZAMIENTO DE PILAS CON MALLA ELECTROSOLDADA**

Una vez construidas las pilas, luego de 28 días, se procedió con el refuerzo con mallas electrosoldadas (ver figura 5-3). Se realizaron perforaciones para un correcto anclaje de las mallas y la pila construida. Se empleó mortero de tarrajeo TOPEX de una relación de cemento arena 1:4 y agua necesaria para una correcta trabajabilidad.



**Figura 5-3. Pila reforzada con malla electrosoldada.**

### **5.1.3 REFORZAMIENTO DE PILAS CON TRM DE FIBRA DE BASALTO**

El reforzamiento de las pilas con TRM de malla de fibra de basalto se realizó con el mortero ensayado que dio mejores resultados a compresión. La dosificación de cemento, cal y arena en proporciones 1:1:4 fue la empleada para este procedimiento. Se realizó la mezcla y se aplicó una capa delgada a la superficie libre de polvo y preparada para el reforzamiento. Una vez aplicado el mortero, la malla, ya cortada a las dimensiones requeridas, fue colocada y presionada para que el mortero pueda pasar las aberturas y desarrollar una mejor adherencia en toda la superficie. La malla fue traslapada 200 mm desde el vértice donde nace el traslape. Una segunda capa fue colocada y frotachada para dar término al procedimiento. La figura 5-4 muestra el procedimiento intermedio anteriormente mencionado



**Figura 5-4. Primera capa de mortero en malla de fibra de basalto.**

## **5.2 CONSTRUCCIÓN DE MURETES**

### **5.2.1 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE MURETES**

Bajo las mismas condiciones que se construyen las pilas, (tipo de unidad, mortero, mano de obra, entorno) se construyeron los doce (12) muretes a reforzarse en la presente investigación. Se utilizaron tablas de madera tornillo para el apoyo de los muretes con el fin de mantener la superficie del laboratorio limpia y poder desplazarlas hacia las máquinas de ensayo con mayor facilidad. Las dimensiones de los muretes fueron de aproximadamente 600 mm x 600 mm; las unidades fueron sumergidas en agua durante pocos segundos antes de proceder con la colocación de mortero.

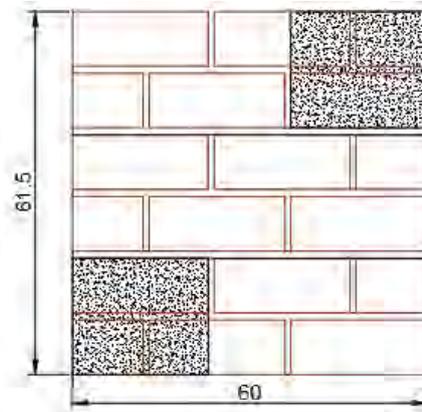
Se procedió al corte de las unidades y se colocó la primera hilada sobre las tablas de apoyo, dejando aberturas de aproximadamente 13 mm para introducir el mortero correspondiente a las juntas verticales.

En la tesis de Díaz y Cevallos (2017), en los ensayos ejecutados de compresión diagonal, como parte de su investigación de reforzamiento estructural de muros de ladrillo pandereta con mallas para tarrajeo y electrosoldada, los especímenes presentaron en las zonas de aplicación de la carga: fallas locales, a pesar de que las unidades que se encuentran en esta fueron rellenas con mortero aproximadamente a la mitad de sus longitudes (100 mm).

Por lo mencionado, en la presente investigación, se procuró rellenar las unidades ubicadas en esquinas opuestas donde se aplica la carga sobre el murete en toda su longitud (200 mm), así como las correspondientes a la hilada siguiente (ver figura 5-5), de manera que su aplicación sirva de refuerzo en esa zona, y se logre que el murete y su refuerzo trabajen de manera adecuada (produciendo la falla de tracción diagonal en la albañilería).

Luego, para el asentado de la segunda hilada, se colocó el mortero sobre la primera y se asentaron las unidades, verificando con el nivel de burbuja la horizontalidad. Asimismo, se respetó el espesor promedio de las juntas horizontales y se controló la dimensión y verticalidad con ayuda del escantillón. (ver figura 5-6).

De este modo, se finalizó con la construcción de los seis (06) muretes. El reforzamiento se dio 28 días después de construido, para posteriormente ser ensayados y evaluados (ver figura 5-7).



**Figura 5-5. Murete con esquinas reforzadas con mortero (dimensiones en cm).**



**Figura 5-6. Construcción de segunda hilada de murete.**



**Figura 5-7. Muretes de albañilería confinada a ser reforzados.**

### **5.2.2 REFORZAMIENTO DE MURETES CON MALLA ELECTROSOLDADA**

Los muretes fueron reforzados luego de 28 días de su construcción. El procedimiento de refuerzo se llevó a cabo, en primer lugar, delimitando los puntos sobre los cuales se perforaría el mortero para amarrar las mallas electrosoldadas (M.E.) (ver figura 5-7).



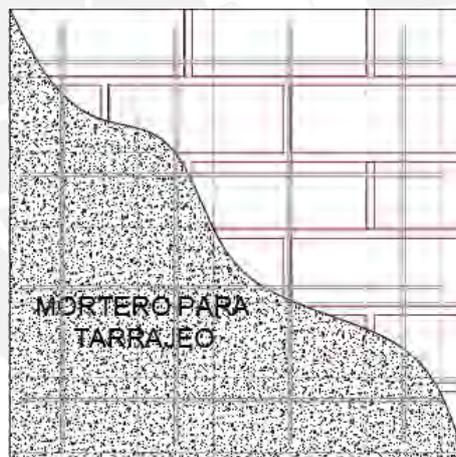
**Figura 5-8. Puntos a perforar en murete para refuerzo con M.E.**

Con ayuda de un taladro, se perforó el murete en las zonas de mortero, de este modo, se conservó la integridad del ladrillo (ver figura 5-8), luego, se insertó un alambre N°16 que sobresalga en ambos lados para amarrar el refuerzo y sujetarlo al murete.



**Figura 5-9. Murete reforzado con malla electrosoldada.**

Finalmente, el refuerzo fue concluido con el tarrajeo total de la superficie del murete en ambos lados (ver figura 5-9). El espesor del tarrajeo fue de 20 mm, de manera que se pudo cubrir toda la superficie de la malla, con un recubrimiento adecuado. El espesor promedio de los tres muretes reforzados es de 140 mm.



**Figura 5-10. Esquema de murete reforzado con M.E.**

### **5.2.3 REFORZAMIENTO DE MURETES CON TRM DE FIBRA DE BASALTO**

De igual manera que el caso de refuerzo con mallas electrosoldadas, los muretes fueron reforzados luego de 28 días de construidos. Para el caso de refuerzo con TRM de fibra de basalto, se siguió el procedimiento recomendado por la ficha técnica de la malla GeoSteel Grid 200. Esta recomienda empezar las actividades sobre una superficie libre de polvo,

limpia, de manera que la adherencia no pueda ser afectada. Se cortaron las mallas en pliegos de 1620 mm x 600 mm (ver figura 5-11).



**Figura 5-11. Malla de fibra de basalto.**

Una vez cortadas las mallas, la ficha técnica sostiene que se debe aplicar una primera capa de mortero de alrededor de 3 a 5 mm, sobre la cual se colocaría la malla, dejando que el mortero traspase por las aberturas para que pueda desarrollar una correcta adherencia en toda la superficie. Se coloca la malla desde una esquina y se envuelve la malla alrededor del murete dejando un traslape de 200 mm desde el punto inicial del recubrimiento con la malla (ver figura 5-12). Una vez colocada la malla se le aplica la segunda capa de mortero para poder cubrir el refuerzo y poder frotachar la superficie y quede agradable a la vista. El curado de los especímenes se dio dos veces al día por los siguientes 7 días desde la construcción de los muretes para que pueda desarrollar la adherencia y resistencia.



Figura 5-12. Corte de malla de fibra de basalto.

#### 5.2.4 REFORZAMIENTO DE MURETES CON TRM DE FIBRA DE ACERO GALVANIZADO

De una manera similar al reforzamiento con la malla de basalto, se realiza el refuerzo con malla de fibra de acero. El procedimiento es el mismo descrito en la sección anterior salvo el cortado y las dimensiones de la malla. El corte de la malla se da en bandas de dimensiones de 1620 mm x 100 mm. Se reforzó con tres (03) de estas bandas por cada murete a reforzar. Debido a las características de la malla se debió usar una amoladora para poder darle la forma a las bandas. El refuerzo se realizó por banda, se colocó el mortero en una primera capa de las mismas características que se usó en el reforzamiento con mallas de fibra de basalto, después, se procedió a colocar la malla con un traslape de 200 mm para finalmente colocar la segunda capa de mortero (ver figura 5-14). En las otras dos bandas restantes se realizó el mismo procedimiento para finalmente poder tarrajear el resto del espécimen y poder frotachar para darle el acabado final.



**Figura 5-13. Malla de fibra de acero galvanizado.**



**Figura 5-14. Proceso de reforzamiento con malla de fibra de acero.**

## 6 ENSAYOS DE ESPECÍMENES

Como parte principal de la investigación se ensayaron los prismas reforzados y no reforzados para poder comparar y analizar el comportamiento de la albañilería tubular ante solicitaciones de carga axial y de corte. Se empezaron con los ensayos a compresión axial de tres (03) pilas sin reforzamiento, posteriormente se ensayaron las seis (06) pilas reforzadas con malla electrosoldada y sistema TRM de malla de fibra de basalto, tres especímenes de cada uno. Posteriormente se presentarán los ensayos a compresión diagonal en muretes. Se tienen doce (12) especímenes de los cuales se ensayaron tres (03) muretes sin refuerzo y posteriormente nueve (09) reforzados con malla electrosoldada, TRM de malla de fibra de basalto y TRM de malla de fibra de acero galvanizado, tres muretes por cada refuerzo. Se consideran tomas frontales a aquellas que muestren las caras de los especímenes visibles en la posición indicada en el protocolo de ensayo.

### 6.1 ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL

Las pilas fueron transportadas por el personal de laboratorio. El día anterior a los ensayos, personal obrero del laboratorio colocó una mezcla de cemento y yeso en las zonas superior e inferior de las pilas (*capping*), lugar en donde se le aplicó la carga (ver figura 6-1). Posteriormente, se marcó con tira línea el eje por donde se colocaron los sensores LVDT, encargados de medir las deformaciones a lo largo del eje de aplicación de la carga durante el ensayo. Una vez trazados, se colocaron los soportes de los instrumentos con pegamento a 400 mm de distancia vertical en ambas caras.



Figura 6-1. Colocación de capping en las pilas de albañilería tubular.

Se utilizó una gata hidráulica de 600 kN y una celda de carga que se encargaba de registrar el voltaje proveniente de los dispositivos LVDT para poder transformarlos, previa calibración, a desplazamientos, el software encargado de cumplir dicha labor es conocido en el mercado como CATMAN. El ensayo se realizó con una velocidad de carga igual a 50 kN/min con un tiempo de ensayo aproximado de 3 minutos. Los dispositivos LVDT se retiraron a una etapa de carga lo suficientemente alejada del instante en el que las pilas fallan, esto para cuidar la instrumentación y no dañar los dispositivos en caso se dé una falla explosiva.

### 6.1.1 PILAS SIN REFUERZO

A manera de tener una comparación válida, se realizaron tres (03) ensayos base en los que se aplica la carga de compresión axial en pilas sin reforzamiento alguno. Estos especímenes estaban rotulados con las siglas P-1, P-2 y P-3 y fueron ensayados según el procedimiento anteriormente mencionado.

**Pila no reforzada P-1:** Falla frágil y explosiva por aplastamiento. Este tipo de falla se dio en primer lugar con fisuras y desprendimiento del mortero solo del lado posterior instrumentado de la pila. Una vez que el mortero perdió capacidad de asumir esfuerzos de compresión, fueron las unidades y la cara frontal los que recibieron toda la carga y, al darse la falla explosiva del ladrillo, se produjo el desprendimiento del mortero frontal, resultando así en el colapso del espécimen de manera abrupta (ver figuras 6-2y 6-3).



Figura 6-2. Ensayo de compresión de pila P-1



**Figura 6-3. Falla de la fila P-1.**

**Pila no reforzada P-2:** Falla frágil y local parcial. Se observó que la grieta atravesó tres unidades de albañilería de manera vertical con una ligera desviación de los esfuerzos. Esta pudo darse debido a la pequeña variación en altura del prisma de albañilería, así como las variaciones en cada una de las unidades tubulares que, a comparación de una unidad hueca, las vuelve más vulnerables; así, aplicada la carga, se concentraron los esfuerzos de compresión en el lado frontal de la pila, generando una falla local. (ver figuras 6-4 y 6-5).



**Figura 6-4. Ensayo de compresión de pila P-2.**



**Figura 6-5. Falla de Pila P-2.**

**Pila no reforzada P-3:** Este espécimen, al igual que P2, presentó falla local con un comportamiento frágil. Este ocurrió en la cara posterior del espécimen ensayado. Se observó que la grieta atravesó una sola unidad de albañilería de manera vertical casi al extremo de la cara. Esta pudo darse debido a la pequeña variación en altura del prisma de albañilería. Se concentraron los esfuerzos de compresión en el lado frontal de la pila, generando así una falla local con un comportamiento no deseado. (ver figuras 6-6 y 6-7).



**Figura 6-6. Ensayo de compresión de Pila P-3.**



Figura 6-7. Falla de pila P-3.

### 6.1.2 PILAS REFORZADAS CON MALLA ELECTROSOLDADA

Como inicio del estudio del refuerzo en prismas de albañilería, se ensayaron tres (03) pilas reforzadas con malla electrosoldada. Estos especímenes estaban rotulados con las siglas PE-1, PE-2 y PE-3 y fueron ensayados según el procedimiento anteriormente mencionado.

**Pila reforzada con malla electrosoldada PE-1:** Falla dúctil. Este espécimen presentó grieta vertical a lo largo de la interfase tarrajeo - ladrillo - malla y no se presentaron fallas explosivas. Asimismo, las dos primeras unidades presentaron fracturas longitudinales en la dirección de los orificios horizontales, lo cual generó inestabilidad en los mismos. Por otro lado, la adherencia entre el mortero y la malla electrosoldada fue adecuada, de modo que se dio expansión de la capa de mortero en ciertas zonas de la pila sin desprendimiento (ver figuras 6-8 y 6-9).



Figura 6-8. Ensayo de compresión pila PE-1.



**Figura 6-9. Falla pila PE-1.**

**Pila reforzada con malla electrosoldada PE-2:** Falla dúctil. Este espécimen presentó grieta vertical a lo largo de la interfase tarrajeo - ladrillo - malla y no se presentaron fallas explosivas. Asimismo, los especímenes presentaron fracturas longitudinales en la dirección de los orificios horizontales lo cual generó inestabilidad y grandes deformaciones laterales de cada unidad, lo que conllevó a que el mortero de recubrimiento sea desplazado fuera de las caras de las pilas. Se considera que la adherencia entre el mortero y la malla electrosoldada fue adecuada (ver figuras 6-10 y 6-11).



**Figura 6-10. Ensayo de compresión de pila PE-2.**



Figura 6-11. Falla pila PE-2.

**Pila reforzada con malla electrosoldada PE-3:** Falla dúctil. Este espécimen presentó grieta vertical a lo largo de la interfase tarrajeo - ladrillo - malla y no se presentaron fallas explosivas. Se presentaron fracturas longitudinales similares en la dirección de los orificios horizontales lo cual generó inestabilidad en las unidades y grandes deformaciones laterales de cada unidad, lo que conllevó a que el mortero de recubrimiento sea desplazado fuera de las caras de las pilas. La adherencia también se consideró adecuada por el comportamiento similar al visto a las dos pilas anteriores (figuras 6-12 y 6-13).



Figura 6-12. Ensayo de compresión en pila PE-3.



Figura 6-13. Falla de pila PE-3.

### 6.1.3 PILAS REFORZADAS CON TRM DE MALLA DE FIBRA DE BASALTO

**Pila reforzada con TRM de malla de fibra basalto PB-1:** Falla progresiva y dúctil. Resiste valores más altos que los ensayos anteriores. La falla es caracterizada por el desprendimiento de la capa de mortero exterior a la malla de basalto, provocando así la falla del espécimen. Fracturas del mortero de recubrimiento especialmente en la zona posterior a la instrumentada. Las unidades de albañilería no sufren de daños mayores por lo que se puede intuir que el conjunto de malla de basalto-mortero confinó adecuadamente al espécimen aumentando su resistencia a compresión (figuras 6-14 y 6-15).



Figura 6-14. Ensayo de compresión de pila PB-1.



Figura 6-15. Falla de pila PB-1.

**Pila reforzada con TRM de malla de fibra basalto PB-2:** Falla progresiva y dúctil. Falla caracterizada por desprendimiento local en la zona superior frontal del mortero y trituración de las unidades de albañilería de la zona superior (figuras 6-16 y 6-17). Se puede visualizar en la figura 6-17 la malla desgarrada por esfuerzos de tracción, esto es un indicador que la trituración de los ladrillos provocó el desgarre de la malla de fibra de basalto.



Figura 6-16. Ensayo de compresión de pila PB-2.



Figura 6-17. Falla local en pila PB-2.

**Pila reforzada con TRM de malla de fibra de basalto PB-3:** Falla progresiva y dúctil. Se observa una falla más distribuida que en los dos ensayos precedentes. Falla caracterizada por la trituración de unidades de albañilería y desprendimiento del mortero reforzado en la zona superior frontal (figuras 6-18 y 6-19). Se puede observar en la figura 6-19 el estado final de la malla de fibra de basalto en la que se presentan desgarres en las zonas laterales del espécimen lo cual indica una correcta interacción entre el mortero reforzado y las unidades de albañilería que le dio una resistencia mayor a compresión debido al confinamiento que la malla proveyó a la pila.



Figura 6-18. Ensayo de compresión de pila PB-3.



Figura 6-19. Estado de malla en pila PB-3.

## 6.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL

Los muretes a ensayarse fueron transportados al laboratorio mediante un equipo de izaje colgado del puente grúa del laboratorio y se posicionaron en el dispositivo de ensayo (figura 6-20). Se trazaron los ejes (ver figura 6-21) y posteriormente se colocaron los soportes de los dispositivos LVDT que permitieron medir las deformaciones a lo largo de las diagonales de los muretes; una vez trazados los ejes en las diagonales, se colocaron

los soportes con pegamento a 400 mm de distancia en cada una de las dos diagonales de la cara principal del murete (ver figura 6-21).



Figura 6-20. Preparación de ensayos de compresión diagonal.



Figura 6-21. Ejes y colocación de dispositivos LVDT en diagonales.

La carga fue aplicada con una gata hidráulica de 200 kN a una velocidad estándar de 10 kN/min con un tiempo aproximado por ensayo de quince minutos. Durante la aplicación de la carga, los dispositivos LVDT enviaban señales de corriente a un amplificador de señales (ver figura 6-22) que a la vez enviaba los datos al software CATMAN y este transformaba las señales eléctricas en deformaciones longitudinales. Con esta información se obtenían los valores de Fuerza aplicada-desplazamientos longitudinales. Al tener dos dispositivos locales de medición, se obtuvieron dos direcciones de deformación; el primero, es la deformación vertical y el segundo la deformación

horizontal. El primer dispositivo registró valores de acortamiento por los esfuerzos de compresión y el segundo estiramiento debido a esfuerzos de tracción.



Figura 6-22. Amplificador de señales HBM.

Los dispositivos fueron retirados a una carga lo suficientemente alejada del valor de carga máxima para evitar que los dispositivos LVDT sufran daño alguno en esta investigación; en promedio se retiraron alrededor de 100 kN para los ensayos en muretes.

### 6.2.1 MURETES SIN REFUERZO

Fueron los primeros en ensayar. La falla de estos especímenes fue frágil y explosiva. Se detalla el tipo de falla visualizado para cada uno de los muretes. Estos especímenes estaban rotulados con las siglas M-1, M-2 y M-3.

**Murete sin refuerzo M-1:** Falla por tracción diagonal escalonada en forma frágil y explosiva. La falla rodea los 200 mm que se rellenaron las unidades tubulares con mortero a la hora de construirse. Por tal razón, se evitó la falla local en el punto exacto de aplicación de la carga, más bien, la falla rodeó esta zona y atravesó los ladrillos hasta llegar al otro extremo (figura 6-23).



Figura 6-23. Falla de murete M-1.

**Murete sin refuerzo M-2:** Falla por tracción diagonal sumamente frágil y explosiva. La grieta atraviesa por la diagonal principal las unidades tubulares y el mortero presente en la junta, esto indica una correcta interacción entre el mortero y los ladrillos. En este espécimen, el mortero colocado en las esquinas es atravesado totalmente por la grieta diagonal.



Figura 6-24. Falla murete M-2.

**Murete sin refuerzo M-3:** Falla por tracción diagonal escalonada en forma frágil. Al igual que M-1, la falla de este espécimen rodea la zona rellena con mortero y posteriormente atraviesa los ladrillos hasta llegar al otro extremo (figura 6-25).



Figura 6-25. Falla murete M-3.

## 6.2.2 MURETES CON REFORZAMIENTO DE MALLA ELECTROSOLDADA

Como inicio del estudio del refuerzo en muretes de albañilería tubular, se ensayaron tres (03) muretes reforzados con malla electrosoldada. Estos especímenes estaban rotulados con las siglas ME-1, ME-2 y ME-3 y fueron ensayados según el procedimiento anteriormente mencionado.

**Murete reforzado con malla electrosoldada ME-1:** Falla lenta y progresiva. La falla se da de manera inesperada aún antes de retirar los dispositivos LVDT, por lo que la grieta se expandió en el momento que se detuvo el ensayo y se presentaba una carga constante. La grieta atraviesa por la diagonal principal hasta llegar al otro extremo del murete (figura 6-26). En la Figura 6-27 se aprecia que la malla electrosoldada se ha pandeado y expulsó hacia afuera del plano al tarrajeo que la recubría. La grieta no llegó a completarse en las unidades tubulares, pero sí en la zona tarrajada.



Figura 6-26. Falla murete ME-1.



Figura 6-27. Detalle de falla murete ME-1.

**Murete reforzado con malla electrosoldada ME-2:** Falla lenta y progresiva. La grieta atravesó la diagonal principal hasta llegar al extremo opuesto del punto de aplicación de carga (figura 6-28). En la figura 6-29 se aprecia como la malla ha sufrido deformaciones plásticas dejando una deformación permanente lo cual es indicador de los esfuerzos que está soportando el refuerzo de malla electrosoldada. Los ladrillos tubulares se ven triturados debido a la carga de compresión diagonal.



Figura 6-28. Falla murete ME-2.



Figura 6-29. Detalle de falla murete ME-2.

**Murete reforzado con malla electrosoldada ME-3:** Falla lenta y progresiva. La falla atraviesa la diagonal principal del murete hasta el extremo opuesto del punto de aplicación de la carga (figura 6-30). En la figura 6-31 se aprecia como la malla empuja el tarrajeo para desprenderse del murete. Esto se debe a la deformación por pandeo de la malla electrosoldada. Así mismo se puede observar como la malla absorbe deformaciones aportando a la resistencia del murete.



Figura 6-30. Falla ME-3.



Figura 6-31. Detalle de falla ME-3.

### 6.2.3 MURETES REFORZADOS CON SISTEMA TRM DE MALLA DE FIBRA DE BASALTO

Prosiguiendo con el estudio del refuerzo en muretes de albañilería tubular, se ensayaron tres (03) muretes reforzados con sistema TRM de malla de fibra de basalto. Estos especímenes estaban rotulados con las siglas MB-1, MB-2 y MB-3 y fueron ensayados

según el procedimiento anteriormente mencionado. El análisis de la falla fue realizado posteriormente al ensayo de todos los especímenes.

**Murete reforzado con TRM de malla de fibra basalto MB-1:** Falla lenta y progresiva, por tracción diagonal. La falla atraviesa la diagonal principal del murete hasta el extremo opuesto del punto de aplicación de la carga. Se observa en la figura 6-32 la trituración del ladrillo en la diagonal opuesta a la aplicación de la carga, debido al exceso de esta.

En la figura 6-33 se muestra que, en la inspección post ensayo (autopsia), la falla se da netamente en el ladrillo y no hay presencia de rotura de la malla de fibra de basalto, por lo que, a pesar de la mediana trituración en el centro del espécimen, hubo buena acción de confinamiento del material.



Figura 6-32. Falla MB-1.



Figura 6-33. Autopsia MB-1.

**Murete reforzado con TRM de malla de fibra basalto MB-2:** La falla fue lenta y progresiva. Como se muestra en la figura 6-34, la grieta se da en la misma dirección de la diagonal principal del murete. Inicialmente, la falla inicial se mostró como una grieta ligera, mientras que conforme se fue aumentando la carga se produjo trituración en la esquina opuesta a la de la aplicación de la carga.

Tal como se muestra en la figura 6-35, la falla se da en el ladrillo, mas no hubo rotura de la malla de fibra de basalto; sin embargo, existió presencia de deformaciones en la zona central del espécimen ensayado (ver figura 6-36).



**Figura 6-34. Falla MB-2.**



**Figura 6-35. Detalla de falla de MB-2.**



**Figura 6-36. Deformación de malla de MB-2.**

**Murete reforzado con TRM de malla de fibra basalto MB-3:** La falla fue lenta y progresiva, y se desfasa ligeramente de la diagonal principal debido a que se da una grieta en la junta de ladrillo de la esquina inferior del espécimen (ver 6-37).

Asimismo, en la zona de la falla, tal como se observa en la figura 6-38, hubo rotura de la malla de fibra de basalto al verse sujeta a tracción. Además, hubo buena adherencia entre la malla y el mortero aún visible durante la autopsia del espécimen (ver figura 6-39), tampoco hubo desprendimiento de mortero en el desarrollo del ensayo adicional al resultante del picado durante la misma.



**Figura 6-37. Falla MB-3.**



Figura 6-38. Rotura de malla durante ensayo de MB-3.



Figura 6-39. Malla aún adherida al mortero de MB-3.

#### **6.2.4 MURETES REFORZADOS CON SISTEMA TRM DE MALLA DE FIBRA DE ACERO GALVANIZADO**

Se ensayaron tres (03) muretes reforzados con sistema TRM de malla de fibra de acero galvanizado. Estos especímenes estaban rotulados con las siglas MA-1, MA-2 y MA-3 y fueron ensayados según el procedimiento anteriormente mencionado. El análisis de la falla fue realizado posteriormente al ensayo de todos los especímenes.

**Murete reforzado con TRM de malla de fibra de acero galvanizado MA-1:** La falla que se da es lenta y progresiva, por tracción diagonal. Se presenta una fisura diagonal

inicial (ver figura 6-40) y luego la abertura se limita debido al trabajo a tracción de las bandas, de modo que se generó una concentración de esfuerzos en la zona de aplicación de carga.

Asimismo, en la figura 6-41 se observa desprendimiento y la fibra de acero con el polímero producto del traslado y manipulación al momento de retirar el mortero de la superficie, además, se observan las fibras de acero aún en tensión, en la zona de falla.

Tal como se esperó, no existió desprendimiento por trituración del espécimen ensayado debido al confinamiento brindado. Se conservó buena adherencia local en ciertos tramos de la banda con el mortero, especialmente en las zonas alejadas a la falla (figura 6-42).



**Figura 6-40. Falla MA-1.**



Figura 6-41. Fibras de acero tensas con desprendimiento de polímero.



Figura 6-42. Banda de fibra de acero adherida a mortero.

**Murete reforzado con TRM de malla de fibra de acero galvanizado MA-2:** La falla que se da es lenta y progresiva por tracción diagonal. Se presenta una fisura diagonal inicial (ver figura 6-43) y luego la abertura se limita debido al trabajo a tracción de las bandas, de modo que se generó una concentración de esfuerzos en la zona de aplicación de carga.

Durante el análisis de la falla, se retiró el mortero de la superficie del espécimen ensayado, el cual ocasionó que el polímero se desprenda de la fibra de acero por efecto de

adherencia en zonas en las que se encontró las fibras de acero en tensión (ver figura 6-44). Asimismo, hubo trituración del ladrillo en la zona central del murete.



Figura 6-43. Falla MA-2.



Figura 6-44. Detalle falla MA-2.

**Murete reforzado con TRM de malla de fibra de acero galvanizado MA-3:** La falla es lenta y progresiva por tracción diagonal; asimismo, hubo trituración del ladrillo por el exceso de carga una vez llegada a la falla (ver figura 6-45).

Las fibras de acero de las bandas se mantuvieron intactas y sujetas a tracción, mientras que las fibras poliméricas fueron desgarradas durante el retiro del mortero de la superficie, así como en las zonas cercanas a la falla (ver figura 6-46).



**Figura 6-45. Falla de MA-3.**



**Figura 6-46. Deterioro de fibras poliméricas.**

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como parte fundamental de la presente investigación, se analizan los resultados obtenidos de los ensayos de compresión axial y compresión diagonal en los prismas de albañilería tubular. Se obtienen las resistencias características a compresión en las pilas de albañilería, así como la resistencia característica a corte en los muretes. Los resultados se muestran en tablas para poder ser entendidos correctamente y observar visualmente las tendencias en la etapa elástica. Posteriormente, se obtienen los valores del módulo de elasticidad y de corte para cada espécimen y se promedian para dar un resultado válido. Se empezará el análisis de datos con las pilas y se prosigue con el análisis de los datos de los muretes.

### 7.1 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS-RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

Realizados los ensayos, se procesaron los respectivos resultados. Se tuvieron registradas la carga proveniente de la gata hidráulica y las deformaciones en cada cara (frontal y posterior) principal de la pila. En la primera parte del análisis para cada espécimen reforzado, se obtiene el valor máximo del registro y se utiliza para obtener la resistencia a compresión de las pilas. Estos datos se promedian, se obtiene la desviación estándar y finalmente se muestra la resistencia característica a compresión del tipo de refuerzo. En la segunda parte, se muestran las gráficas de carga aplicada- deformación de los dispositivos LVDT para así calcular el módulo de elasticidad de cada pila para después ser promediado y manejar un resultado aceptable.

#### 7.1.1 PILAS SIN REFUERZO

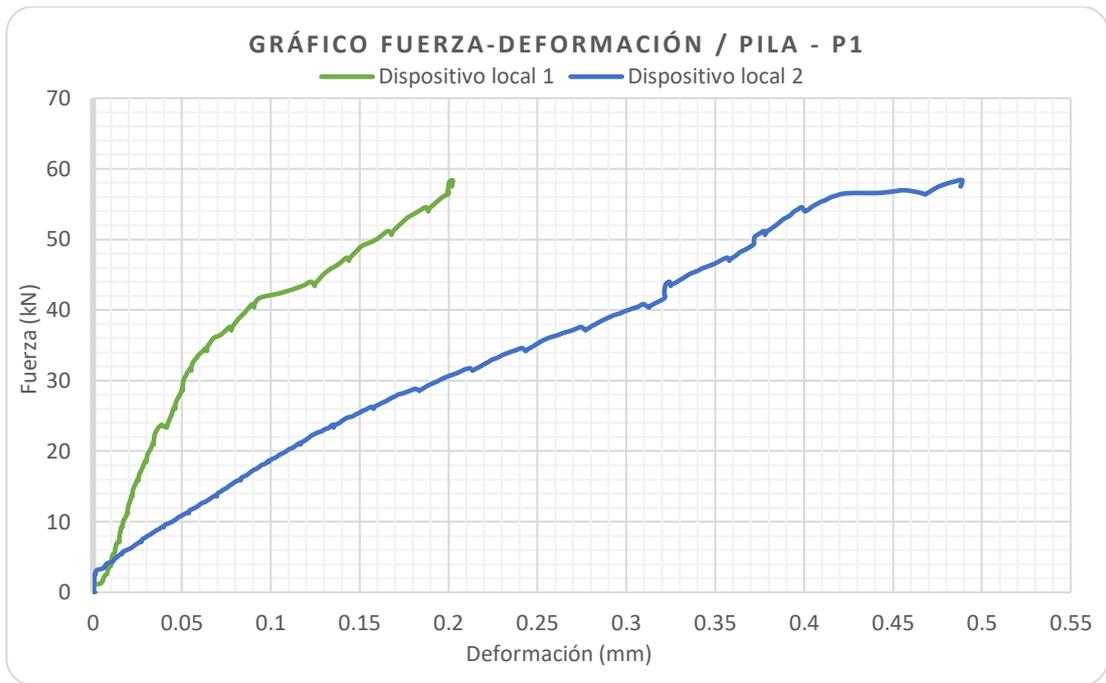
Las pilas no reforzadas ensayadas fueron aquellas que tuvieron mayor uniformidad de resultados, con una desviación estándar de **0.2 MPa**. Tal como se observa en el capítulo anterior, fueron estas pilas las que mantuvieron un mismo patrón de falla (aplastamiento), lo que permite correlacionar y validar las resistencias últimas obtenidas. Se muestra a continuación los resultados de resistencia a compresión obtenidos a las pilas no reforzadas (ver tabla 7.1). La resistencia característica base es igual a **1.8 MPa**.

**Tabla 7.1. Cálculo de  $f_m$  en pilas sin reforzamiento.**

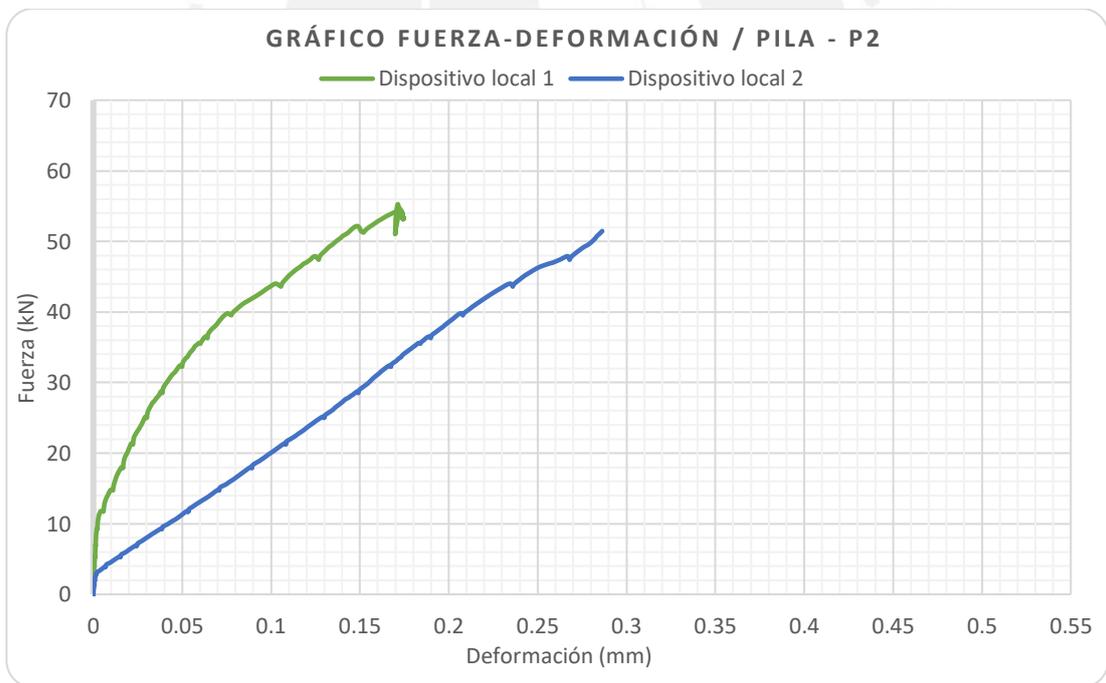
Especímen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones			Esbeltez	P máx. (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (Mpa)	Factor de corrección	$f_m$ MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)						
P-1	Sin refuerzo	230	540	138	3.9	58.4	31740	1.8	0.99	1.8 (18.6)
P-2	Sin refuerzo	230	545	136	4.0	60.9	31280	1.9	1.00	1.9 (19.8)
P-3	Sin refuerzo	230	546	134	4.1	66.5	30858	2.2	1.00	2.2 (22.0)
								Promedio		2.0 (20.1)
								Desviación Est.		0.2 (1.7)
								$f'_m$		1.8 (18.4)

Por otro lado, se analizaron las gráficas de fuerza ( $F$ )-deformación ( $D$ ) para calcular los valores del módulo de elasticidad. Se presenta para cada pila su respectiva gráfica  $F$ - $D$  en las que se refleja el comportamiento hasta que se retiran los dispositivos LVDT a aproximadamente 60% de la carga máxima para no dañar los dispositivos. La tabla 7.2 resume los cálculos realizados y presenta el módulo de elasticidad de las pilas ensayadas y la desviación estándar del conjunto de datos. Para obtener los valores presentados en la tabla 7.2 se trabaja con porcentajes de la fuerza máxima registrada para cada pila, esto se debe a que los primeros valores registrados por los instrumentos muestran el proceso de acomodamiento entre la pila y el dispositivo de aplicación de carga. En el límite inferior se trabaja con el 10% de la carga máxima, mientras que para el límite superior se trabaja con el 40% de la carga máxima mientras este valor sea coherente con la zona elástica.

Se aprecia en las gráficas de fuerza – deformación (figuras 7-1 a 7-3), que los dos dispositivos LVDT muestran valores diferentes en cuanto a deformaciones alcanzadas para un valor determinado de carga. Esto se debe a las irregularidades en los prismas que no permitió una cuantificación uniforme de la deformación local. Sin embargo, existe una tendencia uniforme en lo que respecta a la pendiente de las gráficas. Asimismo, la curva correspondiente al dispositivo local 1 de la pila P-3 muestra una tendencia diferente; esto se debe a la forma de falla local explicada en el capítulo anterior, la cual no permitió la lectura de deformaciones en la cara frontal de la pila en mención. Por esta razón estos datos no pueden ser tomados en cuenta en los cálculos realizados, se despreciarán las deformaciones para el dispositivo local 1, curva verde, en la gráfica de la figura 7-3.



**Figura 7-1. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila P-1.**



**Figura 7-2. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila P-2.**

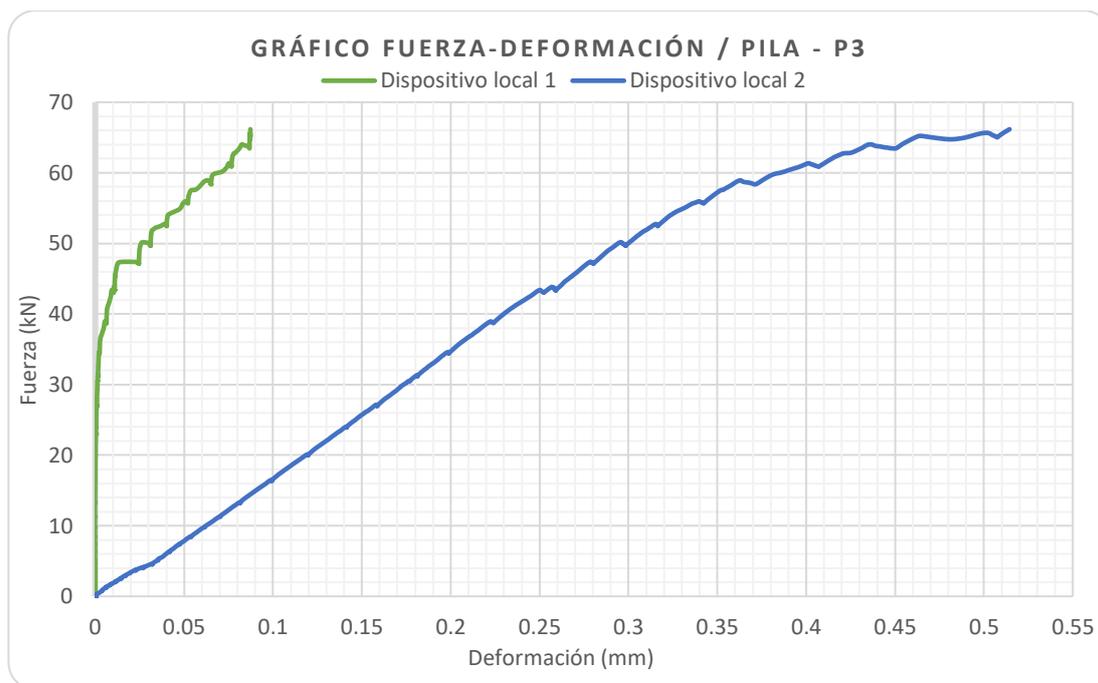


Figura 7-3. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila P-3

En la tabla 7.2 se muestra el cálculo del módulo de elasticidad con los valores de la diferencia de fuerzas entre los límites anteriormente mencionados (a excepción de la pila P-2 donde se tomó el 20%). Se emplea el promedio de la diferencia de deformaciones entre el dispositivo local 1 y 2 para dichas fuerzas, este valor se encuentra en la tabla como  $\Delta D$ . El módulo de elasticidad  $E_m$  de cada espécimen se obtiene dividiendo la variación del esfuerzo ( $\Delta P/A$ ) entre la variación de deformaciones ( $\Delta D/L$ ). Luego se obtiene el valor  $E_m$  promedio y la desviación estándar.

Tabla 7.2. Cálculo de módulo de elasticidad de pilas no reforzadas.

Especimen	Tipo de reforzamiento	Distancia	Distancia	Distancia	Área (mm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (N)	$\Delta D$ (mm)	$E_m$ MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	Prom. (mm)				
P-1	Sin reforzamiento	400	401	401	31740	17521	0.070	3164 (32261)
P-2	Sin reforzamiento	400	400	400	31280	12317	0.0463	3400 (34672)
P-3	Sin reforzamiento	402	400	401	30858	20065	0.1125	2317 (23626)
E promedio								2960 (30186)
Desviación Estándar								570 (5808)

El valor determinado de módulo de elasticidad promedio fue de **2960 MPa** aproximadamente, mientras que la desviación estándar es cercana a **600 MPa**. Estos resultados serán considerados para comparaciones posteriores.

### 7.1.2 PILAS REFORZADAS CON MALLA ELECTROSOLDADA

Las pilas reforzadas ensayadas con mallas electrosoldadas fueron aquellas que tuvieron menor uniformidad de resultados, con una desviación estándar de **0.6 MPa**, a comparación del **0.2 MPa** en las pilas sin refuerzo. Tal como se observó en el capítulo anterior, estas pilas mantuvieron un mismo patrón de falla (dúctil) con desprendimiento del mortero que recubría las mallas electrosoldadas. Esto permite asociar el tipo de falla con los resultados obtenidos y validar las resistencias últimas. Se muestran los resultados de resistencia a compresión obtenidos a las pilas reforzadas con malla electrosoldada (ver tabla 7.3). Cabe recordar que debido a la pausa del ensayo para retirar los dispositivos LVDT, los datos de la pila PE-1 podrían someterse a discusión ya que pudieron alterar los resultados finales de la resistencia última, pero no de la relación fuerza-desplazamiento.

Tabla 7.3. Cálculo de  $f_m$  de pilas reforzadas con malla electrosoldada.

Especimen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones			Esbeltez	P máx. (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )	f <sub>m</sub> (MPa)	Factor de corrección	f <sub>m</sub> MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)						
PE-1	Malla electrosoldada	230	539	142	3.8	57.7	32660	1.8	0.98	1.7 (17.7)
PE-2	Malla electrosoldada	230	550	140	3.9	91.7	32200	2.8	0.99	2.8 (28.7)
PE-3	Malla electrosoldada	230	544	139	3.9	68.6	32047	2.1	0.99	2.1 (21.6)
								Promedio		2.2 (22.7)
								Desviación		0.6 (5.6)
								f <sub>m</sub>		1.7 (17.1)

La resistencia característica a compresión de las pilas reforzadas con malla electrosoldada es de **1.7 MPa**, valor de resistencia a la compresión ligeramente menor al determinado en las pilas sin reforzar; sin embargo, se recalca que existe un valor anómalo y no esperado en la resistencia de la pila PE-1. En caso este valor anómalo sea dejado de lado, se obtendría un valor de resistencia característica a la compresión de **2 MPa**, 9.5% mayor a la resistencia obtenida en las pilas sin reforzar. A continuación, se muestran las gráficas de fuerza-deformación de las tres pilas reforzadas con mallas electrosoldadas que

representan el comportamiento de las pilas hasta que se retiraron los dispositivos LVDT para no dañarlos durante los ensayos. Como el módulo de elasticidad se calcula en la zona elástica, lo anterior no afectará en los cálculos necesarios para hallar los parámetros buscados.

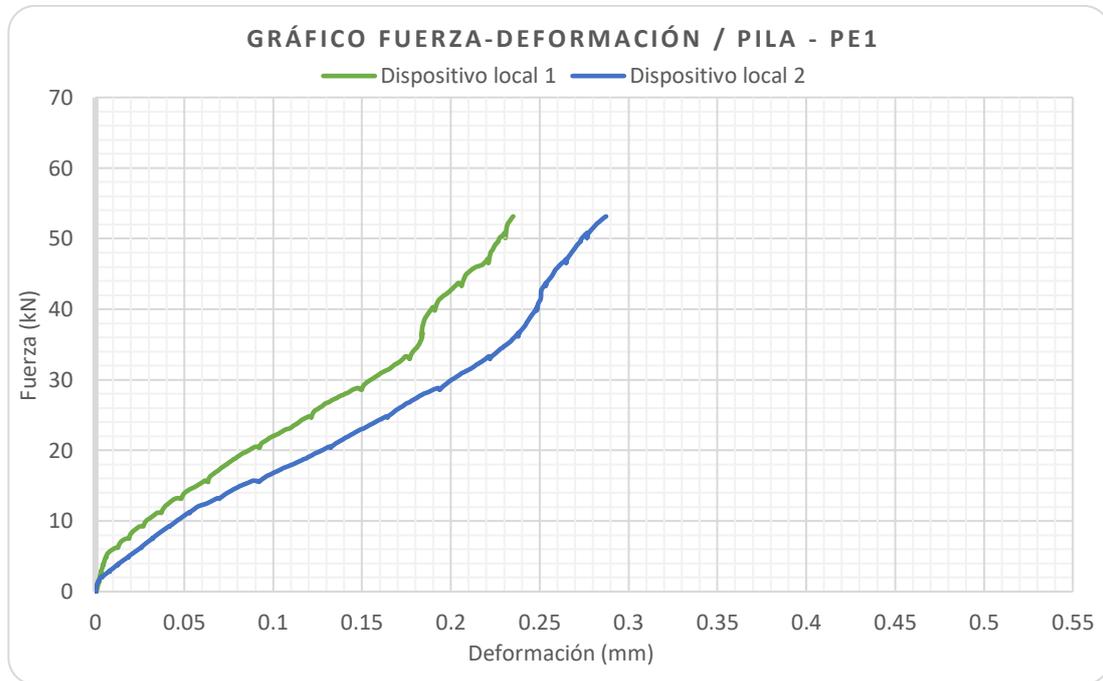


Figura 7-4. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PE-1.

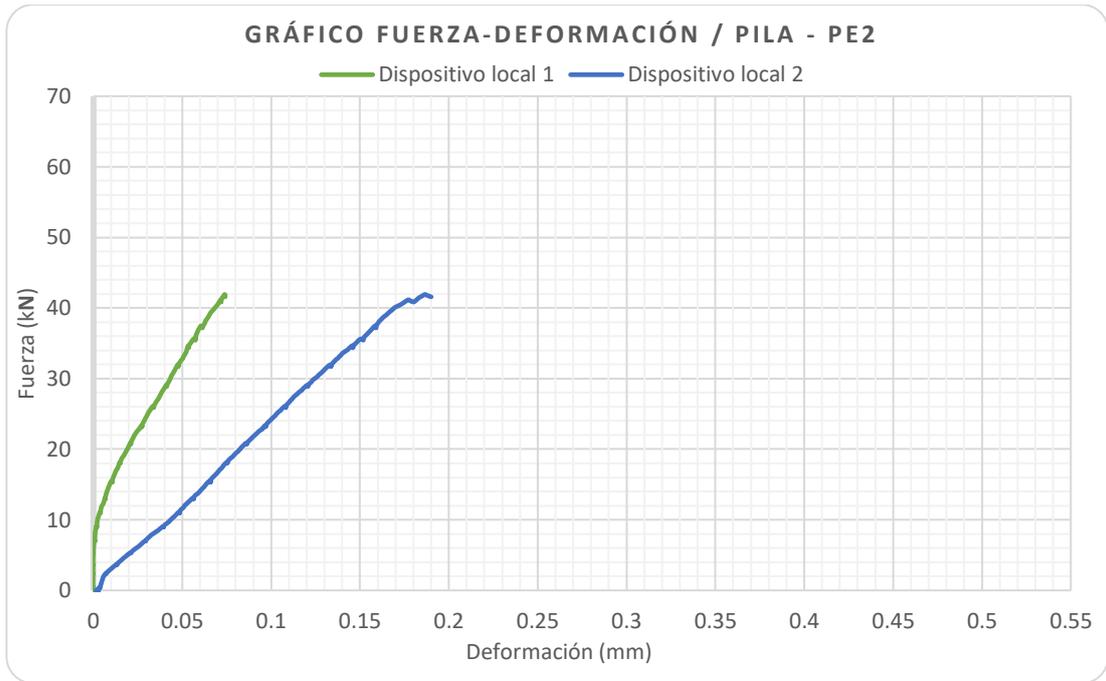


Figura 7-5. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PE-2.

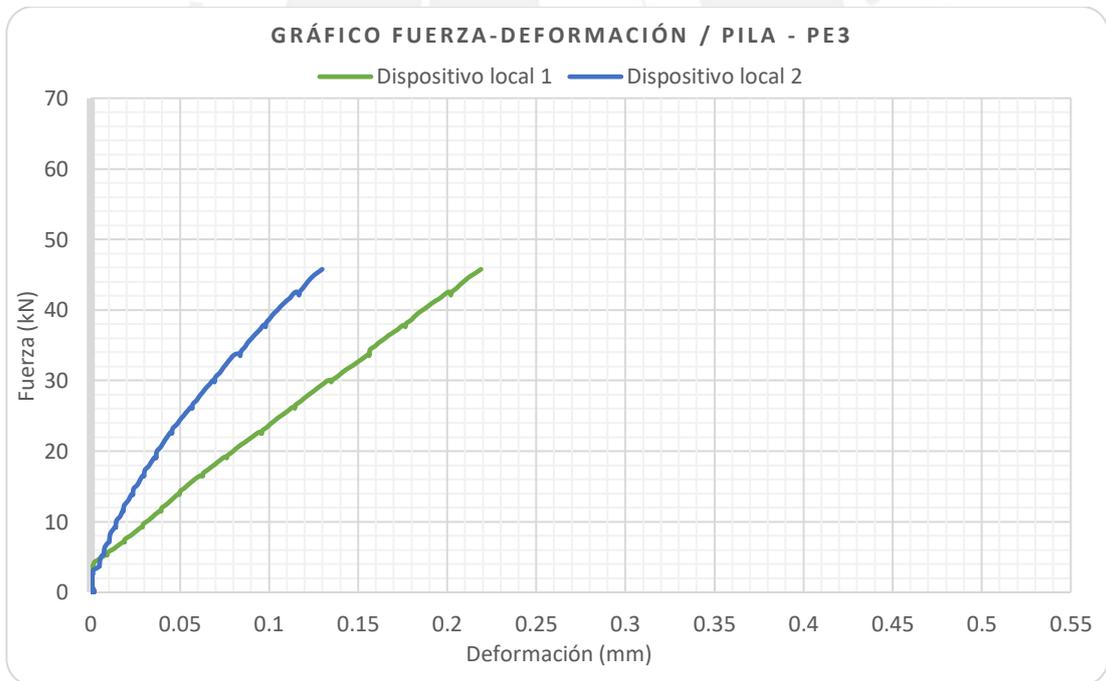


Figura 7-6. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PE-3.

Se observa de manera general que para ambos registros de LVDT, las pendientes tienden a ser las mismas. La pila PE-1 fue aquella cuya deformación se dio de manera más

uniforme (ver figura 7-4), mientras que las pilas PE-2 y PE-3, limitaron el registro de desplazamiento de al menos un transductor (dispositivo 1 y 2, respectivamente). Esto último se da debido a la irregularidad propia de las pilas en altura; sin embargo, esta serie de pilas reforzadas no falló de manera explosiva y frágil (como el caso de las pilas sin refuerzo) debido al reforzamiento provisto por las mallas electrosoldadas.

**Tabla 7.4. Cálculo de módulo de elasticidad de pilas reforzadas con mallas electrosoldadas.**

Especímen	Tipo de reforzamiento	Distancia	Distancia	Distancia	Área (mm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (N)	$\Delta D$ (mm)	Em Mpa (kg/cm <sup>2</sup> )
		LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	Prom (mm)				
PE-1	Malla electrosoldada	400	401	401	32660	17282	0.1140	1859 (18960)
PE-2	Malla electrosoldada	400	400	400	32200	19416	0.0590	4085 (41655)
PE-3	Malla electrosoldada	402	400	401	32047	13640	0.0477	3578 (36484)
E promedio								3174 (32366)
Desviación estándar								1166 (11895)

El valor determinado de módulo de elasticidad fue de **3200 MPa** aproximadamente. Esto indica que el refuerzo con malla electrosoldada mejoró el módulo de elasticidad en **6.6%** con respecto a las pilas de albañilería tubular sin refuerzo. Sin embargo, la desviación estándar aumentó respecto a los especímenes sin refuerzo en un **86%**, por lo que los resultados aún pueden ser cuestionados. Se estudia, a continuación, el refuerzo con un sistema de mortero reforzado con textiles de fibras de basalto, TRM.

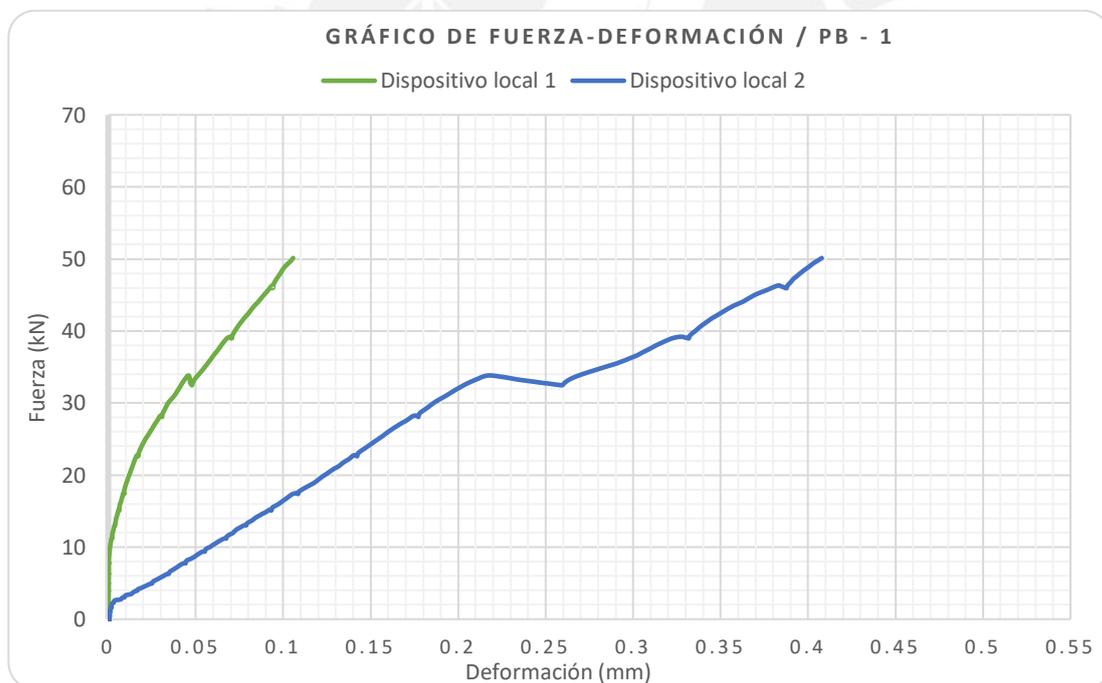
### 7.1.3 PILAS REFORZADAS CON TRM DE MALLA DE FIBRA DE BASALTO

Siguiendo con la investigación de refuerzos en compresión pura, se registraron los valores de la carga máxima para las pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto. Estos tres especímenes tienen una mayor uniformidad de resultados a comparación del refuerzo con malla electrosoldada, un valor de desviación estándar igual a **0.4 MPa** de las pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto comparados con el **0.55 MPa** de la malla electrosoldada. La falla progresiva y dúctil de estas tres pilas dan indicios de resultados uniformes y comparables. En la tabla 7.5 se pueden apreciar los valores de resistencia característica de los tres ensayos realizados para este tipo de refuerzo.

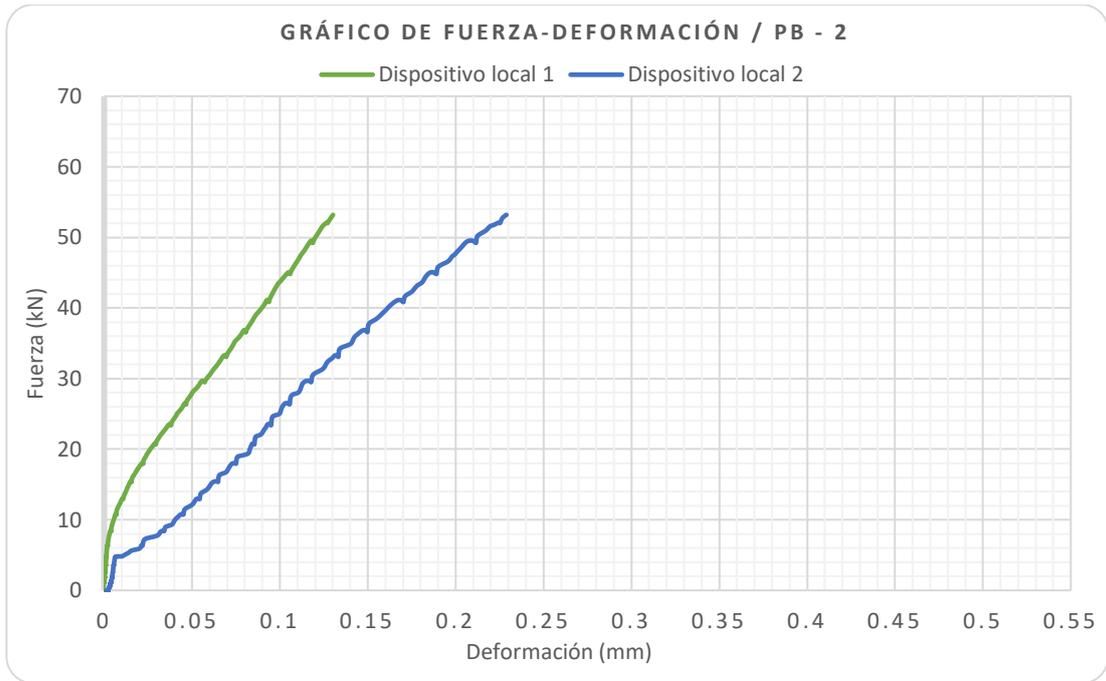
**Tabla 7.5. Cálculo de  $f'_m$  de pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto.**

Especímen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones			Esbeltez	P máx. (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (MPa)	Factor de corrección	$f_m$
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)						MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
PB-1	Malla de fibra de basalto	229	542	138	3.9	109.8	31602	3.5	0.99	3.4 (35.1)
PB-2	Malla de fibra de basalto	225	540	143	3.8	112.6	32100	3.5	0.98	3.4 (35.1)
PB-3	Malla de fibra de basalto	230	536	140	3.8	133.8	32277	4.1	0.98	4.1 (41.4)
									Promedio	3.6 (37.2)
									Desviación	0.4 (3.7)
									$f'_m$	3.3 (33.5)

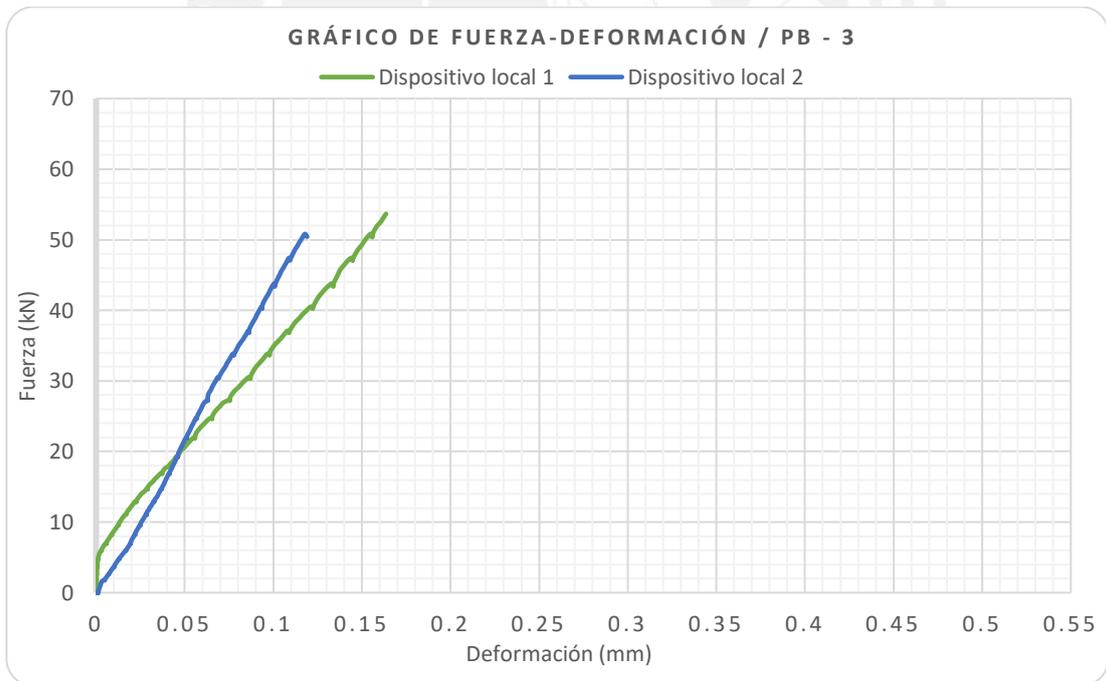
La resistencia característica a compresión de las pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto es de **3.3 MPa**, valor de resistencia mayor que las pilas sin reforzar (**1.8 MPa**) y reforzadas con malla electrosoldadas (**1.7 MPa**), esto representa un aumento del 82% en comparación a las pilas sin reforzar, base de comparación para todos los ensayos. A continuación, se muestran las gráficas de fuerza-deformación (F-D) de las tres pilas reforzadas con TRM de fibra de basalto (figuras 7-7 a 7-9).



**Figura 7-7. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PB-1.**



**Figura 7-8. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PB-2.**



**Figura 7-9. Gráfica Fuerza-Deformación en Pila PB-3.**

Se puede observar que para las pilas PB-1 y PB-2, a partir de las figuras 7-7 y 7-8, el reacomodo del espécimen y el dispositivo de carga se da en valores alrededor de 20 kN por lo que utilizar valores anteriores para realizar cálculos del módulo de elasticidad sería erróneo. Por otro lado, se creyó conveniente trabajar con un 30% de la carga máxima para estos tres ensayos en particular debido a los valores elevados de resistencia de las pilas con este refuerzo. En la tabla 7-6 se indican los cálculos de  $E_m$ .

**Tabla 7.6. Cálculo de módulo de elasticidad de pilas reforzadas con TRM de malla de fibra de basalto.**

Especímen	Tipo de reforzamiento	Distancia	Distancia	Distancia	Área (mm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (N)	$\Delta D$ (mm)	$E_m$ MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	Prom (mm)				
PB-1	Malla de fibra de basalto	400	401	401	31602	10876	0.0493	2798 (28530)
PB-2	Malla de fibra de basalto	400	400	400	32100	22615	0.0760	3708 (37812)
PB-3	Malla de fibra de basalto	402	400	401	32277	26660	0.0770	4304 (43888)
E promedio								3603 (36743)
Desviación estándar								759 (7735)

El valor determinado de módulo de elasticidad fue de **3600 MPa** aproximadamente. Esto indica que el refuerzo con TRM de malla de fibra de basalto mejoró el módulo de elasticidad en **20%** con respecto a las pilas de albañilería tubular sin refuerzo. La desviación estándar, por otro lado, aumentó de **570 MPa** en los especímenes sin refuerzo a **760 MPa** con el refuerzo estudiado, lo cual no representa un aumento notorio (menos de 14%) por lo que se despreciará esta variación.

Los resultados obtenidos indican que el refuerzo con un sistema de mortero reforzado con textiles a base de fibra de basalto es el sistema más eficiente estudiado. Los valores de resistencia y módulo elástico en las pilas con este refuerzo muestran un aumento de **80%** en la resistencia característica y un aumento del **20%** en el módulo elástico, lo cual indica que el refuerzo propuesto aumenta las propiedades mecánicas elásticas en pilas de albañilería tubular con respecto a esfuerzos de compresión. En el siguiente acápite, se estudia la resistencia a corte y el módulo de corte en muretes con refuerzos similares para verificar si la tendencia sigue siendo la misma.

## 7.2 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS- RESISTENCIA A CORTE Y MÓDULO DE CORTE

Análogamente al proceso realizado en las pilas, se procesaron los resultados del ensayo a compresión diagonal. Se tuvieron registradas la carga proveniente de la gata hidráulica y las deformaciones en las dos diagonales de la cara principal del murete. En la primera parte del análisis, para cada tipo de refuerzo se obtiene el valor máximo del registro y el mismo se utilizará para obtener la resistencia a corte del murete. Estos datos se promedian, se obtiene la desviación estándar y finalmente se presenta la resistencia característica a compresión del tipo de refuerzo. En la segunda parte, se muestran las gráficas F-D para así calcular el módulo de elasticidad de cada murete para después poder promediarlo y obtener un resultado aceptable.

### 7.2.1 MURETES SIN REFUERZO

Como se vio anteriormente, estos especímenes fueron los que presentaron la falla más frágil y explosiva. En la tabla 7.7 se pueden observar los resultados de los tres muretes que no presentaban refuerzo alguno. M-1 presenta un valor más alto que el grupo de muretes sin reforzar. Este espécimen tuvo una falla frágil en la que la grieta de falla rodeo toda la zona rellena de mortero, la cual no sufrió daño alguno, esta puede ser la razón por la que tiene un valor más alto que los otros especímenes. Por el contrario, M-3 tuvo el valor más bajo del grupo y falló de manera explosiva.

Tabla 7.7. Cálculo de  $v'm$  en muretes sin reforzamiento.

Especímen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones				Área de corte (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	vm
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)	Diagonal (mm)			MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
M-1	Sin reforzamiento	605	620	132	866	114348	148.3	1.3 (13.2)
M-2	Sin reforzamiento	605	615	135	863	116464	136.3	1.2 (11.9)
M-3	Sin reforzamiento	608	622	136	870	118292	100.8	0.9 (8.7)
Promedio								1.1 (11.3)
Desviación Estándar								0.2 (2.3)
$v'm$								0.9 (8.9)

La resistencia a corte característica de los muretes sin refuerzo es igual a **0.9 MPa** con una desviación estándar de **0.2 MPa**. Estos valores son la base de comparación para los siguientes muretes reforzados.

Por otro lado, se analizaron las gráficas de fuerza-desplazamiento (ver figuras 7-10, 7-11 y 7-12) para calcular los valores del módulo de corte (G). Se presenta para cada murete su respectiva gráfica F-D en las que se refleja el comportamiento del murete hasta que se retiran los dispositivos LVDT a aproximadamente 60% de la carga máxima para no dañar los dispositivos. La tabla 7.8 resume los cálculos realizados y presenta el módulo de corte de los muretes ensayados y la desviación estándar del conjunto de datos. Para obtener los valores presentados en la tabla 7.8 se trabaja con porcentajes de la fuerza máxima registrada para cada murete, esto se debe a que los primeros valores registrados por los instrumentos muestran el proceso de acomodamiento entre el murete y el dispositivo de aplicación de carga. En el límite inferior se trabaja con el 20% de la carga máxima, mientras que para el límite superior se trabaja con el 40% de la carga máxima mientras este valor sea coherente con la zona elástica.

Como siguiente parte del análisis de resultados se calcula el módulo de corte para cada murete, se presenta la tabla 7.8 con los resultados. Para este caso sin reforzamiento se trabajó con un intervalo de fuerzas entre el 20% y 40% de la carga máxima en cada uno de los muretes tal como se comentó al iniciar el acápite.

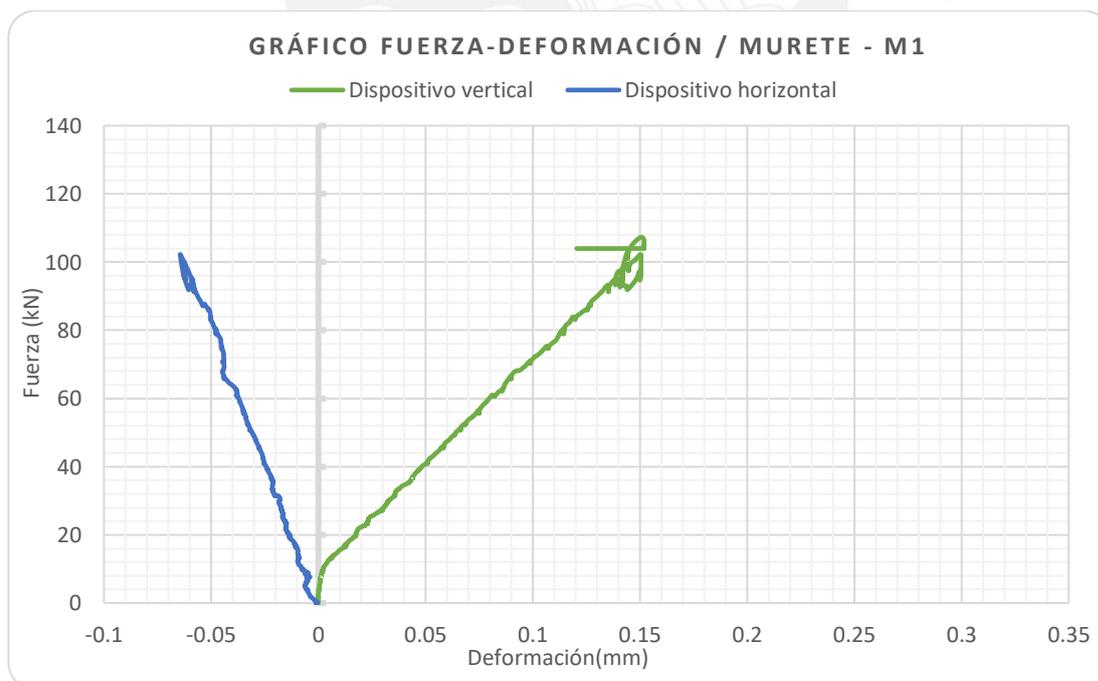
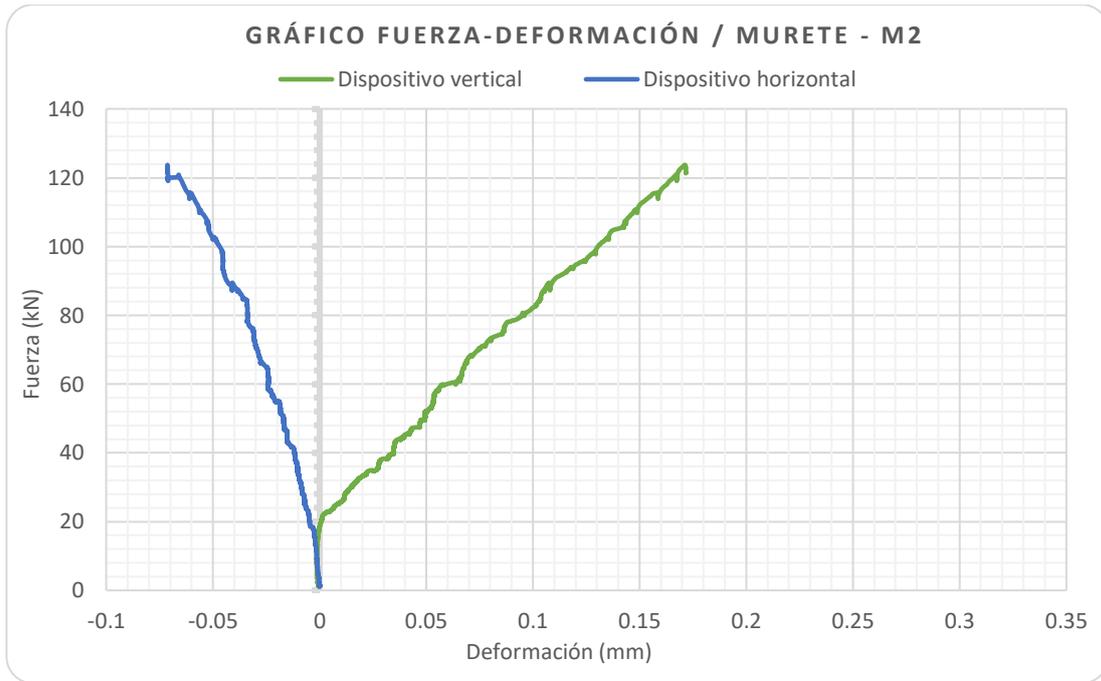
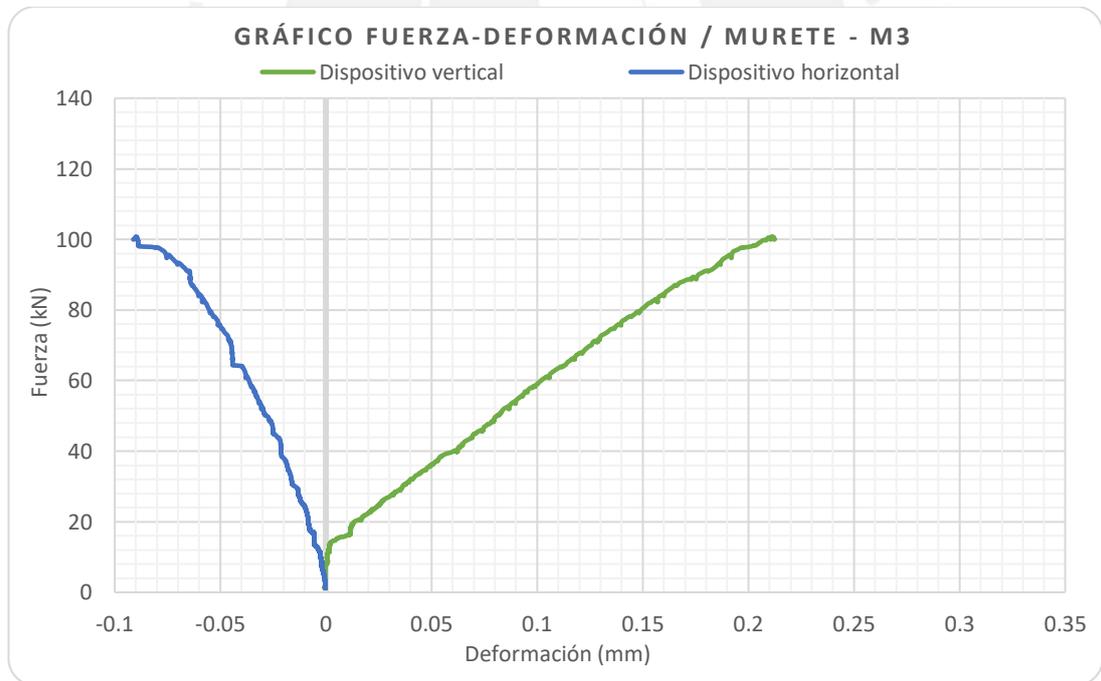


Figura 7-10. Gráfica Fuerza-Deformación en murete M-1.



**Figura 7-11. Gráfica Fuerza-Deformación en murete M-2.**



**Figura 7-12. Gráfica Fuerza-Deformación en murete M-3.**

**Tabla 7.8. Cálculo de módulo de corte en muretes sin refuerzo.**

Especimen	Tipo de reforzamiento	Distancia vertical	Distancia horizontal	Área	$\Delta P$	$\Delta D$ vertical	$\Delta D$ horizontal	$G = \Delta\tau / \Delta\gamma$
		LVDT (mm)	LVDT (mm)	(mm <sup>2</sup> )	(N)	(mm)	(mm)	MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
M-1	Sin reforzamiento	400	402	114348	29607	0.0464	0.0183	1603 (16346)
M-2	Sin reforzamiento	401	400	116464	27186	0.0417	0.0112	1768 (18028)
M-3	Sin reforzamiento	400	400	118292	19995	0.0472	0.0128	1127 (11490)
G promedio								1499 (15288)
Desviación estándar								333 (3395)

El módulo de corte promedio es igual a **1500 MPa**, un valor significativo para este tipo de unidades de albañilería. (SENCICO, Norma E.070, 2007). Y una desviación estándar alrededor de **330 MPa**. Estos valores son la base de comparación para los siguientes muretes reforzados.

### 7.2.2 MURETES REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA

El refuerzo ayudó a que la falla del prisma se dé de manera lenta y progresiva, este comportamiento se manifestó en las tres muestras ensayadas. En la tabla 7.9 se aprecian los resultados del presente grupo en los que se destacan los dos últimos ensayos por tener la mayor resistencia. ME-1 tuvo una falla lenta, pero inesperada, por lo que el ensayo se tuvo que detener al presentarse la primera grieta para poder retirar los dispositivos LVDT del murete, por esta razón la falla se presentó mientras se le estaba aplicando una carga constante después de un intervalo considerable de tiempo. Sin embargo, los dos ensayos siguientes revelaron un comportamiento muy similar entre ellos, obteniendo una resistencia a corte similar. Esto es un indicador que la malla electrosoldada en estos dos muretes llegó a aportar significativamente en la resistencia obtenida.

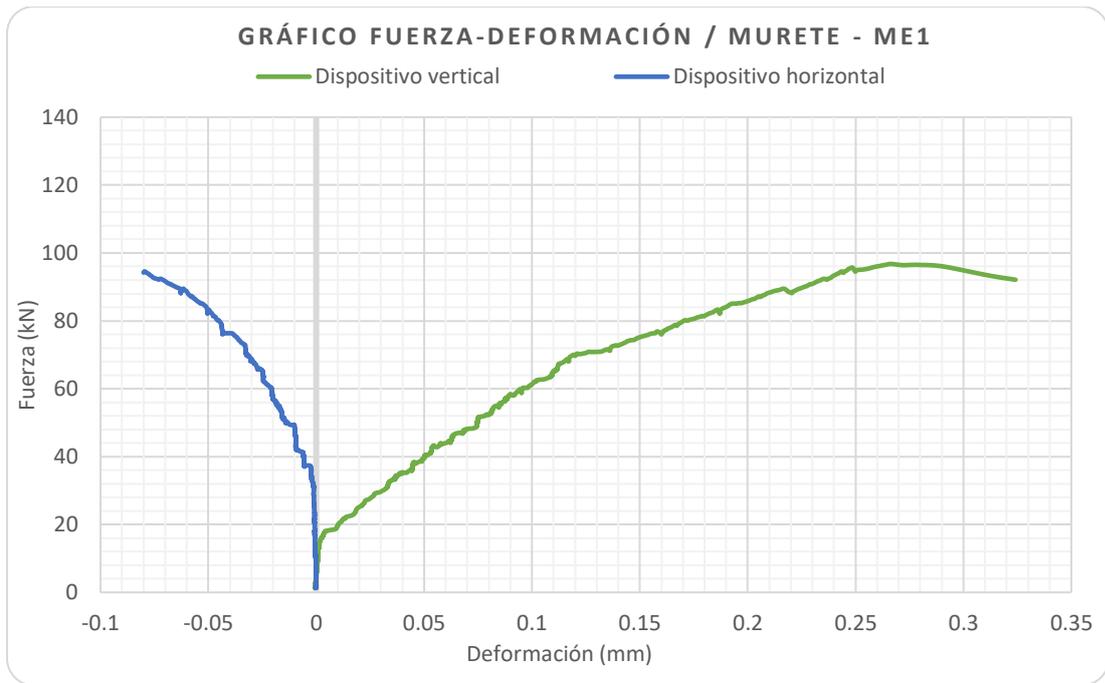
La resistencia característica a corte de los muretes reforzados con malla electrosoldada fue de **0.8 MPa**, valor de resistencia por debajo que los muretes sin reforzar (**0.9 MPa**), esto representa una disminución del 5% en comparación a los muretes sin reforzar, valores prácticamente iguales para fines ingenieriles. A continuación, se muestran las gráficas de fuerza-deformación (F-D) de los tres muretes reforzados con malla electrosoldada.

**Tabla 7.9. Cálculo de v'm en muretes reforzados con malla electrosoldada.**

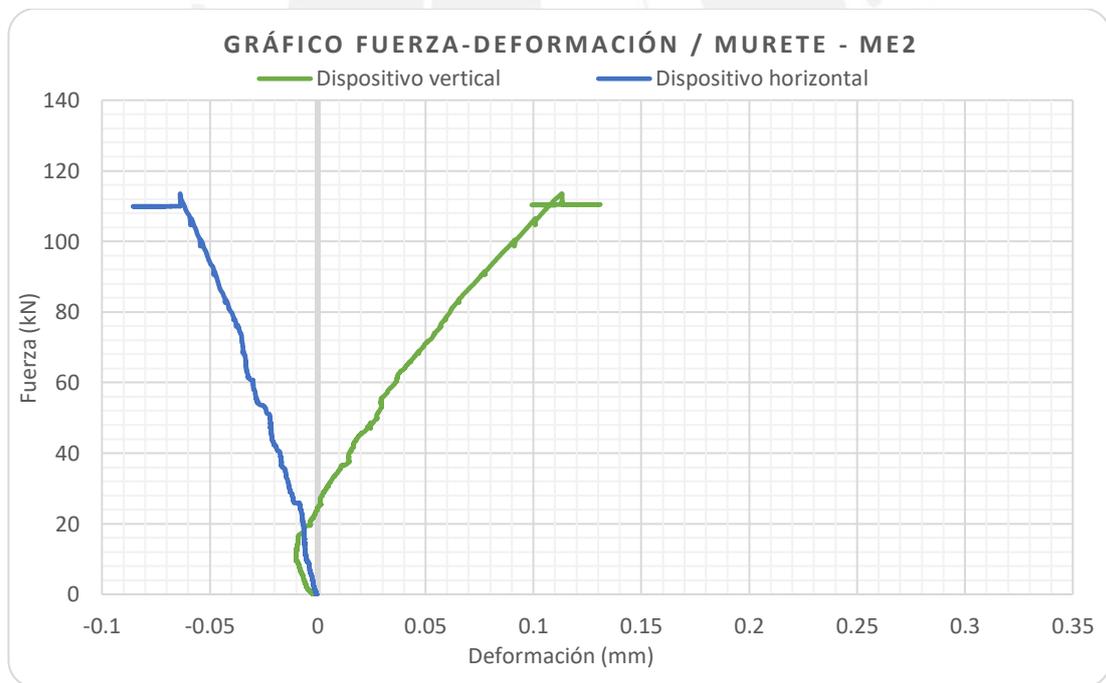
Especimen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones				Área de corte (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	vm MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)	Diagonal (mm)			
ME-1	Malla electrosoldada	603	620	138	865	119353	96.8	0.8 (8.3)
ME-2	Malla electrosoldada	605	623	143	868	124184	137.4	1.1 (11.3)
ME-3	Malla electrosoldada	597	615	140	857	119995	137.3	1.1 (11.7)
Promedio								1 (10.4)
Desviación Estándar								0.2 (1.9)
v'm								0.8 (8.5)

Los valores de la gráfica utilizados para calcular el módulo de corte se obtuvieron de la zona con pendiente más representativa en la gráfica, tal cual se mencionó en el acápite anterior. En la tabla 7.10 se muestran los resultados del grupo de ensayos para malla electrosoldada.

El valor determinado de módulo de corte para estos muretes es igual a **1422 MPa** aproximadamente. Esto indica que el refuerzo con malla electrosoldada tuvo un comportamiento similar a los ensayos sin refuerzo. Un valor inusual es el del murete ME-2 en el que el módulo de corte es notablemente mayor que todos los especímenes hasta ahora analizados. El estudio del comportamiento mecánico prosigue con muretes reforzados con el sistema TRM con textiles a base de fibra de basalto y fibra de acero galvanizado.



**Figura 7-13. Gráfica Fuerza-Deformación en murete ME-1.**



**Figura 7-14. Gráfica Fuerza-Deformación en murete ME-2.**

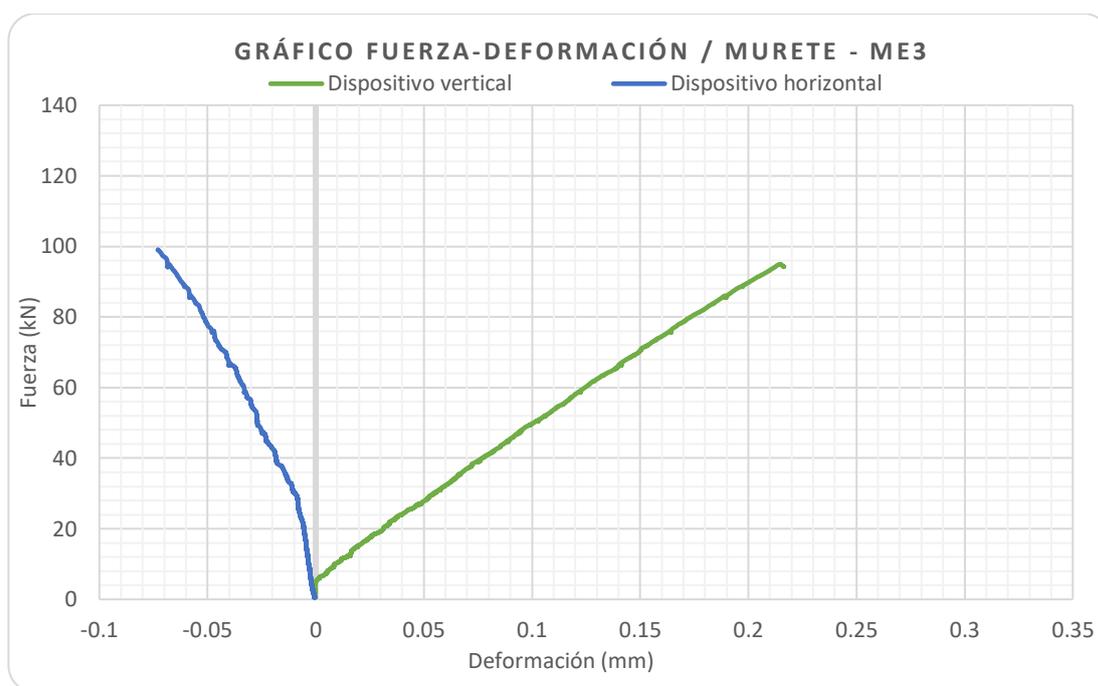


Figura 7-15. Gráfica Fuerza-Deformación en murete ME-3.

Tabla 7.10. Cálculo de módulo de corte de muretes reforzados con malla electrosoldada.

Especimen	Tipo de reforzamiento	Distancia vertical	Distancia horizontal	Área	$\Delta P$	$\Delta D$ vertical	$\Delta D$ horizontal	$G=\Delta\tau/\Delta\gamma$
		LVDT (mm)	LVDT (mm)					mm <sup>2</sup>
ME-1	Malla electrosoldada	401	400	119353	9703	0.0164	0.0104	1215 (12391)
ME-2	Malla electrosoldada	400	402	124184	27163	0.0281	0.0162	1979 (20185)
ME-3	Malla electrosoldada	400	400	119995	27403	0.0638	0.0215	1071 (10925)
G Promedio								1422 (14500)
Desviación estándar								488 (4977)

### 7.2.3 MURETES REFORZADOS CON SISTEMA TRM DE FIBRA DE BASALTO.

El presente refuerzo elevó considerablemente la resistencia característica de este grupo de ensayos. La falla nuevamente se da de manera lenta y progresiva en los muretes, contrario al tipo de falla encontrado en los primeros ensayos base en muretes sin reforzamiento alguno. En la tabla 7.11 se resumen los resultados de los especímenes

ensayados. La desviación estándar en este grupo es baja en comparación a los dos anteriores, lo que da indicios a que los resultados sean más precisos y confiables.

**Tabla 7.11. Cálculo de  $v'm$  en muretes reforzados con TRM de malla de fibra de basalto.**

Especímen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones				Área de corte (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	vm MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)	Diagonal (mm)			
MB-1	Malla de fibra de basalto	606	617	145	865	125688	188.4	1.5 (15.3)
MB-2	Malla de fibra de basalto	607	622	144	869	125150	173.5	1.4 (14.1)
MB-3	Malla de fibra de basalto	609	623	147	871	128359	174.3	1.4 (13.8)
							Promedio	1.4 (14.4)
							Desviación Estándar	0.1 (0.8)
							$v'm$	1.3 (13.7)

La resistencia característica a corte de los muretes reforzados con TRM de malla de fibra de basalto fue de **1.3 MPa**, valor de resistencia superior a los muretes sin reforzar (**0.9 MPa**), esto representa un aumento del 52%, resultados concorde con la tendencia en las pilas reforzadas del mismo material. El confinamiento de los muretes puede ser el factor principal para el aumento de resistencia en estos especímenes. Se muestran las gráficas de fuerza-deformación (F-D) de los tres muretes reforzados con el sistema TRM de fibra de basalto (ver figuras 7-16 a 7-18).

Los valores de la gráfica utilizados para calcular el módulo de corte se obtuvieron de la zona con pendiente más representativa en la gráfica, tal cual se realizó en los especímenes anteriores. En la tabla 7.12 se muestran los resultados del grupo de muretes reforzados con sistema TRM de fibra de basalto. El valor determinado de módulo de corte para estos muretes es igual a **1300 MPa** aproximadamente. Esto indica que el refuerzo con sistema TRM de fibra de basalto no aportó rigidez para el ensayo de compresión diagonal. Se registró una baja de **1500 MPa** en los muretes sin refuerzo al valor obtenido de **1300 MPa**, lo cual representa una disminución del 10%. Esta disminución de valor en el módulo de corte se pudo haber producido por diferentes factores tales como el tipo de mortero empleado, en estos especímenes se empleó un mortero con relación 1:3 de cemento cal para una mejor interacción con la malla de fibra de basalto. Otro factor que pudo haber influenciado en las propiedades es la edad de ensayo y las condiciones de almacenamiento y temperatura en el transcurso de las dos etapas de ensayos; variaciones

entre mecanismos empleados en los ensayos, así como otras posibles variables que serían recomendable estudiar en otras investigaciones.

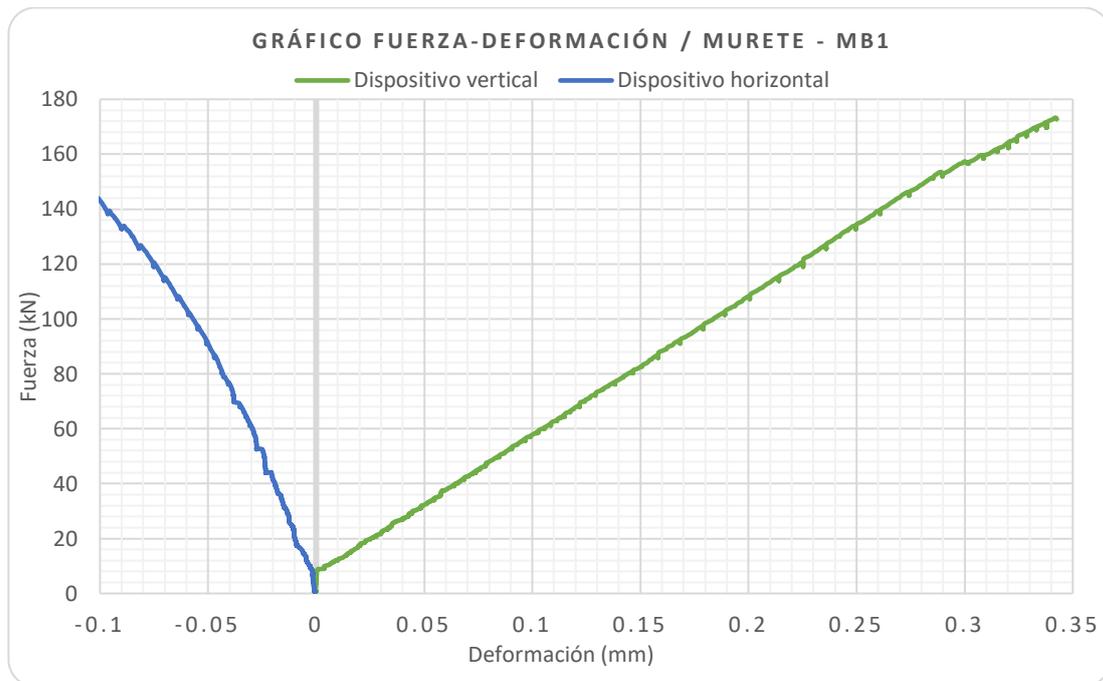


Figura 7-16. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MB-1.

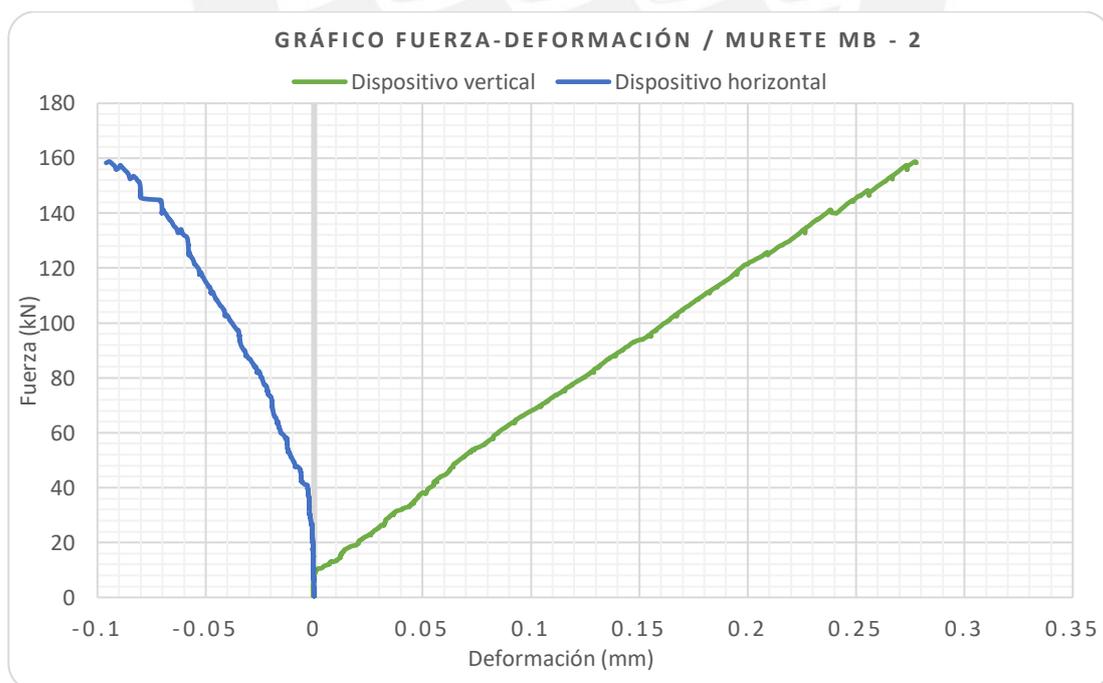


Figura 7-17. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MB-2.

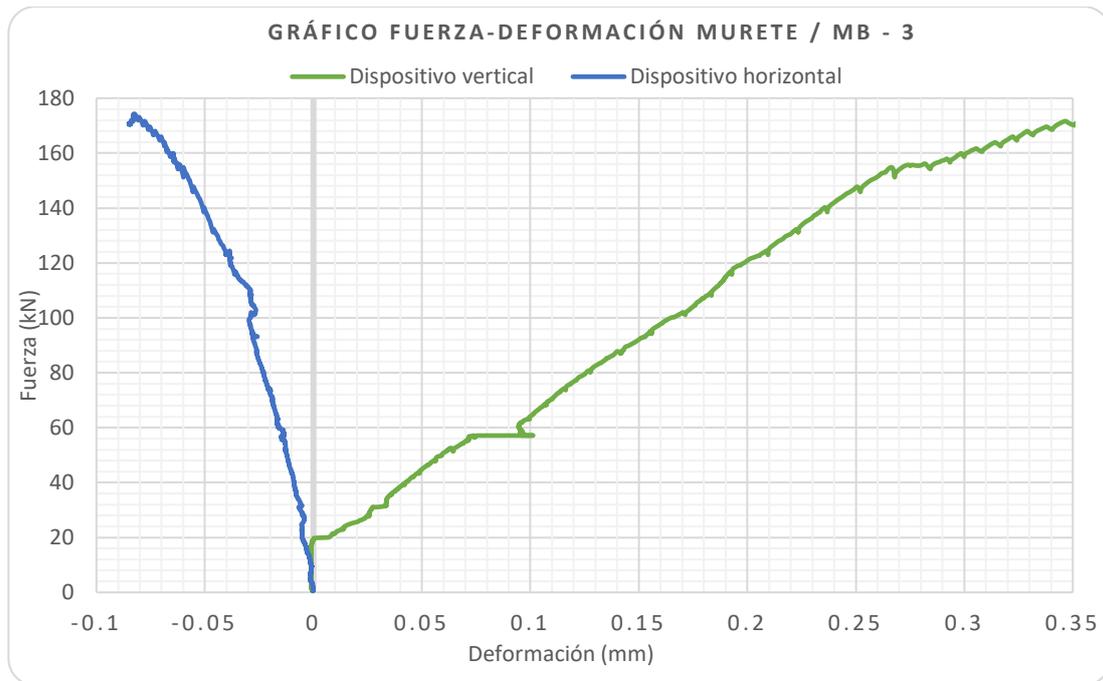


Figura 7-18. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MB-3.

Tabla 7.12. Cálculo de módulo de corte de muretes reforzados con TRM de malla de fibra de basalto.

Especímen	Tipo de reforzamiento	Distancia vertical	Distancia horizontal	Área (mm <sup>2</sup> )	$\Delta P$ (N)	$\Delta D$ vertical (mm)	$\Delta D$ horizontal (mm)	$G = \Delta\tau / \Delta\gamma$
		LVDT (mm)	LVDT (mm)					MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
MB-1	Malla de fibra de basalto	405	400	125688	38656	0.0765	0.0215	1268 (12927)
MB-2	Malla de fibra de basalto	400	400	125150	17372	0.0331	0.0081	1347 (13735)
MB-3	Malla de fibra de basalto	400	395	128359	34994	0.0741	0.0114	1273 (12979)
G promedio								1296 (13214)
Desviación estándar								44 (452)

#### 7.2.4 MURETES REFORZADOS CON SISTEMA TRM DE FIBRA DE ACERO GALVANIZADO.

El presente refuerzo, como su antecesor, elevó considerablemente la resistencia característica a corte respecto al espécimen sin reforzar. El tipo de falla se da nuevamente de manera lenta y progresiva en los muretes, contrario al tipo de falla encontrado en los primeros ensayos base en muretes sin reforzamiento alguno. En la tabla 7.13 se resumen los resultados de los especímenes ensayados. Por otro lado, al igual que en el caso

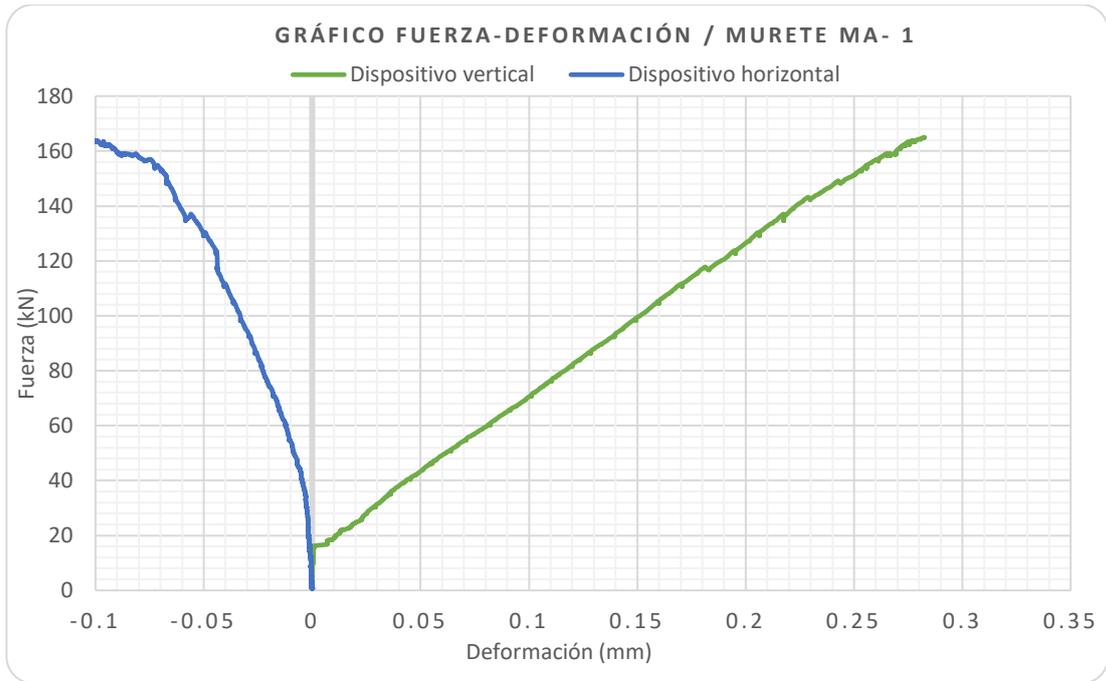
anterior, la desviación estándar es mucho menor que los ensayos realizados en M-1,2,3 y ME-1,2,3.

**Tabla 7.13. Cálculo de  $v'm$  en muretes reforzados con TRM de malla de fibra de acero galvanizado.**

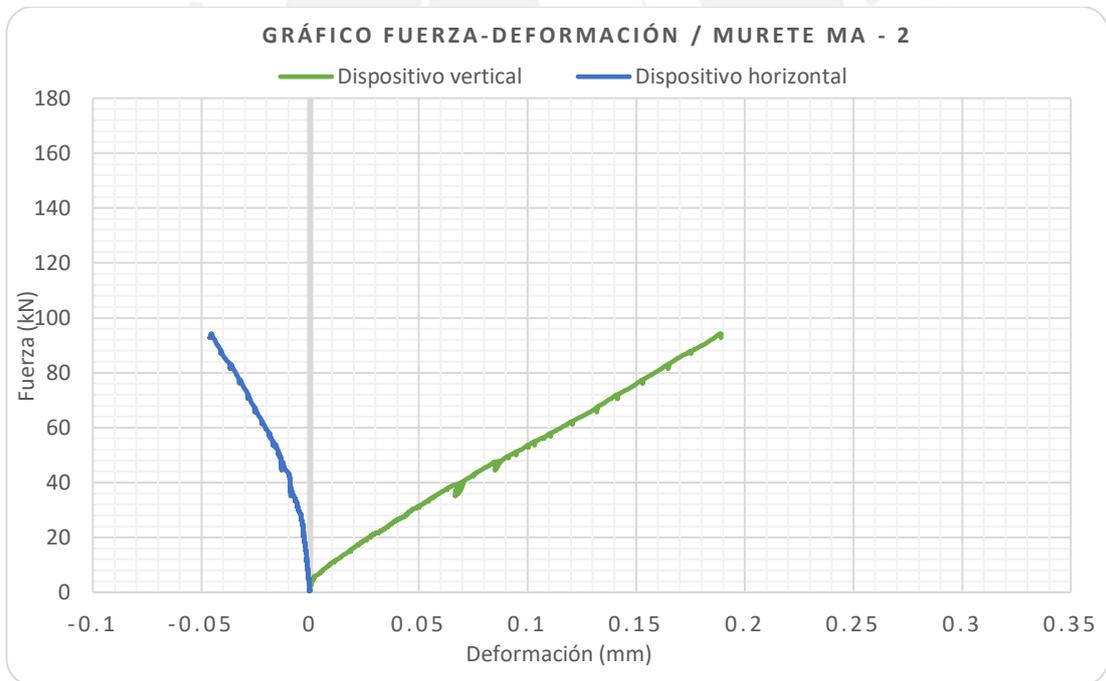
Especimen	Tipo de reforzamiento	Dimensiones				Área de corte (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	vm MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
		Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)	Diagonal (mm)			
MA-1	Malla de fibra de acero galvanizado	612	621	140	872	122355	166.7	1.4 (13.9)
MA-2	Malla de fibra de acero galvanizado	622	619	139	878	121976	161.9	1.3 (13.5)
MA-3	Malla de fibra de acero galvanizado	602	624	140	867	121387	162.3	1.3 (13.6)
Promedio								1.3 (13.7)
Desviación Estándar								0.02 (0.2)
$v'm$								1.3 (13.5)

La resistencia característica a corte de los muretes reforzados con sistema TRM de fibra de acero galvanizado es de **1.3 MPa**, valor de resistencia superior a los muretes sin reforzar (**0.9 MPa**), esto representa un aumento del 40%. Además, el resultado es prácticamente el mismo, para interpretaciones ingenieriles, que el valor obtenido en el sistema TRM de fibra de basalto, lo que nos da indicios que el reforzamiento para ambos sistemas da buenos resultados y, además, parejos. El confinamiento de los muretes puede ser el factor principal para el aumento de resistencia en estos especímenes. En las figuras 7-19 a 7-21 se muestran las gráficas de fuerza-deformación (F-D) de los tres muretes reforzados con el sistema TRM de fibra de basalto. Se puede observar que para el murete MA-2 (ver figura 7-20) se retiraron los dispositivos LVDT a temprana edad a comparación de los otros dos muretes.

Los valores de la gráfica utilizados para calcular el módulo de corte se obtuvieron de la zona con pendiente más representativa en la gráfica, tal cual se realizó en los especímenes anteriores. En la tabla 7.14 se muestran los resultados del grupo de muretes reforzados con sistema TRM de fibra de acero galvanizado.



**Figura 7-19. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MA-1.**



**Figura 7-20. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MA-2.**

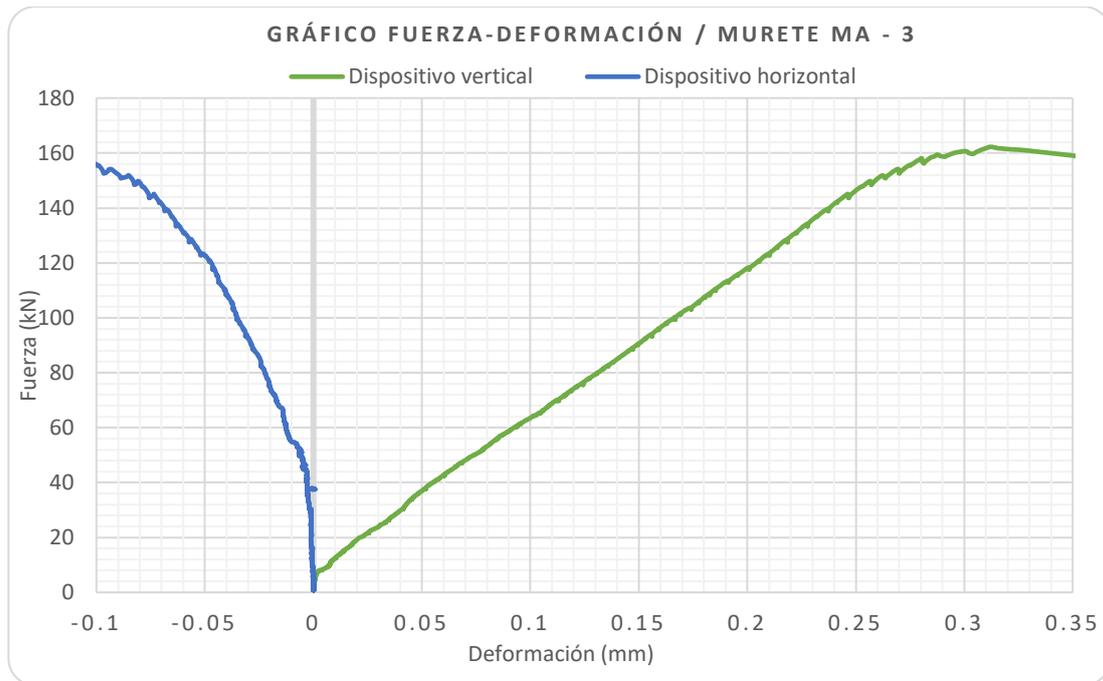


Figura 7-21. Gráfica Fuerza-Deformación en murete MA-3.

Tabla 7.14. Cálculo de módulo de corte de muretes reforzados con TRM de malla de fibra de acero galvanizado.

Especímen	Tipo de reforzamiento	Distancia vertical	Distancia horizontal	Área	$\Delta P$	$\Delta D$ vertical	$\Delta D$ horizontal	$G = \Delta\tau / \Delta\gamma$
		LVDT (mm)	LVDT (mm)	mm <sup>2</sup>	N	mm	mm	MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
MA-1	Malla de fibra de acero galvanizado	400	400	122355	16661	0.0314	0.0070	1418 (14461)
MA-2	Malla de fibra de acero galvanizado	405	400	121976	16200	0.0376	0.0106	1114 (11364)
MA-3	Malla de fibra de acero galvanizado	400	400	121387	16193	0.0320	0.0088	1305 (13306)
							G promedio	1279 (13044)
							Desviación estándar	153 (1565)

El valor determinado de módulo de corte para estos muretes es igual a **1280 MPa** aproximadamente. Esto indica que, al igual que en el caso anterior, el refuerzo con sistema TRM de fibra de acero galvanizado no aportó rigidez para el ensayo de compresión diagonal. Se registró una baja de **1500 MPa** en los muretes sin refuerzo al valor obtenido igual a **1280 MPa**, lo cual representa una disminución del 10%. Esta disminución en el valor en el módulo de corte se pudo haber producido por diferentes

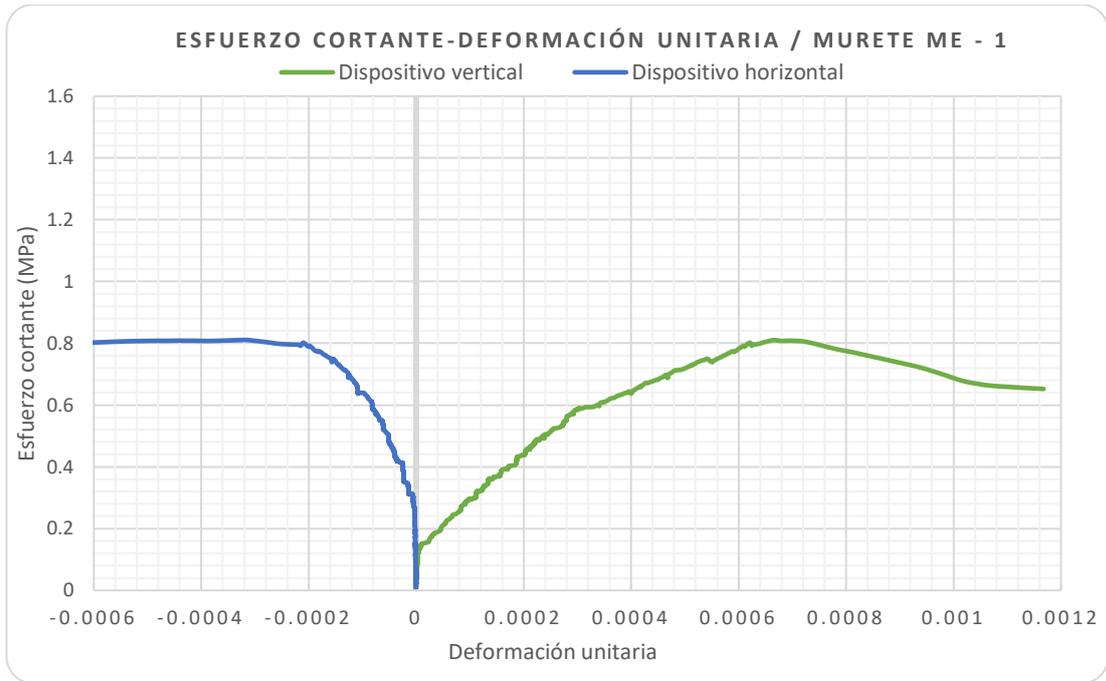
factores mencionados para el caso anterior, sin embargo, se recomienda seguir estudiando el refuerzo con variación de diversos parámetros para poder tener un estudio más completo y acertado.

Los dos refuerzos con sistema TRM han aportado mayor resistencia en compresión axial y en corte. Estos resultados son alentadores en el estudio de estos refuerzos ya que no solo aumenta la ductilidad y cambia el tipo de falla, sino que la resistencia última ha aumentado notoriamente en ambos casos. Se prevé que se podría esperar un mejor comportamiento estructural tanto en estas “probetas” como en un muro de escala natural o una edificación hecha con un sistema de refuerzo similar al estudiado. En caso los resultados de las futuras investigaciones sigan la misma tendencia, se podría predecir un mejor comportamiento sísmico en las edificaciones reforzadas similarmente, lo que podría ayudar a solucionar la problemática planteada inicialmente ante un eventual evento sísmico que afecte las ciudades del Perú.

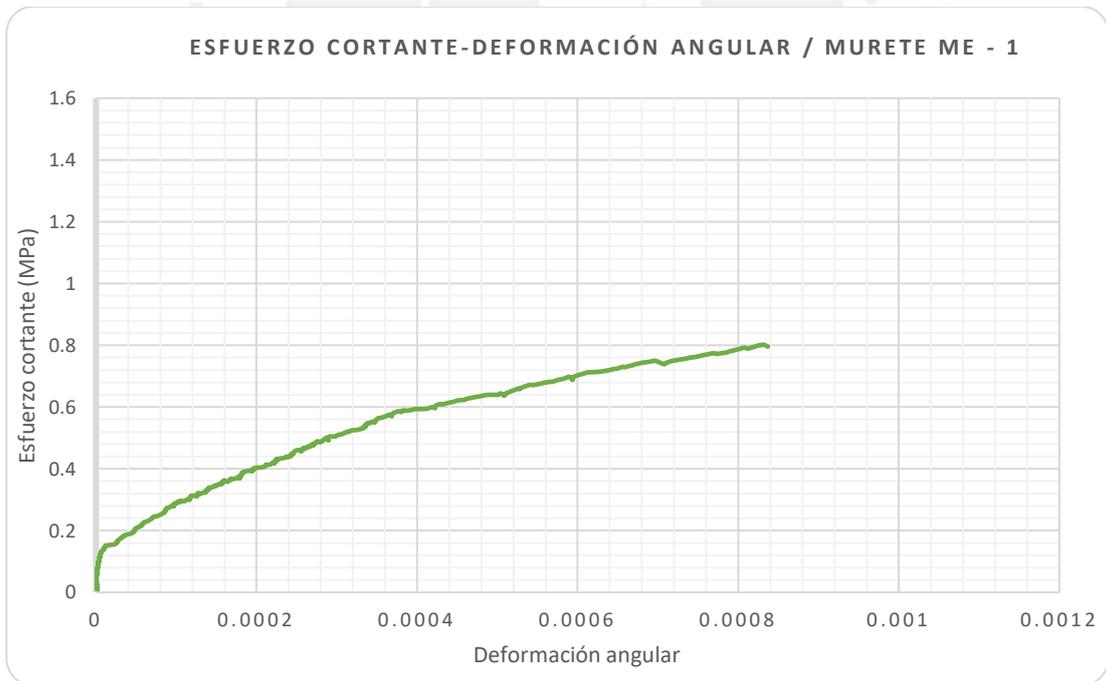
#### **7.2.5 GRÁFICAS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN UNITARIA**

Como parte del análisis de resultados se brindan las curvas de esfuerzo cortante vs deformación unitaria y angular en los muretes de albañilería reforzados con malla electrosoldada, refuerzos con sistema TRM de basalto y acero galvanizado. Para cada uno de estos refuerzos se seleccionó el ensayo con más datos registrados. Se muestran los gráficos para ME-1, MB-1 y MA-3. Se comienza por los gráficos de esfuerzo-deformación unitaria para proseguir con los de esfuerzo-deformación angular.

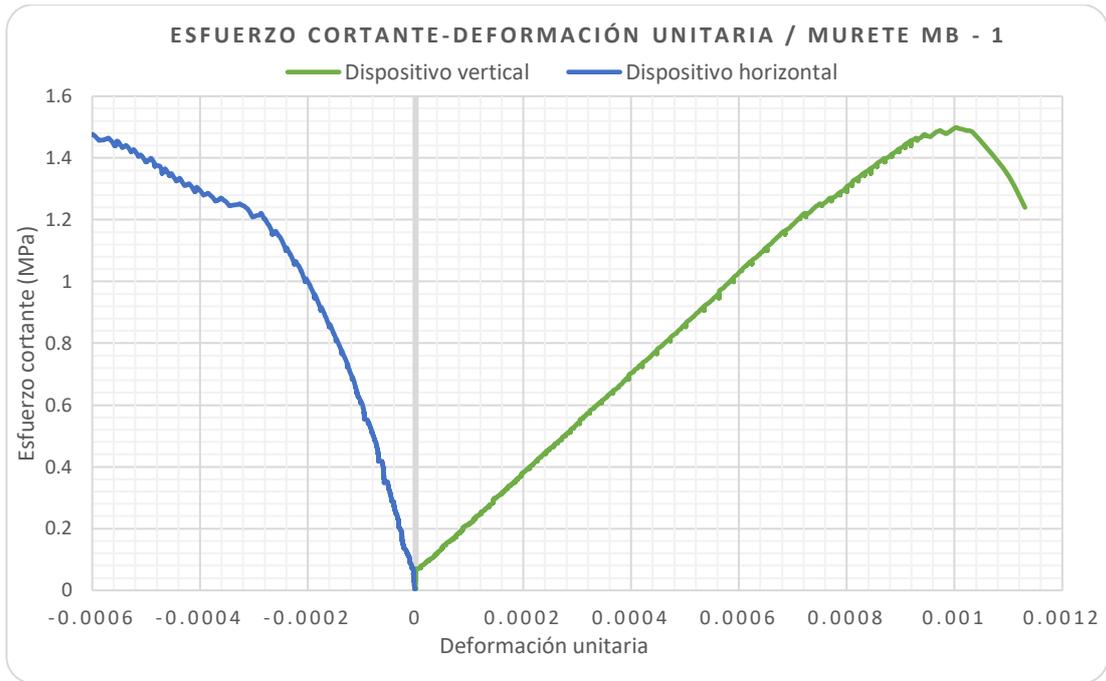
Las gráficas de esfuerzo- deformación unitaria muestran la tendencia del material reforzado hasta empezar el comportamiento no lineal y la mayor eficacia en el refuerzo del sistema TRM con basalto y acero galvanizado. Las presentes gráficas son mostradas con fines a servir de base en futuras investigaciones del comportamiento y modelación numérica de la albañilería reforzada con los mismos materiales. A motivo de resumen, se presenta la tabla 7.15, en la que se exponen los parámetros estudiados de los especímenes sin reforzar (SR), reforzado con malla electrosoldada (ME), sistema de mortero reforzado con fibras de basalto y acero galvanizado (BTRM y AGTRM).



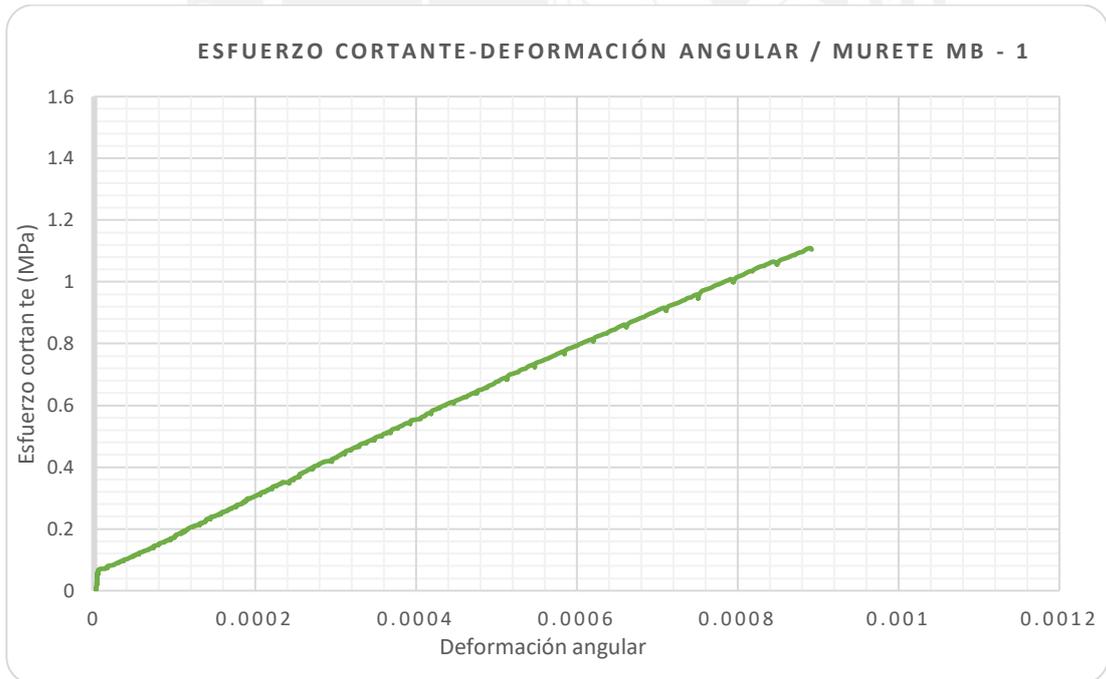
**Figura 7-22. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete ME-1.**



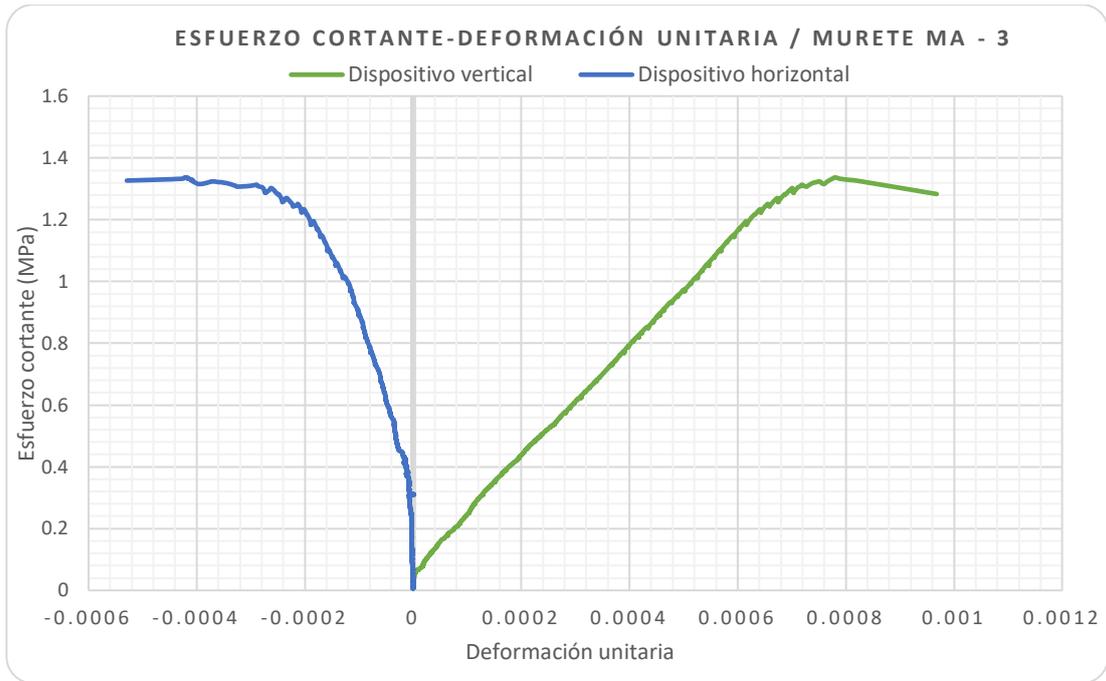
**Figura 7-23. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación angular en murete ME-1.**



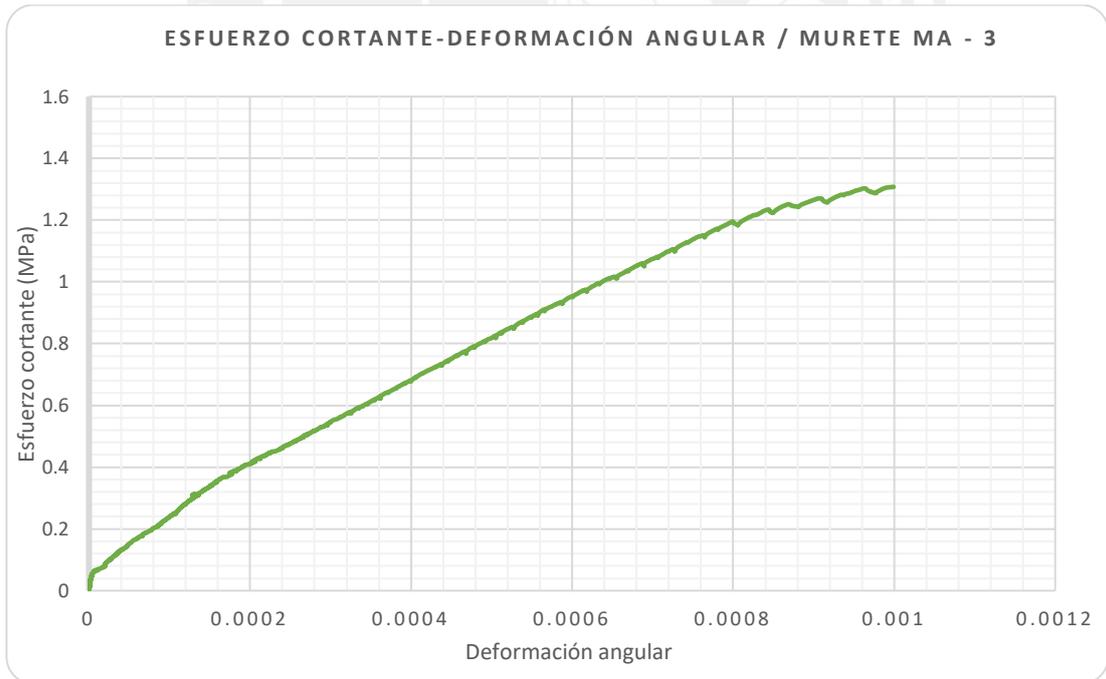
**Figura 7-24. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MB-1.**



**Figura 7-25. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MB-1.**



**Figura 7-26. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MA-3.**



**Figura 7-27. Gráfica Esfuerzo cortante-Deformación unitaria en murete MA-3.**

**Tabla 7.15. Resumen de resultados para los tres refuerzos estudiados.**

<b>Tipo de reforzamiento</b>	<b>f'm MPa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Em MPa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>v'm MPa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Gm MPa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>SR</b>	1.8 (18.4)	2960 (30186)	0.9 (8.9)	1499 (15288)
<b>ME</b>	1.7 (17.1)	3174 (32366)	0.8 (8.5)	1422 (14500)
<b>BTRM</b>	3.3 (33.5)	3603 (36743)	1.3 (13.7)	1296 (13214)
<b>AGTRM</b>	-	-	1.3 (13.5)	1279 (13044)



## 8 ANÁLISIS DE COSTOS

En el presente capítulo se presenta un breve análisis de costo-beneficio para los refuerzos estudiados en la campaña de ensayos realizados. Para esto, se realiza un análisis de precios unitarios por m<sup>2</sup> de muros de albañilería. Se comparan los costos de cada partida y se relacionan con el incremento de propiedades mecánicas obtenidas a partir del refuerzo analizado. Se darán recomendaciones y comentarios al finalizar el capítulo.

Para el análisis de precios unitarios se tiene como asunción de la construcción de 4 muros de albañilería tubular a escala natural. Se considera en primera instancia la construcción de un muro sin reforzamiento alguno con tarrajeo por ambas caras (Tabla 8.1). Posteriormente, para cada refuerzo estudiado, se plantea la construcción de un muro de albañilería reforzado por ambas caras y tarrajeado para invisibilizar el refuerzo.

Para el cálculo de rendimientos y precio de mano de obra han sido considerados como referencia la tesis de Araoz y Velezmoro (2012) además del personal obrero encargado de la construcción en el laboratorio de la PUCP con más de 25 años de experiencia. El metrado y precios unitarios de los materiales han sido obtenidos a partir del rendimiento de la ficha técnica de los productos empleados, datos brindados por los proveedores y en base al mercado actual en la región Lima.

En el cálculo del reforzamiento empleado por metro cuadrado de muro se ha considerado una merma de alrededor del 20% para tener en cuenta el traslape que se debe utilizar por muro para un correcto funcionamiento. Se presentan los análisis de precios unitarios para cada condición de refuerzo.

**Tabla 8.1. Análisis de precios unitarios para muro no reforzado.**

<b>Muro no reforzado</b>					
<b>Rendimiento</b>	m2/día	<b>9.68</b>	<b>Costo unitario directo por: m2 (S/.)</b>		<b>84.10</b>
<b>Descripción Recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>
<b>Mano de Obra</b>					
Operario	hh	1.00	0.8264	20.10	16.6
Peón	hh	1.00	0.8264	14.85	12.3
					<b>28.9</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo Pandereta Acanalado	und		40	0.47	18.8
Mortero TOPEX Asentado 40Kg	bolsa		1.46	11.90	17.4
Mortero TOPEX Tarrajeo 40Kg	bolsa		1.52	11.90	18.1
					<b>54.3</b>
<b>Equipos</b>					
Herramientas manuales	%mo		3.00	28.88	0.9
					<b>0.9</b>

**Tabla 8.2. Análisis de precios unitarios para muro reforzado con Malla Electrosoldada.**

<b>Muro con Malla Electrosoldada</b>					
<b>Rendimiento</b>	m2/día	<b>7.74</b>	<b>Costo unitario directo por: m2 (S/.)</b>		<b>102.08</b>
<b>Descripción Recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>
<b>Mano de Obra</b>					
Operario	hh	1.00	1.0336	20.10	20.8
Peón	hh	1.00	1.0336	14.85	15.4
					<b>36.1</b>
<b>Materiales</b>					
Ladrillo Pandereta Acanalado	un		40	0.47	18.8
Mortero TOPEX Asentado 40Kg	bolsa		1.46	11.90	17.4
Mortero TOPEX Tarrajeo 40Kg	bolsa		1.52	11.90	18.1
Malla Electrosoldada QE-106	m2		2.20	4.55	10.0
Alambre #16	kg		0.25	2.44	0.6
					<b>64.9</b>
<b>Equipos</b>					
Herramientas manuales	%mo		3.00	36.12	1.1
					<b>1.1</b>

**Tabla 8.3. Análisis de precios unitarios para muro reforzado con sistema TRM de fibra de basalto.**

<b>Muro con Sistema TRM de Malla de Fibra de Basalto</b>						
<b>Rendimiento</b>	m2/día	<b>8.7</b>	<b>Costo unitario directo por: m2 (S/.)</b>			<b>171.80</b>
<b>Descripción Recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>	
<b>Mano de Obra</b>						
Operario	hh	1	0.9195	20.10	18.5	
Peón	hh	1	0.9195	14.85	13.7	
					<b>32.1</b>	
<b>Materiales</b>						
Ladrillo Pandereta Acanalado	und		40	0.47	18.8	
Mortero TOPEX Asentado 40Kg	bolsa		1.46	11.90	17.4	
Cemento Portland Tipo 1	bolsa		0.33	22.70	7.5	
Arena Fina	m3		0.02	50.00	1.0	
Cal Comacsa	bolsa		0.24	19.90	4.8	
Geogrid 200 (fibra de basalto)	ml		2.64	33.80	89.2	
					<b>138.6</b>	
<b>Equipos</b>						
Herramientas manuales	%mo		3	36.12	1.1	
					<b>1.1</b>	

**Tabla 8.4. Análisis de precios unitarios para muro reforzado con sistema TRM de fibra de Acero Galvanizado.**

<b>Muro con Sistema TRM de Malla de fibra de Acero Galvanizado</b>						
<b>Rendimiento</b>	m2/día	<b>8.2</b>	<b>Costo unitario directo por: m2 (S/.)</b>			<b>172.26</b>
<b>Descripción Recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>	
<b>Mano de Obra</b>						
Operario	hh	1	0.9756	20.1	19.6	
Peón	hh	1	0.9756	14.85	14.5	
					<b>34.1</b>	
<b>Materiales</b>						
Ladrillo Pandereta Acanalado	und		40	0.47	18.8	
Mortero TOPEX Asentado 40Kg	bolsa		1.46	11.9	17.4	
Cemento Portland Tipo 1	bolsa		0.33	22.7	7.5	
Arena Fina	m3		0.02	50.0	1.0	
Cal Comacsa	bolsa		0.24	19.9	4.8	
GeoSteel G600 (fibra de acero)	ml		1.54	56.95	87.7	
					<b>137.1</b>	
<b>Equipos</b>						
Herramientas Manuales	%mo		3	34.1	1.0	
					<b>1.0</b>	

Se resumen los costos por metro cuadrado de muro en la tabla 8.5, donde se realiza un análisis de costo-beneficio en torno a las resistencias características en compresión y corte. Se calcula cuánto ha aumentado el costo de la construcción por la presencia de refuerzo y, además, un ratio de variación de resistencia característica con el aumento del costo, en donde el sistema con un mejor comportamiento con el menor costo tendrá un valor mayor.

Es evidente que los sistemas de reforzamiento más costosos es los TRM con malla de fibra de basalto seguido y malla de acero galvanizado. Ambos refuerzos tienen resultados cercanos en resistencia característica al corte, por lo que el ratio de eficiencia es mayor para el BTRM. Reforzar muros con estos dos sistemas tiene un costo similar y los beneficios de ambos refuerzos hacen que las dos opciones sean consideradas como un refuerzo óptimo para estas condiciones.

**Tabla 8.5. Comparación de costos para cada tipo de refuerzo.**

	SR	ME	BTRM	AGTRM
<b>Costo (S/.)</b>	<b>84.1</b>	<b>102.08</b>	<b>171.8</b>	<b>172.26</b>
<b><math>\Delta</math> Costo</b>	0%	21%	104%	105%
<b>f'm (MPa)</b>	<b>1.8</b>	<b>1.7</b>	<b>3.3</b>	-
<b><math>\Delta</math>f'm</b>	0%	-6%	83%	-
<b><math>\Delta</math>f'm/<math>\Delta</math>Costo</b>	0	-0.26	0.80	-
<b>v'm (MPa)</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>
<b><math>\Delta</math>v'm</b>	0%	-11%	44%	44%
<b><math>\Delta</math>v'm/<math>\Delta</math>Costo</b>	0	-0.52	0.43	0.42

## 9 CONCLUSIONES

En este último capítulo se recopilan y resumen los valores obtenidos en el análisis de datos. Además, se presentan las conclusiones que refutan o validan las hipótesis planteadas en el Capítulo 1. Se empieza por un análisis cualitativo de los refuerzos empleados con un énfasis en el comportamiento sísmico. Seguidamente, se cuantifica el comportamiento del refuerzo con valores de la resistencia característica a compresión y el módulo de elasticidad. Inmediatamente después se presentan sus análogos para la resistencia característica a corte y su respectivo módulo (G) para luego ser comparados con investigaciones anteriores. Se presentan variables pertinentes con el proceso de ensayos que resultan interesantes de comentar. Se finaliza el capítulo con las conclusiones de aspecto económico y unas breves recomendaciones para una futura línea de investigación.

Como primera observación, a partir de los tipos de falla obtenidos en los ensayos de compresión simple y compresión diagonal, se infiere que estas serán frágiles y explosivas en la medida que no se refuercen los elementos y tenderán a ser dúctiles y graduales una vez reforzados, independientemente de cuál sea el refuerzo. Asimismo, el refuerzo con los sistemas TRM de basalto y acero galvanizado brindaron mejores resultados en cuanto a un aumento de resistencia, en contraste con el uso de mallas electrosoldadas, esto se debió al efecto de confinamiento. Si bien la malla electrosoldada poseía conexiones cada 15 cm, al igual que su respectiva cocada, este no le daba un confinamiento transversal tal como se logró con el uso de mallas de polímeros.

La naturaleza del refuerzo en la malla electrosoldada no permite una manejabilidad tal como las mallas usadas en el sistema TRM permiten. Además, la separación del refuerzo en la malla electrosoldada se presume no es suficiente para el comportamiento deseado. Se alienta a que en futuras investigaciones se estudie el comportamiento con una malla electrosoldada de una cocada menor a la QE-106 de la marca PRODAC. A recomendación de los autores, se puede estudiar la malla QE-139 de la misma marca o similar por tener características que coinciden a la usada en esta investigación con la variación de la separación del refuerzo con un valor de 10 cm de cocada.

Si bien no se tuvo un aumento notable en el esfuerzo último de compresión al utilizar mallas electrosoldadas, se cambió el modo de falla lo que refleja utilidad para fines sísmicos. Además, el aumento de espesor conlleva un aumento de fuerza resistente, aunque la resistencia unitaria (por unidad de área) sea similar al muro sin refuerzo. Por otro lado, al emplear un refuerzo con sistema TRM el aumento de la resistencia fue notorio. Se pudieron controlar las grietas en gran medida por lo que la falla fue lenta y progresiva. Se concluye que este sistema es apto para su uso sismorresistente. Su uso sería beneficioso durante un sismo de gran magnitud para los habitantes, ya que se les daría la oportunidad de poder resguardar sus vidas a pesar de que los muros desarrollen su máxima capacidad y colapsen premeditadamente.

Las fallas en los ensayos de compresión directa se dan por trituración del mismo ladrillo; esto, sumado a la poca sección bruta en la dirección perpendicular a los alveolos, conlleva al colapso del espécimen, característica que limita su uso frente a grandes sollicitaciones de carga vertical. Se corrobora así que las unidades tubulares no son eficientes para su uso en la construcción de viviendas de muros portantes. Esto se refleja en la poca resistencia al corte y compresión según los resultados presentados.

El uso del sistema de reforzamiento con TRM de fibra de basalto aumentó en un **82%** la resistencia característica a compresión, mientras que para la malla electrosoldada los valores de la resistencia característica permanecen similares. Por otro lado, el módulo de elasticidad aumentó en un **22%** con el refuerzo TRM de fibra de basalto en contraste con el aumento del **7%** con mallas electrosoldadas. Esto indica que los refuerzos no están aportando suficiente rigidez axial para limitar las deformaciones en el rango elástico, lo que coincide con las hipótesis iniciales. El confinamiento juega un papel clave en estos resultados. Se puede comentar que la malla electrosoldada presenta una desviación estándar mayor para la resistencia característica como también para el módulo de elasticidad. Se recomienda tener un control más riguroso para la aplicación de este refuerzo.

En algunos ensayos de compresión axial, tales como los presentados en las gráficas de las figuras 7-3 y 7-7 en las pilas P-3 y PB-1 respectivamente, las irregularidades en la colocación del capping y en la instalación de los dispositivos en los prismas

distorsionaron los resultados de deformación registrados por los dispositivos LVDT. Esto involucró una variación significativa en los valores de deformación registrados por los dispositivos LVDT instalados en las caras frontales y traseras de un mismo prisma a ensayar. En la figura 7-3, pila P-3, se visualiza la falta de lecturas en el dispositivo local 1, correspondiente a la parte trasera de la pila, mientras que, para el mismo instante, el dispositivo en la cara frontal ya registraba lecturas de una etapa avanzada del rango elástico. Por este motivo, se decidió no tomar en cuenta las deformaciones en este dispositivo para hacer los cálculos del módulo de elasticidad en el respectivo ensayo. La observación anterior es sustentada por la falla local observada en la cara frontal apreciable en la figura 6-6, en donde se registra la trituración frontal de las unidades tubulares más cercanas al plano de aplicación de cargas. Comportamientos similares se observan en las figuras 6-5, 6-17 y 6-18 en las cuales las dos primeras se tiene una falla local en la zona frontal de las unidades mientras que para el último caso la falla se concentra en la zona posterior.

De la misma forma que en los ensayos de compresión directa, los ensayos de compresión diagonal muestran resultados alentadores para los refuerzos con un sistema TRM de fibra de basalto y acero galvanizado. La resistencia característica a corte aumentó un **53%** y **51%** en los ensayos de basalto y acero respectivamente mientras que en la malla electrosoldada se registró un valor similar a los especímenes sin reforzar. De este modo, se infiere que el uso de la malla electrosoldada QE-106 de 150 mm x 150 mm de cocada como refuerzo en muretes de albañilería tubular no reflejó la mejora esperada en resistencia a corte y compresión, pero sí influyó en el control de la falla.

Con respecto al módulo de corte, las diferencias en las condiciones de los ensayos crean cierta incertidumbre, por lo que los resultados no son los esperados. Se aprecia una reducción del **15%** en ambos sistemas TRM, cuyos ensayos se realizaron un mes posterior a los ensayos iniciales, mientras que en la malla electrosoldada es de apenas **5%**. Si bien en los sistemas de reforzamiento con TRM se tuvieron resultados con variabilidad menor que los realizados en la primera serie de ensayos, es importante recordar que las condiciones en el laboratorio cambian enormemente por múltiples factores entre los que se pueden mencionar el armado de la estructura de ensayos, la calibración de instrumentos, la instalación de los instrumentos, incluso la edad de ensayo

puede tener un papel importante. A pesar de tener una reducción en el módulo de corte, se puede interpretar que los refuerzos empleados no aportaron mayor rigidez y, por lo tanto, no controlaron los desplazamientos en la etapa elástica, sin embargo, su papel desde el inicio de la etapa inelástica es fundamental ya que le proporciona una mayor resistencia y ductilidad.

La normativa de albañilería mantiene unas fórmulas para estimar, con fines de diseño, el módulo de elasticidad a partir de  $f'm$  para diferentes tipos de unidades de albañilería y una única para el módulo de corte. En la tabla 9.1 se presentan los cálculos para cada uno de los refuerzos. Los valores estimados fueron calculados mediante la aplicación de las fórmulas,  $E_m = 500 \cdot f'm$ , para el cálculo del módulo de elasticidad, y  $G_m = 0.4 \cdot E_m$ , según la norma E.070 para unidades macizas. Se considera que los valores estimados por la norma tienden a ser conservadores con respecto a los valores encontrados en estos ensayos.

**Tabla 9.1. Comparación de los valores estimados según la norma peruana E.070.**

Tipo de reforzamiento	$f'm$ (MPa)	$E_m$ (MPa) Estimado = $500 f'm$ (1)	$E_m$ (MPa) Calculado	$G_m$ (MPa) Estimado = $0.4$ $E_m$ (2)	$G_m$ (MPa) Calculado
Sin reforzamiento	1.8	900	2960	360	1499
Malla electrosoldada	1.7	850	3174	340	1422
Malla de fibra de basalto	3.3	1650	3603	660	1296
Malla de fibra de acero galvanizado	-	-	-	-	1279

A manera de comparación, se presenta una recopilación de datos de ensayos en prismas de albañilería tubular realizados en el laboratorio de estructuras de la PUCP (tabla 9.2). Con respecto a la muestra base sin reforzar, se puede comentar que el valor de  $f'm$  está dentro del rango de valores obtenidos en investigaciones pasadas. Al observar la variabilidad de  $f'm$ , es muy notorio lo impredecible que es el comportamiento de las unidades tubulares de albañilería. Por esta razón, se considera un material no confiable para el uso en muros portantes. Los valores de  $E_m$ , sin embargo, son cercanos entre sí sin importar el valor obtenido como resistencia característica. En base a esta tendencia, es posible cuestionar la aplicación de la fórmula de la norma de albañilería a manera de predicción y que relacione el módulo de elasticidad ( $E_m$ ) con la resistencia característica ( $f'm$ ) de pilas con unidades tubulares. Por el lado del esfuerzo cortante, en

investigaciones previas, el valor de  $v'm$  es casi constante e incluso superior a los valores de la tabla 9 de la norma E.070. Se refuerza, de esta manera, la hipótesis que en estas unidades se desarrolla un esfuerzo a corte superior debido a la penetración del mortero dentro de los orificios tubulares horizontales propios de estas unidades.

**Tabla 9.2. Comparación entre propiedades mecánicas de investigaciones anteriores.**

	Sin refuerzo				Malla Electrosoldada			
	f'm MPa	Em MPa	v'm MPa	Gm MPa	f'm MPa	Em MPa	v'm MPa	Gm MPa
Araoz-Velezmoro (2012)	2.35	2530	0.90	-	-	-	-	-
Mamani (2015)	-	-	-	-	2.65	5830	0.9	1274
Sáenz Tenorio (2016)	1.27	2490	0.93	-	-	-	-	-
Díaz-Cevallos (2018)	-	-	0.95	-	-	-	0.84	-
Espinoza-Bazalar (2020)	1.80	2960	0.90	1500	1.70	3170	0.80	1420

Como comentario adicional, el relleno de mortero en las esquinas de los muretes influyó en el tipo de falla. Se puede deducir que el relleno con mortero en las esquinas de los muretes mejoró la distribución de esfuerzos y no permitió una falla prematura local que pudo ser perjudicial para la investigación.

El estudio del comportamiento en muros de escala natural es de gran interés para los autores. Se incentiva a futuros investigadores realizar el reforzamiento en muros para correlacionar los valores obtenidos en la presente investigación. Recordar siempre la importancia del confinamiento en el comportamiento de prismas. Además, se recomienda estudiar otros tipos de refuerzos para corroborar la tendencia observada.

En cuanto al análisis de costos, se puede comentar que el refuerzo con más alto ratio entre el costo y el aumento de resistencia es el sistema TRM de acero galvanizado y el sistema TRM de basalto, estas dos opciones son las recomendadas por los autores. Sin embargo, el costo del reforzamiento es elevado con respecto a la construcción del muro. En el presente análisis no se ha considerado el comportamiento en el rango inelástico, por lo que no se reflejan las bondades de la malla electrosoldada. Por esta razón, no se debe descartar este refuerzo ya que se ha demostrado que mejora significativamente el comportamiento de muros bajo cargas cíclicas.

Se recomienda llevar a cabo el estudio de muros reforzados y tomar en consideración el análisis en el rango inelástico con parámetros como ductilidad, tamaño de grietas, degradación de rigidez. Así como factores ajenos a las propiedades de la estructura como tiempos de instalación, costos de importación de materiales. De manera que se dé una cifra más precisa y completa para la elección del refuerzo más adecuado.



## REFERENCIAS

Aguilar, V. y Sandoval, C., (2014). *Resistencia máxima a corte de muros de albañilería armada: predicción vs. resultados experimentales*.

Aguirre, D. (2004). *Evaluación de las Características Estructurales de la Albañilería Producida con Unidades fabricadas en la Región Central Junin*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Alcaíno, P. y San María, H. (Mayo 2008). *Resistencia Al Corte De Muros De Albañilería Reforzados Exteriormente Con Fibras*. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Santiago, Chile.

Alcocer, Ruiz, Pineda y Zepeda. (1996). *Retrofitting Of Confined Masonry Walls With Welded Wire Mesh* PAPER NO. 1417 *Eleventh World Conference On Earthquake Engineering*. Congreso llevado a cabo en Acapulco, México.

Alcocer, S., y Meli, R., Ruiz, J. y Zepeda, J., (1995). *Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural* (MSc thesis). School of Engineering, UNAM.

Araoz Escobedo, T. y Velezmoro Girón, J. (2012). *Reforzamiento de viviendas existentes construidas con muros confinados hechos con ladrillos pandereta-segunda etapa* (tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Barr, K. y Pineda, C. (2011). *Control de trituración de los ladrillos huecos mediante malla de refuerzo en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica* (tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú.

De Felice, G; De Santis, S; (2015). *Steel reinforced grout systems for the strengthening of masonry structures*. Composite Structures.

De Santis, S; Casadei, P; De Canio, G; De Felice, G; Malena, M; Mongelli, M; Roselli, I. *Seismic performance of masonry walls retrofitted with steelreinforced grout*. Roma. Tre University, Department of Engineering.

Díaz Córdor, V. y Cevallos Pezo, O. (2018). *Reforzamiento Estructural De Muros De Ladrillo Pandereta Con Mallas Para Tarrajeo Y Electrosoldada* (tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Díaz, M. et al., (2017). *Experimental Study of Non-Engineered Confined Masonry Walls Retrofitted with Wire Mesh and Cement-Sand Mortar*.

Hernández, F; Sotomayor, F. (2018) *Influencia del Período de Inmersión al Agua en la Resistencia a la Compresión de Muros de Albañilería, Construidos con Ladrillo Industrial y Artesanal*. Universidad San Martín de Porres.

Instituto Geofísico del Perú. IGP. (2014). Hernando Tavera: "Desde el terremoto de 1746 estamos en silencio sísmico". Extraído de <https://scts.igp.gob.pe/node/397>

Instituto Nacional De Estadística E Informática. INEI, 2017. *Censos Nacionales 2017: Xi De Población Y Vi Vivienda*.

Kuroiwa, J. (2016) *Manual para la Reducción del Riesgo Sísmico de Viviendas en el Perú*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Luján M. (2016) *Refuerzo de muros de albañilería confinada con mallas de acero*, Tesis de Pregrado, Fondo Editorial PUCP.

Mamani Quina, P. (2015). *Comportamiento mecánico de muros de albañilería tubular confinada reforzados con malla electrosoldada ante cargas sísmicas y gravitacionales* (tesis maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Manchego, J; Pari ,S. (2016) *Análisis experimental de muros de albañilería confinada en viviendas de baja altura en Lima*, Perú Pontificia Universidad Católica del Perú

Matsumura, A., (1987). *Shear Strength of Reinforced Masonry Walls, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo-Kyoto, Japón. Vol. VI

Ministerio De Vivienda Construcción Y Saneamiento. SENCICO (2016). Reglamento Nacional De Edificaciones. Norma Técnica E.030 "Diseño Sismo Resistente"

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.070 "Albañilería"

Muñoz, A. (2011). Apuntes del curso de ingeniería sismo resistente.

Pastorutti, A. (1985). *Ensayos de carga lateral en muros de albañilería confinados -efectos del refuerzo*.

Paredes Castro, J. G., y Caycho Pérez, D. J. (2009). *Control De La Trituración De Los Ladrillos Huecos En Muros De Albañilería Confinada Sujetos A Carga Lateral Cíclica* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Pérez, Marco (2014). *Aplicaciones Avanzadas de los Materiales Compuestos en la Obra Civil y la Edificación*. Editorial OmniaScience

Pineda, J. A., (1996). *Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada*. M.Sc. thesis. Thesis. National Autonomus University of Mexico (UNAM)

Ramirez, M. (2001). *Estudio Experimental de la Variacion del Área Neta en Ladrillos de Arcilla y su Influencia en el Comportamiento Sismorresistente de Muros Confinados*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Ruiz, J., (1995) *Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural*. M.Sc. Thesis. National Autonomus University of Mexico (UNAM)

Quiun, D. (2018). *Vulnerabilidad Y Refuerzo De Unidades De Albañilería Confinada Hechas Con Unidades Inadecuadas*. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Lima, Perú.

Sáenz, L. E. (2016). *Comportamiento sísmico de tabiques construidos con ladrillo pandereta Lima*. Tesis de pregrado Pontificia Universidad Católica del Perú,

San Bartolomé, Coronel C. (2009). *Reparación de un muro de albañilería confinada mediante fibra de carbono*. Recuperado de Blog PUCP Sitio web: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/albanileria/>

San Bartolomé, A. (1983) *Ensayos de carga lateral cíclica en muros de albañilería confinada - correlación de resultados entre especímenes a escala natural y probetas pequeñas*. Recuperado de Blog PUCP Sitio web: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/albanileria/>

San Bartolomé, A; Quiun, D; Silva, W. (2018) *Diseño y Construcción de Estructuras Sismoresistentes de albañilería*, Lima, Perú: Fondo Editorial PUCP.

San Bartolomé, A. (2007). *Defectos que incidieron en el comportamiento de las construcciones de albañilería en el sismo de Pisco del 15-08-2007*. Recuperado de Blog PUCP Sitio web: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/albanileria>.

Salinas, R., y Lázares, F. (Agosto 2007). *La Albañilería Tubular Y Su Uso En Viviendas En Zonas Sísmicas*. Conferencia Internacional en ingeniería sísmica, Lima, Perú.

Torrealva, D. (2005). *Refuerzo De Muros Y Tabiques De Albañilería Con Mallas De Polímero*.

Tomazevic, M., (1999). *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Series on Innovation in Structures and Construction, Vol. 1*, Imperial College Press, London.

Tumialan, Vatovec y Kelley. (Mayo 2009). FRP Composites For Masonary Retrofitting. *Structure*. P. 10-12.

Villegas, C. (2008). *Estudio de Verificación de las Propiedades Físicas y Mecánicas de los Ladrillos de Arcilla Cocida de Lima Metropolitana*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Zavala, C., Gibu, P. y Salinas, R. (2006). *Seismic Response Diagnosis On Masonry Housing Using Experimental Models On A Screening Method*. Reporte interno para el Proyecto Edes\_B, Del International Institute Of Seismology And Earthquake Engineering IISEE, JAPÓN.

