



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación experimental de la resistencia a corte de muros de mampostería reforzados externamente con mortero y tejido de fique (fique TRM)**

**Heidi Stefania Prieto Piñeros**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola y Civil  
Bogotá, Colombia

2023

# **Evaluación experimental de la resistencia a corte de muros de mampostería reforzados externamente con mortero y tejido de fique (fique TRM)**

**Heidi Stefania Prieto Piñeros**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Estructuras**

Director (a):

Ph.D. JUAN MANUEL LIZARAZO MARRIAGA

Codirector (a):

Ph.D. PATRICIA LUNA TAMAYO

Línea de Investigación:

Materiales de Construcción

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola y Civil

Bogotá, Colombia

2023

*(Dedicatoria o lema)*

*A mi familia*

*Este camino ha sido largo y un poco difícil, pero cada vez que me sentía cansada o pensaba que no iba a poder lograrlo, pensaba en mi papá IVAN EDGAR PRIETO y mi mamá ANA LAURA PIÑEROS, eso me daba ánimo para continuar y nunca darme por vencida. Gracias por apoyarme y hacerme una persona independiente y luchadora, he crecido por sus consejos y su ejemplo. Gracias a mi Jazmín, estuviste conmigo en cada uno de mis trasnochos, te amo y siempre te amare.*

## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Heidi Stefania Prieto Piñeros

Fecha 10/07/2023

## Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a la Universidad Nacional de Colombia, mi alma mater, la cual desde que inicie mi camino en el pregrado, me ha brindado un segundo hogar, me ha formado no solo como profesional sino como persona, trabajar en ella para que crezca y mejore cada día me hace sentir orgullosa de mí, porque sé que mi trabajo contribuye a que nuestra Universidad pueda dar oportunidades a más jóvenes que quieren luchar por sus familias y que llegarán a generar un cambio en nuestro país. Quiero agradecer al Laboratorio de Estructuras del Instituto de Extensión e Investigación- IEI liderado por el Ingeniero Camilo Ríos, a Felipe Patiño y a los laboratoristas Jorge, Edgardo y Darío por brindarme espacios dentro de la programación de los laboratorios y su orientación en la ejecución del programa experimental.

Con todo mi corazón quiero agradecer a mi director JUAN MANUEL LIZARAZO, recordaré siempre con mucho aprecio todo el apoyo que me brindaste cuando tenía dudas teóricas en el desarrollo de este trabajo, pero sobre todo poder contar con un gran profesional que me diera su respaldo para discutir teorías e hipótesis sobre el comportamiento que presentaban los materiales durante el análisis de los resultados generados. También a mi codirectora PATRICIA LUNA, cuyos consejos y orientación en el desarrollo de este trabajo en particular sobre el tema de fibras naturales me permitieron tener una visión más amplia para poder culminarlo con éxito.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos, Giovanni Yomayuzza, Sebastián Castillo y Jimmy Junco, este trabajo implicó un esfuerzo físico bastante significativo durante el desarrollo del programa experimental, que no hubiera podido llevar a cabo sin su colaboración. Gracias por enseñarme que no tengo que luchar todas las batallas sola, contar con una mano amiga ayuda a reducir la carga y lograr mejores resultados.

## Resumen

### **Evaluación experimental de la resistencia a corte de muros de mampostería reforzados externamente con mortero y tejido de fique (fique TRM)**

Frente a eventos sísmicos, los muros de mampostería no reforzados son elementos vulnerables que tienden a sufrir una falla frágil y presentan una baja ductilidad, en particular debido a esfuerzos de corte. Con el desarrollo de nuevas metodologías de reforzamiento como el uso morteros reforzados con textiles (Textile Reinforcement Mortar - TRM), que permiten incrementar la resistencia a corte en los muros de mampostería, se planteó involucrar el uso de materiales alternativos que involucren conceptos de sostenibilidad a bajo costo como textiles fabricados a partir de fibras naturales. Así, esta investigación tenía como objetivo evaluar experimentalmente el comportamiento a cortante de muros de mampostería reforzados externamente con mortero y malla de fique, comparando el esfuerzo máximo a corte, módulo de rigidez y modo de falla de los muros reforzados contra los muros sin ningún tipo de reforzamiento.

Los resultados obtenidos muestran que los muros reforzados presentan un incremento en la resistencia a corte entre el 22% y el 39% respecto a la resistencia de los muros sin reforzamiento, dependiendo el tipo de malla de fique y si el muro ha sido reforzado por una o ambas caras, pero en particular se resalta que los muros reforzados presentan una falla progresiva donde al momento de alcanzar la carga máxima el muro mantiene su integridad a diferencia de los muros no reforzados que presentan una falla frágil y súbita donde el elemento pierde su integridad y se genera su colapso.

**Palabras Clave:** Mampostería, mampostería no reforzada, mortero reforzado con textiles, malla de fique, tracción diagonal, esfuerzos de corte, bloque de mampostería.

## Abstract

### **Experimental evaluation of the shear strength of masonry walls externally reinforced with mortar and fique mesh (TRM fique)**

In the face of seismic events, unreinforced masonry walls are vulnerable elements exhibit brittle failure and low ductility, particularly due to shear stress. With the development of new reinforcement methodologies, such as the use of Textile Reinforced Mortar - TRM, which allow the enhancement of shear strength of masonry walls, the use of alternative materials was proposed to incorporate low-cost sustainability concepts, such as textiles made from natural fibers. Thus, this research had the purpose of experimentally evaluating the shear behavior of masonry walls externally reinforced with mortar and fique fabric, comparing the shear strength, stiffness modules, and failure mode of the reinforced walls compared to the walls without any kind of reinforcement.

The obtained results show that the reinforced walls exhibit an increase in shear strength, ranging 22%-39% more compared to the strength of unreinforced walls. The increment depends on the type of fique mesh or whether or not the wall has been reinforced on one or both sides, but particularly noteworthy the reinforced walls demonstrate progressive failure. At the point of reaching the maximum load, the wall maintains its integrity as opposed to non-reinforced walls that exhibit brittle failure and sudden loss of integrity, provoking its collapse.

**Keywords:** Masonry, textile reinforced mortar, unreinforced masonry, fique mesh, diagonal traction, shear strength

# Contenido

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 Mampostería .....	21
2.1.1 Generalidades de la mampostería .....	21
2.1.2 Materiales de la mampostería.....	22
2.1.2.1 Unidades de mampostería.....	22
2.1.2.2 Mortero de pega y mortero de recubrimiento .....	25
2.1.3 Tipos de falla en muros de mampostería .....	28
2.1.4 Metodologías de rehabilitación y reforzamiento .....	32
2.1.4.1 Metodología de reforzamiento en muros de mampostería .....	32
2.1.4.2 Mortero reforzado con textiles (Textile reinforcement mortal -TRM).....	33
2.1.5 Normatividad rehabilitación de muros de mampostería.....	37
2.2 Fibras naturales .....	42
2.2.1 Fibras de fique.....	47
2.2.2 Tratamiento fibras de fique .....	51
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>55</b>
3.1 Caracterización de materiales .....	55
3.1.1 Cemento.....	55
3.1.1.1 Densidad del cemento .....	55
3.1.1.2 Finura o superficie específica .....	56
3.1.2 Agregado fino – Arena de Peña.....	57
3.1.2.1 Contenido de humedad total evaporable .....	58
3.1.2.2 Densidad relativa SSS y porcentaje de absorción .....	59
3.1.2.3 Granulometría de agregado fino .....	61
3.1.2.4 Masa Unitaria Suelta y Compacta.....	63
3.1.3 Unidades de mampostería .....	64
3.1.3.1 Selección de las muestras y preparación previa .....	66
3.1.3.2 Secado y enfriamiento de las muestras .....	67
3.1.3.3 Tolerancia dimensional (Medición de dimensiones y espesores de paredes y tabiques).....	67
3.1.3.4 Porcentaje de absorción de agua por inmersión 24 horas .....	70
3.1.3.5 Resistencia mecánica a la compresión .....	71
3.1.4 Malla de fique .....	74
3.1.4.1 Caracterización física .....	75
3.1.4.2 Caracterización mecánica.....	81
3.1.5 Mortero de pega y mortero de recubrimiento .....	91



3.1.5.1	Mortero de pega .....	93
3.1.5.2	Mortero de recubrimiento.....	94
3.2	Muros a tracción diagonal .....	96
3.2.1	Especímenes de prueba .....	97
3.2.2	Conectores .....	101
3.2.3	Preparación costales de fique.....	102
3.2.4	Construcción de especímenes de prueba .....	104
3.2.5	Procedimiento de ensayo .....	107
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>111</b>
4.1	Caracterización de materiales .....	111
4.1.1	Cemento .....	111
4.1.1.1	Densidad del cemento .....	111
4.1.1.2	Finura del cemento .....	112
4.1.2	Agregado Fino .....	113
4.1.2.1	Contenido de Humedad total evaporable.....	113
4.1.2.2	Densidad relativa SSS y % de absorción.....	114
4.1.2.3	Granulometría y módulo de finura.....	116
4.1.2.4	Masa unitaria suelta y compacta.....	121
4.1.3	Unidades de mampostería .....	121
4.1.3.1	Tolerancia dimensional (Medición de tamaño y espesores de tabiques y paredes) .....	121
4.1.3.2	Porcentaje de absorción de agua por inmersión 24 horas .....	127
4.1.3.3	Resistencia mecánica a la compresión .....	128
4.1.4	Fibras de fique.....	131
4.1.4.1	Caracterización Física .....	131
4.1.4.2	Caracterización Mecánica.....	135
4.1.5	Mortero de pega y de recubrimiento .....	148
4.1.5.1	Mortero de pega .....	148
4.1.5.2	Mortero de recubrimiento.....	149
4.2	Muros a tracción diagonal .....	151
4.2.1	Modos de falla .....	162
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>177</b>
5.1	Conclusiones.....	177
5.2	Recomendaciones.....	179

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1. Unidades de perforación horizontal. Fuente: NTC 4205-1 .....	24
Figura 2-2. Unidades de perforación vertical. Fuente: NTC 4205-1 .....	24
Figura 2-3 Unidades macizas. Fuente: NTC 4205-1 .....	24
Figura 2-4. Fallas controladas por flexión. A) Falla por pandeo lateral en el plano. B) Falla por aplastamiento de las esquinas. Modificado de: (Meriggi et al., 2021) .....	29
Figura 2-5. Fallas controladas por cortante. A) Falla por deslizamiento por cortante. B) Falla por tracción diagonal. Modificado de: (Meriggi et al., 2021) .....	29
Figura 2-6. Agrietamiento escalonado - fallo de Fricción- Cortante. Fuente: (Bonett Díaz Ricardo León, 2003) .....	30
Figura 2-7. Agrietamiento de las unidades por falla de tracción diagonal. Fuente: (Bonett Díaz Ricardo León, 2003) .....	31
Figura 2-8. Desprendimiento del refuerzo con TRM. Fuente: (Yardim & Lalaj, 2016) .....	36
<i>Figura 2-9. Estructura jerárquica de la celulosa extraída de las plantas. Modificado de: (Rojas et al., 2015) .....</i>	<i>44</i>
Figura 2-10. Representación esquemática la célula de la fibra vegetal. Modificado de: (Akil et al., 2011) .....	45
Figura 2-11. Registro fotográfico proceso de fabricación fibras largas Fique. A). Retiro de espinas. B). Desfibrado. C). Secado D). Empaque. Fuente: (Duque, 2011) .....	49
<i>Figura 2-12. Micrografía SEM de la sección transversal de la fibra de fique. Fuente: (Gomez et al., 2020) .....</i>	<i>50</i>
Figura 2-13. Corte longitudinal fibras de fique. (Camargo López, 2022) .....	50
Figura 2-14. Espectro FTIR de fibras de fique sin tratar (F) y tratadas (A) Fuente: (Muñoz Vélez et al., 2014) .....	53
<i>Figura 3-1. Registro fotográfico del procedimiento para determinación de densidad en cemento .....</i>	<i>56</i>
Figura 3-2. Aparato de Blaine para determinación de módulo de finura .....	56
Figura 3-3. Muestra seleccionada para determinación de humedad .....	59
Figura 3-4. Montaje de ensayo de Humedad Superficial .....	60
Figura 3-5. Muestra en condición Saturada y Superficialmente Seca .....	61
Figura 3-6. Proceso de lavado de material sobre el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200) .....	62
<i>Figura 3-7. Registro fotográfico determinación masa unitaria suelta .....</i>	<i>64</i>
Figura 3-8. Registro fotográfico determinación masa unitaria compactada .....	64
Figura 3-9. Unidades de mampostería – Bloque No. 5 estándar .....	65

Figura 3-10. Vista Isométrica del Bloque No. 5 estándar (Dimensiones nominales Fabricante) .....	65
Figura 3-11. Unidades de mampostería (a. Unidades para absorción; b. Unidades para resistencia a la compresión) .....	67
Figura 3-12. Ubicación toma de medidas - Longitudes y Anchos .....	68
Figura 3-13. Ubicación toma de medidas - Alturas .....	68
Figura 3-14. Marcación de centros y medición de altura.....	68
Figura 3-15. Paredes exteriores bloque No. 5 .....	69
Figura 3-16. Tabiques exteriores bloque No. 5.....	69
Figura 3-17. Tabiques interiores bloque No. 5.....	70
Figura 3-18. Registro fotográfico procedimiento porcentaje de absorción.....	71
Figura 3-19. Equipo para ensayo de resistencia a la compresión .....	71
Figura 3-20. Unidades de Mampostería refrentadas.....	73
Figura 3-21. Montaje ensayo de resistencia a la compresión unidades de mampostería.....	73
Figura 3-22. Costales de mallas de fique Ligera-L.....	74
Figura 3-23. Costales de malla de fique Densa-D .....	74
Figura 3-24. Muestras de malla a) Ligera, b) Densa .....	76
Figura 3-25. Esquema separación y diámetro de hiladas en ambos sentidos.....	76
Figura 3-26. Comprobación calibración de mallas de fibra Densa y Ligera.....	78
Figura 3-27. Determinación cantidad de hiladas en ambos sentidos (A. Malla Densa y B. Malla Ligera) .....	79
Figura 3-28. Procedimiento determinación $W_{fique}/A_{fique}$ .....	79
Figura 3-29. Procedimiento determinación porcentaje de vacíos.....	80
Figura 3-30. Procedimiento tratamiento muestras de malla de fique. ....	82
Figura 3-31. Procedimiento instalación de lengüetas en muestras de malla de fique (Ensayo a tensión) .....	86
Figura 3-32. Imágenes de las hiladas de fibra de fique tomadas con el estereoscopio... ..	89
Figura 3-33. Registro fotográfico de montaje del ensayo de tensión.....	90
Figura 3-34. Procedimiento ensayo de fluidez mortero .....	92
Figura 3-35. Procedimiento ensayo de resistencia a la compresión - Mortero .....	92
Figura 3-36. Preparación mortero de pega para construcción de muros.....	93
Figura 3-37. Procedimiento mezclas de prueba – mortero de recubrimiento. ....	95
Figura 3-38. Muros de mampostería sin reforzamiento.....	97
Figura 3-39. Configuración de los muros del lote Mt-R1L, vista frontal .....	98
Figura 3-40. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R1L, vista Lateral.....	98
Figura 3-41. Configuración de los muros del lote Mt-R1D. Vista frontal .....	99
Figura 3-42. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R1D. Vista lateral.....	99
Figura 3-43. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R2L. Vista frontal .....	100
Figura 3-44. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R2L. Vista Lateral .....	100
Figura 3-45. Ubicación de conectores transversales en muros de prueba.....	102
Figura 3-46. Registro fotográfico 1ra etapa del tratamiento alcalino de las mallas de fique .....	103

Figura 3-47. Registro fotográfico 2da etapa del tratamiento alcalino de las mallas de fique. ....	104
Figura 3-48. Proceso de construcción de muros de mampostería. ....	105
Figura 3-49. Registro fotográfico de ubicación de chazos en muros de prueba .....	105
Figura 3-50. Registro fotográfico de 1ra etapa de reforzamiento mediante TRM fique ..	106
Figura 3-51. Registro fotográfico de 2da etapa de reforzamiento mediante TRM fique..	106
Figura 3-52. Registro fotográfico durante y al finalizar el tiempo de curado. ....	107
Figura 3-53. Dimensiones medidas de los muros de prueba para ensayo de tracción diagonal .....	107
Figura 3-54. Esquema de cantidad de vacíos en la línea de acción de aplicación de la carga. ....	108
Figura 3-55. Dimensiones de ancho y altura de vacíos medidos en los muros de prueba para ensayo de tracción diagonal .....	108
Figura 3-56. Ubicación de soportes para instalación de comparadores de caratula .....	109
Figura 3-57 Esquema del montaje para ensayo de tracción diagonal .....	110
Figura 4-1. Curvas granulométricas arena de peña .....	119
Figura 4-2. Unidades de mampostería sujetas a ensayo a compresión .....	128
Figura 4-3. Espacios vacíos en las mallas de fibra. a). Muestra malla densa D-3, b). Muestra de malla ligera L-1. ....	134
Figura 4-4. Retrocesos en las deformaciones registradas en el extensómetro. ....	137
Figura 4-5. Gráfica de Resistencia máxima a la tensión vs Concentración Tratamiento NaOH w/w .....	138
Figura 4-6. Gráfica de deformación unitaria del cabezal vs Concentración Tratamiento NaOH w/w .....	139
Figura 4-7. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 0%-1-D y 0%-1-L .....	140
Figura 4-8. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 1%-1-D y 1%-1-L .....	141
Figura 4-9. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 3%-1-D y 3%-1-L .....	142
Figura 4-10. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 5%-1-D y 5%-1-L .....	143
Figura 4-11. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 7%-1-D y 7%-1-L .....	143
Figura 4-12. Módulo de elasticidad aparente vs Concentración tratamiento NaOH w/w (Cabezal).....	144
Figura 4-13 Módulo de elasticidad vs Concentración tratamiento NaOH w/w (Extensómetro).....	145
Figura 4-14. Grafica de resistencia a la compresión vs tiempo de fraguado .....	150
Figura 4-15. Curvas de esfuerzo vs deformación muros Mt-MP y Mt-R1D .....	159
Figura 4-16. Curvas de esfuerzo vs deformación muros Mt-MP y Mt-R1L .....	160
Figura 4-17. Curvas de esfuerzo vs deformación muros Mt-MP y Mt-R2L .....	161

Figura 4-18. Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-MP .....	162
Figura 4-19. Falla por desprendimiento de mortero de pega en muro Mt-MP-2.....	163
Figura 4-20. Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-R1D .....	164
Figura 4-21. Desprendimiento de la capa de refuerzo en los muros Mt-R1D.....	165
Figura 4-22. Curvas esfuerzo vs deformación de caras reforzadas y sin reforzamiento Mt-R1D.....	166
Figura 4-23. Registro fotográfico falla por aplastamiento en los apoyos Mt-R1L.....	167
Figura 4-24. Falla por deslizamiento por cortante en muro Mt-R1L-4 .....	167
Figura 4-25. Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-R1L .....	168
Figura 4-26. Curvas esfuerzo vs deformación de caras reforzadas y sin reforzamiento Mt-R1L .....	169
Figura 4-27. Fisuración en el recubrimiento del muro Mt-R1L-1 .....	170
Figura 4-28. Curvas esfuerzo vs deformación de caras reforzadas y sin reforzamiento Mt-R1L y Mt-R1D .....	171
Figura 4-29. Registro fotográfico falla por aplastamiento en los apoyos Mt-R2L.....	172
Figura 4-30 Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-R2L .....	173
Figura 4-31. Registro fotográfico de las fisuras y fallas generadas en el muro Mt-R2L durante el ensayo.....	174
Figura 4-32. Falla por cortante generada en los conectores.....	175
Figura 4-33.Registro fotográfico de tapas metálicas de conectores.....	175
Figura 4-34. Lámina metálica microperforadas complemento conexión mortero-malla de fique. Fuente: <a href="http://www.anjeosymallas.com.co">www.anjeosymallas.com.co</a> .....	176
Figura 4-35. Muestra de material compuesto conformado con malla ligera. ....	176

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. DANE - SDP, Encuesta Multipropósito 2017. ....	18
<i>Tabla 2-1 . Uso de los morteros de cemento. Fuente: (Sanchez de Guzman, 2001) .....</i>	<i>25</i>
Tabla 2-2. Rangos de fluidez recomendada para diversos tipos de estructura y condiciones de colocación. Fuente: (Sanchez de Guzman, 2001).....	27
Tabla 2-3. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción. Fuente: NSR-10 Título D. ....	28
Tabla 2-4. Técnicas de reforzamiento de muros de mampostería .....	33
Tabla 2-5. Técnicas de reparación de grietas. Adaptado de (Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Mampostería, 2020)	39
Tabla 2-6. Ventajas y desventajas de las fibras naturales. Fuente: (Stamboulis et al., 2000).....	43
<i>Tabla 2-7 Factores que afectan la calidad de las fibras vegetales.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 2-8. Características físicas y mecánicas de las fibras de fique. Fuente (Delvasto et al., 2010) .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 2-9. Composición química de las fibras de fique. Fuente: Propia.....</i>	<i>51</i>
Tabla 3-1. Plan de muestreo para unidades de mampostería.....	66
Tabla 3-2. Datos de calibración imágenes Malla Densa .....	77
Tabla 3-3. Datos de calibración imágenes Malla ligera.....	77
Tabla 3-4. Registro fotográfico del tratamiento de muestras de malla de fique con diferentes concentraciones de NaOH. ....	83
Tabla 3-5. Registro fotográfico de las muestras de malla de fique después del tratamiento con NaOH. ....	84
Tabla 3-6. Registro fotografico de probetas en malla de fibra de fique. ....	87
Tabla 3-7 Datos de calibración imágenes tomadas con el estereoscopio.....	90
Tabla 3-8. Resumen de dosificaciones para mezclas de prueba .....	95
Tabla 3-9. Características de muros no reforzados y reforzados con TRM fique .....	101
Tabla 4-1. Datos obtenidos para calcular la densidad de cemento.....	111
Tabla 4-2 Viscosidad del aire en función de la temperatura del medio ambiente. Tomada de Molano y Torres (2017) .....	112
Tabla 4-3. Resultados humedad natural de la arena de peña.....	114
Tabla 4-4 Resultados densidad relativa SSS de la arena de peña .....	115
Tabla 4-5. Resultados % de absorción de la arena de peña.....	115
Tabla 4-6. Resultados proceso de lavado de arena de peña .....	116

Tabla 4-7. Resultados granulometría de la muestra 1 de arena de peña.....	117
Tabla 4-8. Resultados granulometría de la muestra 2 de arena de peña.....	117
Tabla 4-9. Resultados granulometría de la muestra 3 de arena de peña.....	118
Tabla 4-10. Límites granulométricos NTC 2240 y valores promedios de % que pasa de la arena de peña .....	120
Tabla 4-11. Resultados masa unitaria suelta y compacta de la arena de peña .....	121
Tabla 4-12. Medidas nominales Bloque No. 5 .....	122
Tabla 4-13. Dimensiones promedio y diferencias de unidades de mampostería.....	123
Tabla 4-14. Ancho máximo y mínimo; altura máxima y mínima y recorridos de unidades .....	123
Tabla 4-15. Longitud máxima, mínima y recorrido de las unidades de mampostería.....	124
Tabla 4-16. Ancho máximo, mínimo y variación de las unidades de mampostería. ....	124
Tabla 4-17. Longitud máxima, mínima y variación de las unidades de mampostería.....	125
Tabla 4-18. Altura máxima, mínima y variación de las unidades de mampostería .....	125
Tabla 4-19. Espesor de paredes y tabiques exteriores de unidades de mampostería ...	126
Tabla 4-20. Espesores mínimos tabiques interiores- Unidades de mampostería.....	126
Tabla 4-21. Resultados porcentaje de absorción de agua- Unidades de Mampostería..	127
Tabla 4-22. Límites máximos de % absorción de las unidades de mampostería .....	127
Tabla 4-23. Resistencia mecánica a la compresión- Unidades de Mampostería. ....	128
Tabla 4-24. Registro fotográfico ensayo a compresión unidades de mampostería. ....	129
Tabla 4-25. Resistencia Mínima a compresión de unidades de mampostería .....	131
Tabla 4-26. Separación y diámetro de hiladas Malla ligera.....	132
Tabla 4-27. Separación y diámetro de hiladas Malla densa.....	132
Tabla 4-28. Cantidad de hiladas e hiladas por unidad de longitud en sentido X y Y mallas ligeras. ....	132
Tabla 4-29. Cantidad de hiladas e hiladas por unidad de longitud en sentido X y Y mallas densas. ....	133
Tabla 4-30. Resultados relación peso/área para malla ligera y densa. ....	133
Tabla 4-31. Comparación características físicas mallas ligera y densa. ....	134
Tabla 4-32. Resultados ensayos a tensión muestras de malla de fique Densa y Ligera	136
Tabla 4-33. Falla a tensión de probetas de malla de fique.....	146
Tabla 4-34. Resultados de fluidez y resistencia a la compresión de mortero de pega. ...	148
Tabla 4-35. Resultados de ensayos de fluidez en mezclas de prueba.....	149
Tabla 4-36. Resultados de resistencia a la compresión de mezclas de prueba a los 7 días y 14 días.....	150
Tabla 4-37. Resultados de fluidez y resistencia a la compresión de mortero de recubrimiento .....	151
Tabla 4-38. Caracterización física de los muros de prueba a tracción diagonal.....	152
Tabla 4-39. Resultados ensayos de tracción diagonal en muros .....	154
Tabla 4-40. Comparación resistencia a corte de muros de mampostería sin reforzamiento .....	155
Tabla 4-41. Comparación de resistencia a corte muros de mampostería reforzados por una cara .....	156

Tabla 4-42. Comparación de resistencia a corte muros de mampostería reforzados por ambas caras.....157

Tabla 4-43. Módulo de rigidez a cortante de muros de mampostería .....162



# 1. INTRODUCCIÓN

La Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo (WCED) ha definido la sostenibilidad como la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Esta condición se ve amenazada por el crecimiento de la población, que ha provocado un aumento de la demanda de infraestructura construida, lo que se traduce en un consumo elevado de materias primas para la producción de materiales para la industria de la construcción, alto consumo de energía y una generación significativa de residuos (Onuaguluchi & Banthia, 2016). Esta situación, junto con una mayor conciencia medioambiental, ha creado una preocupación mundial por el ahorro energético, la conservación de los recursos naturales, especialmente los que no son renovables, y el uso de materiales alternativos, lo que nos ha llevado a buscar materiales de construcción sostenibles y respetuosos con el medio ambiente a través de la investigación y la experimentación (Abdullah et al., 2011).

La búsqueda de estos materiales alternativos también está relacionada con el costo de los materiales de construcción, que aumenta constantemente debido a la alta demanda, la escasez de materiales y el alto precio de la energía (Abdullah et al., 2011). Numerosas investigaciones se han enfocado en el uso de fibras naturales como refuerzo para materiales de construcción (Kesikidou & Stefanidou, 2019; Juárez Alvarado et al, 2004). Es importante destacar que las fibras naturales se consideran una alternativa viable a las fibras sintéticas debido a su capacidad para reducir el impacto ambiental, fácil disponibilidad, bajo costo (Juárez Alvarado et al, 2004) y eficiencia energética (Kesikidou & Stefanidou, 2019).

Por otro lado, diversas investigaciones se han enfocado en la búsqueda de alternativas de rehabilitación para estructuras de mampostería mediante el uso de mallas que permitan retrasar o evitar el colapso de las edificaciones, previniendo así la pérdida de vidas humanas durante eventos sísmicos (Sathiparan, 2015). Cabe señalar que el 96% de las muertes causadas por eventos sísmicos se registran en países en desarrollo o menos desarrollados (Sathiparan, 2015)

y que el 75% de las muertes son causadas por el colapso de edificios, especialmente estructuras de mampostería (Coburn & Spence, 2002). Estas cifras están relacionadas con dos realidades: los edificios construidos con mampostería podrían derrumbarse en cuestión de segundos tras el inicio de un movimiento sísmico, sin permitir que los ocupantes que habitan estas viviendas puedan salir de sus hogares, especialmente si estas edificaciones no se construyeron teniendo en cuenta consideraciones de diseño estructural, por lo que no pueden soportar cargas horizontales (Sathiparan, 2015). Especialmente durante los eventos sísmicos uno de los modos de falla de la mampostería es el agrietamiento por esfuerzos de corte en el plano del muro (Sathiparan, 2015).

Trasladando este contexto a las zonas de expansión urbana de la ciudad de Bogotá (o zonas rurales), las cifras de la Encuesta Multipropósito-2017 (EM-2017) realizada por la Secretaría Distrital de Planeación (SDP) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), reflejan que el 86.55% de estas viviendas están construidas con paredes exteriores de bloque, ladrillo, piedra o madera pulida y entre 27-29% (zonas rurales dispersas y centros poblados, respectivamente) presentan grietas en las paredes que no se deben al asentamiento, lo que refleja la falta de sismo resistencia de la construcción y por ende la falta de reforzamiento pone en riesgo la vida de sus habitantes. Es importante tener en cuenta que la mayoría de estas viviendas se encuentran en los estratos 1 y 2, como se muestra en la Tabla 1-1, por lo que los recursos con los que cuentan estos ciudadanos para mejorar sus condiciones de habitabilidad son limitados.

Tabla 1-1. DANE - SDP, Encuesta Multipropósito 2017.

LOCALIDAD	ESTRATO						
	0	1	2	3	4	5	6
Usaquén	2,04	34,69	57,14	4,08	0	2,04	0
Chapinero	1,11	3,33	61,11	11,11	3,33	4,44	15,56
Santa Fe	0	39,25	55,14	0	1,87	1,87	1,87
San Cristóbal	0	92,31	7,69	0	0	0	0
Usme	0,25	60,68	38,56	0,51	0	0	0
Suba	4,69	4,26	36,46	3,2	4,05	10,66	36,03
Ciudad Bolívar	1,93	51,93	44,2	0,83	0,28	0	0
Sumapaz	8,61	81,6	8,31	0,89	0	0	0

Ambos escenarios descritos anteriormente llevan a considerar la necesidad de encontrar una alternativa económica y sostenible para el refuerzo de muros de mampostería en viviendas de bajo costo mediante el uso de fibras naturales. En este caso, este trabajo tiene como objetivo general evaluar experimentalmente el comportamiento a cortante de muros de mampostería reforzados externamente mediante mortero con mallas de fique (Fique TRM) y el desarrollo de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar física y mecánicamente dos tipos de tejidos de fique con diferentes entramados.
- Determinar la influencia en el comportamiento mecánico a esfuerzos de corte del reforzamiento de muros de mampostería en bloque mediante mallas de fibra de fique (Fique TRM).
- Establecer los modos de falla de los muros de mampostería en bloque mediante mallas de fibra de fique (Fique TRM).
- Evaluar el comportamiento a corte de muros en bloque reforzados en una y ambas caras con dos tipos de textiles de fique.

Por lo cual, el alcance de este trabajo final corresponde a una comparación de los resultados obtenidos a partir de ensayos experimentales de elementos aislados de mampostería conformados por bloque No. 5 y mortero de pega 1:3, con y sin reforzamiento externo mediante mortero de recubrimiento y malla de fique sometidos a esfuerzos de corte; en donde se emplearon dos tipos de malla de fique, una malla con un mayor porcentaje de vacíos que se catalogó como malla ligera y una malla de fique con un menor porcentaje de vacíos que se catalogó como malla densa; y se reforzaron especímenes de muros de mampostería por una y dos caras con malla ligera.

Inicialmente, se realizó una caracterización de los materiales que conforman el material compuesto, como son el cemento, el agregado fino, los bloques de arcilla, las mallas de fibra de fique y el mortero de pega. Esto con el objetivo de conocer las propiedades de los materiales, comparar los resultados obtenidos con los requerimientos normativos y permitir que futuras investigaciones puedan comparar sus resultados con los obtenidos en esta investigación. Las muestras de mallas de fique ligera y densa fueron tratadas con hidróxido de sodio NaOH en concentraciones al 1%, 3%, 5% y 7%. Las probetas de malla de fique fueron ensayadas siguiendo las normas ASTM D 5035-11 *“Standard Test Method for Breaking Force and*

*Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)*” y ASTM D 3039-17 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*” y por medio de procesamiento de imágenes se obtuvo un área aparente de las probetas para establecer los esfuerzos máximos a tensión.

Previo a la construcción de los muros, se estableció la dosificación de los morteros de recubrimiento mediante muestras de prueba con diferentes dosificaciones de cemento, arena de peña y agua. Los criterios de selección de la dosificación de la mezcla fueron fluidez dentro de un rango plástico y resistencia a la compresión a los 28 días mayor a 12.5MPa. Respecto al tratamiento de las fibras con hidróxido de sodio se seleccionó a partir de los resultados obtenidos de la caracterización mecánica pero también de las condiciones de seguridad requeridas al momento de realizar el tratamiento con NaOH a un volumen significativo de malla de fique.

Por último, se construyeron 16 muros de mampostería con bloque No. 5 estándar y mortero de pega con una dosificación de cemento/arena de 1:3, de los cuales 4 muros no cuentan con ningún tipo de reforzamiento y representan la muestra patrón; y 12 muros fueron reforzados mediante un recubrimiento externo con mortero y malla de fique (4 muros reforzados con malla densa por una cara, 4 muros reforzados con malla ligera por una cara y 4 muros reforzados con malla ligera por ambas caras). Estos especímenes fueron ensayados a tensión diagonal siguiendo la norma ASTM E 519-21 “*Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*”, con el fin de evaluar su respuesta a esfuerzos de corte, mediante una comparación del esfuerzo máximo, módulo de rigidez a cortante y modos de falla.

Los resultados muestran que el comportamiento de los muros reforzados externamente mediante mortero de recubrimiento y malla de fique es mejor que los muros de mampostería no reforzados, obteniendo una mayor resistencia a esfuerzos de corte que varía entre el 22% y el 39% dependiendo el tipo malla de fique y si el muro ha sido reforzado por una o ambas caras, pero además, los muros reforzados presentan una falla progresiva donde al momento de alcanzar la carga máxima el muro no colapsa sino que mantiene su integridad.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Mampostería**

#### **2.1.1 Generalidades de la mampostería**

La mampostería es un material compuesto conformado por piezas naturales o artificiales, generalmente prismáticas, unidas por un material aglutinante o mortero (Alcocer, 1997), para formar un sistema monolítico pero heterogéneo (Molano Camargo & Torres Castellanos, 2017). Al estar compuesto por diferentes materiales, presenta un comportamiento anisotrópico, es decir, su comportamiento depende de la dirección de aplicación de la carga (Molano Camargo & Torres Castellanos, 2017). La mampostería se clasifica como mampostería estructural cuando tiene la capacidad de resistir su propio peso, cargas horizontales y cargas verticales, y como mampostería no estructural cuando soporta únicamente las cargas generadas por su propio peso, que es el caso de los muros divisorios o de fachadas (Molano Camargo & Torres Castellanos, 2017).

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente - NSR-10 título D clasifica la mampostería estructural en los siguientes tipos:

- Mampostería de cavidad reforzada;
- Mampostería reforzada;
- Mampostería parcialmente reforzada;
- Mampostería no reforzada;
- Mampostería de muros confinados;
- Mampostería de muros diafragma;
- Mampostería reforzada externamente.

Esta última es la que más se asemeja al sistema que será implementado en el desarrollo de este trabajo final. A continuación, se profundizará en este tipo de mampostería.

La mampostería reforzada externamente es aquella en la que el refuerzo se coloca dentro del mortero de recubrimiento (pañete) en ambas caras laterales de los muros y el refuerzo, formado por mallas electrosoldadas que se encuentran fijadas al muro mediante conectores o clavos de acero (Norma de Sismo resistencia NSR-10 título D). Este sistema se clasifica como un sistema estructural sismorresistente con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico. En el desarrollo de este trabajo se sustituye la malla electrosoldada por malla de fique como alternativa de refuerzo del muro de mampostería; como conectores se emplearán chazos, tornillos y láminas metálicas.

En cuanto a los materiales, la norma establece que en este sistema se puede utilizar unidades de mampostería de perforación vertical u horizontal y que el mortero de recubrimiento debe tener una resistencia mínima a la compresión ( $f'_{cre}$ ) de 12.5MPa. Además, el espesor del recubrimiento no debe ser inferior a 15mm ni superior a 45mm; si es superior a 15mm, debe aplicarse en capas sucesivas de 10-15mm hasta alcanzar el espesor total.

## **2.1.2 Materiales de la mampostería**

### **2.1.2.1 Unidades de mampostería**

Las unidades de mampostería típicas tienen forma ortoédrica, con 6 caras planas o prácticamente planas, con las caras superiores o inferiores en contacto con el mortero de pega horizontal, los extremos en contacto con el mortero de pega vertical y las paredes son las caras que quedan a la vista (Takeuchi, 2010).

La NSR-10 Título D (Sección 3.6) indica que las unidades de mampostería pueden ser de concreto, cerámica (arcilla cocida), silico-calcáreas o de piedra. El proceso de fabricación de las unidades cerámicas consta de 5 etapas: Extracción de las materias primas, preparación de las pastas cerámicas, moldeado, secado y cocción (Mancera León, 2022).

La selección de la localización para la extracción de materias primas depende de la calidad de la arcilla, la disponibilidad a nivel superficial y la cercanía de una vía transitable

(Barranzuela Lescano, 2014). En la etapa de preparación la arcilla es sometida a tratamientos de trituración, homogenización y reposo en el acopio hasta obtener una adecuada consistencia y uniformidad de las características mecánicas y químicas; además la exposición a la acción atmosférica favorece la descomposición de materias orgánicas lo que permite la purificación química del material (Barranzuela Lescano, 2014). En la etapa de moldeado se le da la forma a la arcilla que tendrá después de la cocción, este se realiza por extracción donde la pasta de arcilla se empuja en un molde perforado por medio de una hélice giratoria (Barranzuela Lescano, 2014; Romina Gámez Quiñónez et al., 2011)

Posterior a ello, los bloques son sometidos al proceso de secado, en el cual se reduce el contenido de humedad de las piezas antes de la cocción, bien sea por secado natural o artificial; este proceso implica dos fenómenos físicos: Transferencia de calor y transferencia de masa, donde la transferencia de calor se genera cuando el bloque y el ambiente encuentran un equilibrio térmico y el proceso de transferencia de masa se genera cuando existen un gradiente de humedad entre el bloque y el ambiente, lo que produce que el vapor de agua se difunda a través de los poros de la matriz arcillosa (Barranzuela Lescano, 2014). El secado de los ladrillos es una etapa delicada de la fabricación, dado que un secado rápido puede fisurarlos o un secado incompleto puede impedir una adecuada cocción (Robusté, 1969).

La última etapa es la cocción en la cual los bloques son secados a altas temperaturas por tiempos prolongados en hornos, para adquirir sus propiedades mecánicas y físicas, además de su apariencia final (Barranzuela Lescano, 2014). El proceso de cocción tiene cuatro fases (Villareal, 2004): Pre calentamiento donde se elimina el agua impregnada en la arcilla; en esta fase el aire es continuamente renovado y se aumenta la temperatura de manera constante hasta que la arcilla alcance una temperatura de 200°C. Calentamiento donde se elimina el agua químicamente unida a la arcilla, incrementando la temperatura hasta 700°C. Maduración del producto entre 900°C y 1000°C y la última fase es el temple de la pieza en el cual se realiza un enfriamiento lento hasta alcanzar una temperatura de 500°C. La calidad de la unidad puede verse afectada por las condiciones de enfriamiento, al realizarse de manera lenta se obtienen piezas tenaces y muy resistentes a acciones mecánicas, por el contrario, un enfriamiento rápido genera piezas frágiles (Anfalit, 2002).

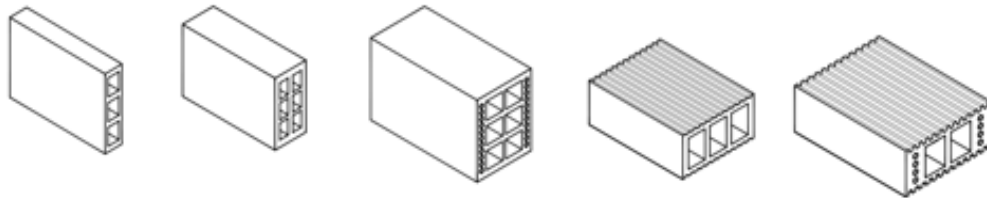
En esta última etapa las partículas de arcilla se endurecen, provocando la fusión de sus componentes debido a las altas temperaturas. (Bonett Díaz Ricardo León, 2003). Todo el

proceso dura entre 40 y 150 horas, dependiendo del tamaño y volumen de los ladrillos y del tipo de horno (Bonett Díaz Ricardo León, 2003).

Las unidades de mampostería se clasifican en tres tipos de acuerdo con la disposición de las perforaciones y el volumen que ocupen:

- Perforación horizontal (PH): las perforaciones son paralelas a las caras sobre las cuales se asienta la unidad de mampostería.

*Figura 2-1. Unidades de perforación horizontal. Fuente: NTC 4205-1*



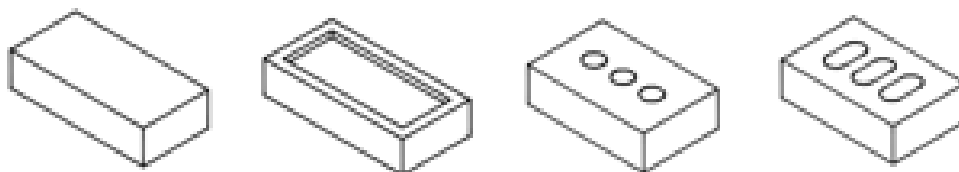
- Perforación Vertical (PV): Las perforaciones son perpendiculares a las caras sobre las cuales se asienta la unidad de mampostería. Las perforaciones forman celdas en las que se colocan las varillas de refuerzo y se rellenan con mortero de relleno. Estas unidades pueden ser de Clase I (demandan mayor resistencia y espesor de pared) y Clase II (demandan resistencias y espesores moderados).

*Figura 2-2. Unidades de perforación vertical. Fuente: NTC 4205-1*



- Macizas (M): El volumen de vacíos de las celdas no excede el 25% del volumen total de la unidad o no cuentan con perforaciones.

*Figura 2-3 Unidades macizas. Fuente: NTC 4205-1*





### 2.1.2.2 Mortero de pega y mortero de recubrimiento

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante, un material de relleno (agregado fino o arena), agua, y, en ocasiones, aditivos (Sanchez de Guzman, 2001). En particular, en los morteros de cemento, el aglutinante es el cemento y el esqueleto está constituido por granos de arena, tangentes entre sí (Sanchez de Guzman, 2001). Este mortero presenta una elevada resistencia y sus condiciones de trabajabilidad dependen de la proporción de cemento y arena incorporados a la mezcla.

Las características de la arena influyen sobre la calidad del mortero, como la granulometría, el módulo de finura, la forma, la textura de las partículas y el contenido de materia orgánica. Así, si la arena contiene limo y arcilla, la trabajabilidad del mortero aumentará, pero no será muy resistente.

Respecto al contenido de cemento, Salamanca Correa (1985) señala que a medida que aumenta la proporción de cemento en relación con la proporción de arena, el mortero obtenido tiene una mayor resistencia a la compresión, con una variación exponencial. Sin embargo, un mortero con poco cemento es áspero y poco trabajable, dado que las partículas de la arena rozan entre sí y no cuentan con suficiente pasta de cemento que funcione como lubricante (Sanchez de Guzman, 2001). Por otro lado, un mortero con alto contenido de cemento tiene una alta retracción durante el secado, lo que lo hace susceptible al agrietamiento.

La Tabla 2-1 muestra las dosificaciones comúnmente utilizadas para los morteros en Colombia, dependiendo su uso.

Tabla 2-1 . *Uso de los morteros de cemento. Fuente: (Sanchez de Guzman, 2001)*

MORTERO	USOS
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones. Rellenos
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanques subterráneos. Rellenos
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos
1:5	Pañetes exteriores. Pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos.
1:6 y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones.

Las propiedades de los morteros se pueden dividir en dos grupos: propiedades en estado plástico y propiedades en estado endurecido. Las propiedades en estado plástico son la manejabilidad, la retención de agua y la velocidad de endurecimiento; mientras las propiedades en estado endurecido son la retracción, la adherencia, la resistencia (a la compresión y tracción indirecta), la durabilidad y la apariencia. En este trabajo se evaluarán dos de las propiedades mencionadas anteriormente: la manejabilidad, mediante el ensayo de fluidez, y la resistencia a la compresión, propiedades que se tratarán con más detalle a continuación. En particular, se seleccionaron estas propiedades teniendo en cuenta que la resistencia a la compresión se emplea como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero y la fluidez determina la calidad del mortero (Molano Camargo & Torres Castellanos, 2017), lo que afectará su capacidad de penetrar en la malla de fique, garantizando la conexión entre la primera y segunda capa de recubrimiento y, por ende, afectará la resistencia del muro de mampostería.

La manejabilidad es una medida de la facilidad con la cual se puede manipular la mezcla. Un mortero se considera manejable si es capaz de adherirse a la llana, se extiende fácilmente y se adhiere a las superficies horizontales y verticales de la unidad para formar muros de mampostería (Sanchez de Guzman, 2001; Takeuchi, 2010). La manejabilidad de la mezcla se ve afectada por la proporción de cemento y arena, la forma, la textura y el módulo de finura de la arena. Para medir la manejabilidad del mortero, se acepta su fluidez (Sanchez de Guzman, 2001). La Tabla 2-2 muestra que para los usos requeridos en el desarrollo de este trabajo (pega de mampostería y recubrimientos) se sugiere una consistencia plástica con una fluidez entre 100 -120%.

Tabla 2-2. Rangos de fluidez recomendada para diversos tipos de estructura y condiciones de colocación. Fuente: (Sanchez de Guzman, 2001)

CONSISTENCIA	FLUIDEZ %	CONDICIÓN DE COLOCACIÓN	EJEMPLO DE TIPOS DE ESTRUCTURA	EJEMPLO DE SISTEMA DE COLOCACIÓN
Dura (seca)	80 – 100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
Media (plástica)	100 – 120	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres
Fluida (húmeda)	120 – 150	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección

La resistencia a la compresión del mortero es una propiedad importante porque afecta la resistencia a la compresión de la mampostería (Takeuchi, 2010). Aunque el mortero representa solo el 10-20% del volumen total del muro, su efecto en el comportamiento es bastante más considerable (Salamanca Correa, 2001). Además, la resistencia a la compresión es indicativa de la resistencia a tensión por corte y por tracción (Sanchez de Guzman, 2001).

Como ya se ha mencionado, la resistencia del mortero se ve afectada por el porcentaje de cemento en la mezcla y por su densidad, es decir, su porcentaje de materiales sólidos. La densidad del mortero está influenciada por la granulometría de la arena: un mortero fabricado con arena fina (con bajo módulo de finura) será menos denso que un mortero hecho con arena densa (con alto módulo de finura) (Sanchez de Guzman, 2001). Por último, la resistencia del mortero se ve influenciada por el contenido de agua; los morteros con una relación A/C baja van a presentar mayor resistencia que los morteros con una relación A/C alta (Salamanca Correa, 2001).

Ahora bien, de acuerdo con su uso, los morteros se clasifican en morteros de relleno, morteros de pega y morteros de recubrimiento; estos dos últimos serán empleados en este trabajo. El mortero de pega tiene la función estructural de unir las unidades de mampostería y actuar como sello para evitar el paso de agua y aire. Según la norma NSR-10 título D, los morteros de pega se clasifican en H, M, S o N en función de la dosificación mínima de sus componentes y de su resistencia a la compresión. La Tabla 2-3 muestra las especificaciones de cada uno.

Tabla 2-3. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción. Fuente: NSR-10 Título D.

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad <sup>(1)</sup>			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión $f'_{cp}$ MPa <sup>(2)</sup>	Flujo en (%) <sup>(3)</sup>	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada <sup>(4)</sup>	Cemento para Mampostería <sup>(7)</sup>	Arena/Material Cementante <sup>(5)</sup>	
							Mín.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N <sup>(6)</sup>	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

### 2.1.3 Tipos de falla en muros de mampostería

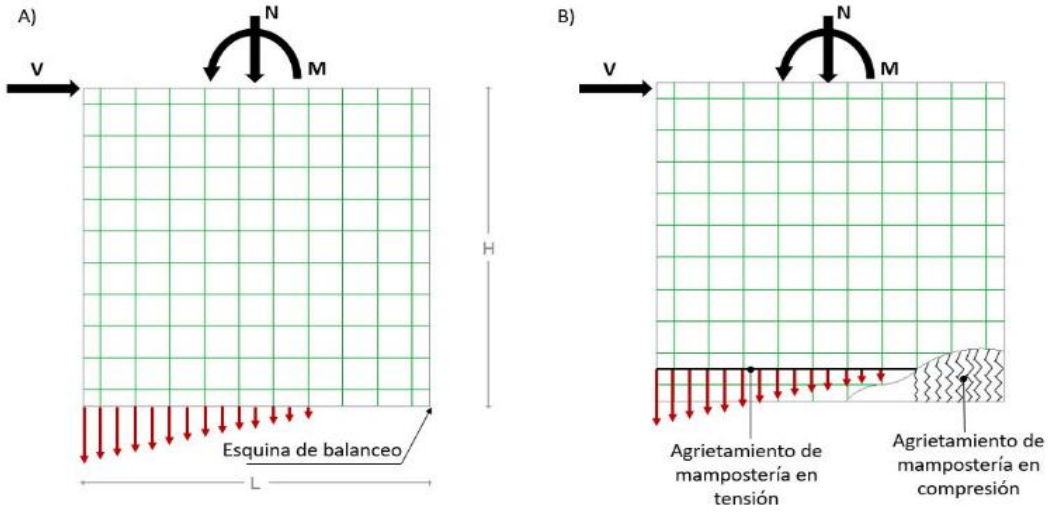
Durante eventos sísmicos, los muros de mampostería pueden presentar tanto fallas en el plano como fallas fuera del plano (Yardim & Lalaj, 2016). Las fallas fuera del plano ocurren por falta de anclaje con los diafragmas de piso y techo o por flexibilidad excesiva del diafragma; esta falla súbita compromete el comportamiento de la estructura bajo cargas gravitatorias (Giraldo Galvis & Mendez Nivia, 2006). Este tipo de falla no está dentro del alcance de este trabajo y sólo se profundizará en las fallas generadas en el plano.

Ahora bien, en cuanto al comportamiento de la mampostería sometida a esfuerzos en el plano, cabe señalar que la mampostería no reforzada se caracteriza por tener una adecuada resistencia a la compresión, pero una baja resistencia a la tensión. Por lo tanto, en eventos sísmicos en los que se generan cargas laterales que incrementan los esfuerzos de tensión y estos esfuerzos superan la capacidad de los materiales (unidades de mampostería y mortero) o de la interfaz entre ellos (las juntas), se genera una falla en el elemento, que suele ser una falla frágil y explosiva (Giraldo Galvis & Mendez Nivia, 2006).

Así, los muros de mampostería no reforzados sujetos a carga en el plano pueden presentar cuatro modos de falla: pandeo lateral (balanceo), aplastamiento en las esquinas, deslizamiento por cortante y tensión diagonal (Yardim & Lalaj, 2016). El pandeo lateral (balanceo) y el aplastamiento en las esquinas son modos de falla controlados por flexión que se producen en muros con un espesor reducido (Meriggi et al., 2021). Es probable que el pandeo lateral (balanceo) se produzca en muros construidos con unidades de mampostería

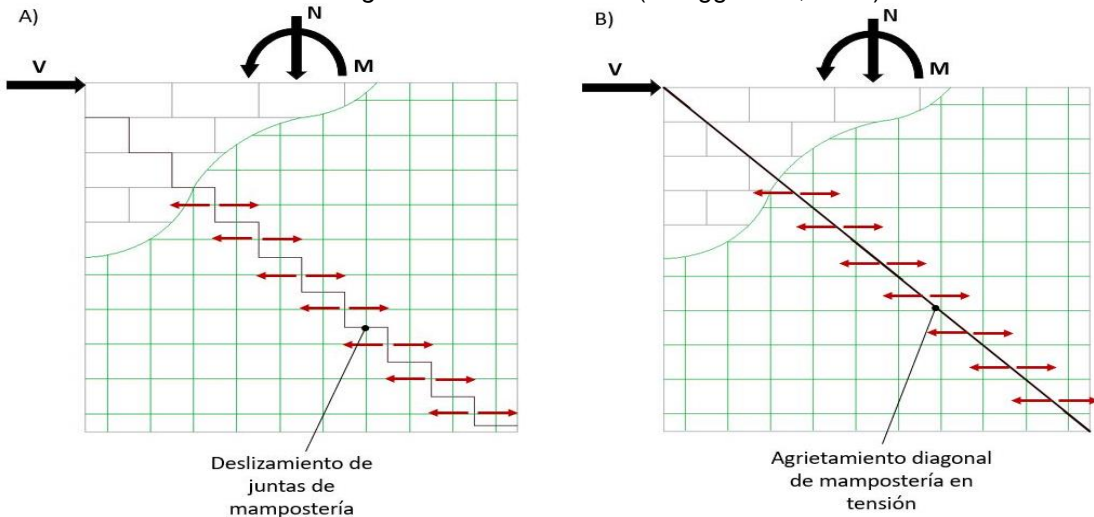
fuerzas y sometidos a cargas axiales bajas, mientras el aplastamiento en las esquinas suele producirse en muros construidos con mampostería débil o sometidos a cargas de compresión altas (Meriggi et al., 2021).

Figura 2-4. Fallas controladas por flexión. A) Falla por pandeo lateral en el plano. B) Falla por aplastamiento de las esquinas. Modificado de: (Meriggi et al., 2021)



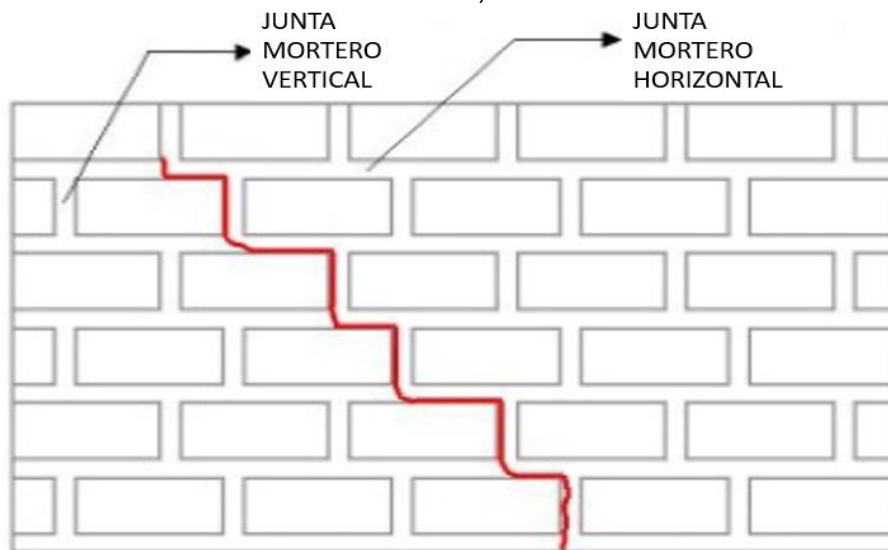
Por otro lado, los modos de falla por deslizamiento por cortante y por tracción diagonal son modos de falla controlados por fuerzas cortantes y que suelen producirse en muros de poca altura sometidos a cargas de compresión intermedias (Meriggi et al., 2021). Los esfuerzos por cortante suelen combinarse con esfuerzos de compresión generados por las cargas gravitacionales (Bonett Díaz Ricardo León, 2003)

Figura 2-5. Fallas controladas por cortante. A) Falla por deslizamiento por cortante. B) Falla por tracción diagonal. Modificado de: (Meriggi et al., 2021)



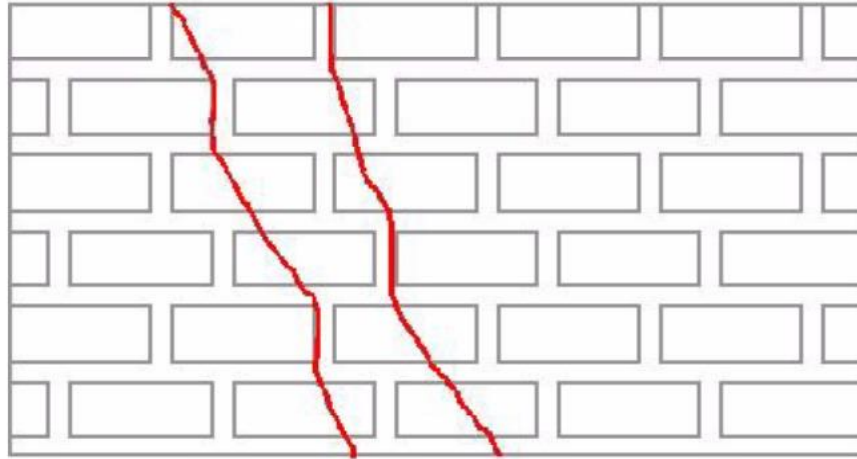
El deslizamiento por cortante o fricción-cortante está asociado a la cohesión y fricción generada entre la unidad de mampostería y el mortero de pega (Meriggi et al., 2021). Esta falla ocurre a bajos esfuerzos de compresión y es causado por la débil adherencia de las interfaces mortero – unidad, lo que genera esfuerzos cortantes deslizantes en las juntas horizontales (Bonett Díaz Ricardo León, 2003). El deslizamiento por cortante genera una distribución escalonada de las grietas, como se muestra en la Figura 2-6, donde las grietas se extienden en los extremos de las juntas verticales (planos de debilidad en la mampostería), donde la resistencia a la adherencia disminuye debido a la contracción y a la presencia de vacíos (Bonett Díaz Ricardo León, 2003).

Figura 2-6. Agrietamiento escalonado - fallo de Fricción- Cortante. Fuente: (Bonett Díaz Ricardo León, 2003)



Una falla por tracción diagonal está relacionada con la resistencia a la tracción del mortero de pega y de las unidades de mampostería, y suele producirse con cargas de compresión mayores que la falla por deslizamiento (Meriggi et al., 2021). La Figura 2-7 muestra las grietas producto de este tipo de falla, donde se observa se inclinan dependiendo de la orientación de los esfuerzos principales en la unidad, siguiendo la dirección de las juntas verticales, pero atravesando las unidades de mampostería (Bonett Díaz Ricardo León, 2003). A diferencia de la falla por fricción-cortante, la resistencia a corte en las juntas de mortero se incrementa debido a los efectos de los esfuerzos de compresión, por lo que la falla ocurre directamente en la unidad de mampostería.

Figura 2-7. Agrietamiento de las unidades por falla de tracción diagonal. Fuente: (Bonett Díaz Ricardo León, 2003).



La respuesta a cortante de los muros de mampostería es más compleja (Yardim & Lalaj, 2016), porque depende de la combinación de dos mecanismos: la resistencia a la adherencia y la resistencia a fricción entre las juntas de mortero y las unidades (Bonett Díaz Ricardo León, 2003). Por esta razón, la vulnerabilidad de los muros de mampostería no reforzados (URM) sometidos a esfuerzos de corte radica en la debilidad de las juntas a tensión y cortante; además debido a su naturaleza robusta, presentan un comportamiento frágil y baja ductilidad (Yardim & Lalaj, 2016; Bui et al., 2015).

Respecto a la resistencia a la adherencia, existen muchos factores involucrados, pero los más importantes son las características de los materiales (Bonett Díaz Ricardo León, 2003):

- Unidades de mampostería: porosidad, tasa inicial de absorción de agua, rugosidad de la superficie, contenido de humedad y reactividad química.
- Mortero de pega: Características de arena, relación limo-cemento, retención de agua, contenido de agua y presencia de aditivos.

Bui et al. (2015) señalan que la comunidad científica ha establecido como prioridad garantizar el comportamiento a cortante de los muros de mampostería, de allí que, el alcance de este trabajo sea evaluar experimentalmente el comportamiento a corte de muros de mampostería reforzados externamente con malla de fibra de fique embebida en mortero de recubrimiento, comparando el comportamiento de muros de mampostería no reforzada (URM) contra los muros de mampostería reforzados con esta alternativa, al ser sometidos a una carga de compresión en su diagonal.

## **2.1.4 Metodologías de rehabilitación y reforzamiento**

Debido a la gran cantidad de edificaciones con muros de mampostería no reforzada, su reconstrucción no es la solución más viable en términos económicos y ambientales (Bernat et al., 2013). Por el contrario, se deben emplear metodologías de reforzamiento apropiadas para este tipo de elementos, teniendo en cuenta los modos de falla que pueden presentarse (Bui et al., 2015). En las últimas dos décadas, las técnicas de recuperación y reforzamiento han ido progresando de manera significativa (Yardim & Lalaj, 2016), ofreciendo una amplia gama de soluciones.

Dentro de las técnicas típicas de recuperación, Yardim y Lalaj (2016) indican que se encuentran la inyección de lechadas de mortero, costura de grietas y adición de mortero en las juntas de unión de las unidades de mampostería (repointing), estas alternativas solamente permiten cerrar las grietas y restaurar la capacidad de la pared hasta cierto grado.

### **2.1.4.1 Metodología de reforzamiento en muros de mampostería**

A nivel de reforzamiento tanto del elemento como de las edificaciones construidas con mampostería no reforzada (URM), Yardim and Lalaj (2016) indican que se han implementado técnicas como arriostramiento, adición de muros de cortante, pórticos de arriostramiento en concreto reforzado o acero, post-tensado, aislamiento de la base, aplicación de capas de concreto bajo la presión de aire comprimido (Shotcreting) y revestimientos o encamisados. Estas técnicas de reforzamiento tienen como objetivo mejorar la capacidad de carga de la estructura y/o su ductilidad, con lo cual se disminuye su vulnerabilidad sísmica (Bui et al., 2015), y se caracterizan por dar ductilidad a la mampostería, mantener la resistencia de la unidad estructural y reducir casi por completo las fallas frágiles y explosivas que presentan los muros de mampostería durante eventos sísmicos (Carrillo Trujillo, 2008).

A partir de la recopilación bibliográfica realizada por Carrillo Trujillo (2008), se presenta en la Tabla 2-4 diferentes tipos de reforzamiento, su procedimiento y efecto mecánico de su implementación en muros de mampostería no reforzada (URM).



Tabla 2-4. Técnicas de reforzamiento de muros de mampostería

<b>Tipo de Reforzamiento</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Efecto del reforzamiento</b>
<b>Con malla electrosoldada</b>	Encamisar ambos lados de la mampostería con malla electrosoldada en franjas verticales y horizontales, interconectadas con alambre que atraviesan el muro y cubierta con mortero.	Aumenta la resistencia en el elemento y disminuye la falla frágil por corte.
<b>Con láminas de Fibra de carbono reforzada con polímeros (FCRP)</b>	Lanzar chorros de arena sobre la superficie del muro, que permitan una superficie áspera en la cual se adhieren las láminas de FCRP	Las láminas de FCRP absorben los esfuerzos de tensión y disminuye los esfuerzos de corte que soporta el muro.
<b>Con varillas de fibra de vidrio</b>	Abrir una ranura en las juntas horizontales, retirar el polvo, aplicar una capa de epóxido, instalar la varilla en la ranura y enrasar con epóxido.	Incrementa la capacidad de carga del elemento, genera una mejor distribución de las fisuras en el elemento y evita una falla súbita.
<b>Con mallas de polímero</b>	Encamisar ambos lados de la mampostería con mallas de polímero y conectada al muro por medio de conectores, por último, aplicar una capa de mortero de recubrimiento.	Ayuda a distribuir las fisuras en ambas direcciones diagonales, disminuye la fragilidad del elemento, aumenta la resistencia y disipación de energía.
<b>Con cables</b>	Se colocan dos cables en forma de "X" sostenidos por placas ancladas en las esquinas superior e inferior del muro, pero fijados solamente en una esquina para permitir su desplazamiento.	Mejora la capacidad de disipación de energía, aumenta la resistencia, absorbe los esfuerzos de tensión y mejora la ductilidad del elemento.

Como se mencionó previamente, existe gran variedad de técnicas de reforzamiento y con el desarrollo de nuevos materiales se ha investigado la implementación como revestimientos de polímeros con fibras (FRP), morteros reforzados con fibras (FRM) y el uso de morteros reforzados con textiles (TRM). Esta última técnica de reforzamiento corresponde a la que será implementada en el desarrollo de este trabajo y por lo cual a continuación se profundizará en ella.

#### **2.1.4.2 Mortero reforzado con textiles (Textile reinforcement mortal - TRM)**

El mortero reforzado con textiles (TRM) es un material compuesto que ha sido empleado para reforzar estructuras de mampostería y de hormigón, donde este sistema consiste en adherir a la superficie del elemento una malla de fibra con un recubrimiento a base de matriz inorgánica (Bernat et al., 2013). Algunos autores indican que el TRM se ha desarrollado

específicamente para el reforzamiento de mampostería y en particular es la solución más adecuada para el reforzamiento de muros de mampostería al estar sometidos a esfuerzos de corte en el plano (Yardim & Lalaj, 2016; Papanicolaou et al., 2007; Bernat et al., 2013).

Shabdin Zargarán y Attari (2018) evaluaron la efectividad del incremento de resistencia a corte de muros URM con morteros reforzados con textiles de fibra de vidrio (TRM), mediante ensayos de tracción diagonal, empleando configuraciones de muros reforzados en una o las dos caras. Durante esta investigación se comprobó que el uso de TRM es eficiente para el incremento de la resistencia a corte en los muros especialmente en aquellos que estaban reforzados en ambas caras, es importante resaltar que se incrementó la capacidad de deformación lo que llevó a que las paredes presentaran una falla de manera dúctil, que es el resultado esperado con el fin de reducir los riesgos para los habitantes de las viviendas.

Cabe resaltar que, los muros reforzados en una sola cara mediante TRM en la investigación de Shabdin, Zargarán y Attari (2018) presentaron principalmente falla por deformaciones fuera del plano, mientras que los muros que se encontraban reforzados en ambas caras presentaron aplastamiento en los puntos de apoyo debido a la compresión ejercida sobre la diagonal del muro. Esta falla fuera del plano en muros reforzados por una sola cara se genera debido a la asimetría ocasionada en la sección transversal del elemento, lo que origina que la cara no reforzada presente deformaciones excesivas y por ende el modo de falla es menos satisfactorio que reforzar con TRM ambas caras del muro (Yardim & Lalaj, 2016).

La influencia de los textiles en el comportamiento mecánico de los muros de mampostería al momento de la falla depende del tipo de falla generada (Meriggi et al., 2021). En el caso de fallas generadas por pandeo lateral (balanceo), la resistencia a tracción de la tela impide la rotación de la base del muro, siempre que la malla de refuerzo se encuentre conectada a la superficie de apoyo. En el caso del aplastamiento de las esquinas, la eficacia de los textiles se ve restringida por la debilidad inherente de los materiales del muro que pueden presentar una baja resistencia a la compresión.

El reforzamiento de muros con textiles contribuye especialmente en los modos de falla controlados por cortante (Meriggi et al., 2021; Yardim & Lalaj, 2016), donde la resistencia a tracción del tejido mejora la respuesta mecánica dado que permite una distribución más amplia

del patrón de las grietas y genera una falla prolongada y gradual, lo que se traduce en un mejor modo de falla (Yardim & Lalaj, 2016).

En comparación con los muros URM donde las grietas siguen las juntas y se puede generar un deslizamiento de las hiladas al alcanzar la resistencia máxima a corte, en los muros reforzados con TRM se desarrollan múltiples grietas que se extienden a través de las unidades de mampostería, dado que el refuerzo evita la concentración de daños y el deslizamiento (Meriggi et al., 2021). La respuesta presentada por el TRM se genera debido a que presenta un comportamiento a tracción no lineal con múltiples fisuraciones, lo que genera una mayor capacidad de deformación en el elemento (Bui et al., 2015).

Meriggi et al. (2021) indican que este tipo de sistema de reforzamiento mejora la resistencia a corte de la pared de mampostería mediante los siguientes mecanismos:

- *“Mecanismo de resistencia de bielas y tirantes”*: El refuerzo con textiles actúa como un tirante gracias a la resistencia a la tracción del tejido a través de las fisuras, mientras que la mampostería se comporta como un puntal al estar sometido a compresión. Este mecanismo contribuye después de que se generan grietas en la pared y requiere una conexión efectiva del recubrimiento con el refuerzo más allá de los bordes de las paredes para evitar que se desprege de los extremos y se genere deslizamiento por corte en la junta del mortero de recubrimiento y la mampostería.
- Mecanismo de celosía diagonal comprimida: Este mecanismo se genera debido al aumento de la sección transversal resistente a lo largo del eje sometido a compresión y la resistencia a la compresión proporcionada por la matriz del refuerzo. La contribución del mortero de recubrimiento sometido a compresión es eminentemente frágil y puede verse limitado por el desprege, el pandeo local o el agrietamiento entre el muro y el reforzamiento.
- Mecanismo de confinamiento: Cuando se presenta una adecuada adherencia e interacción entre el sustrato y el refuerzo, se genera un incremento en las propiedades mecánicas del muro de mampostería, debido a que se comporta como un material compuesto, donde se garantiza la transferencia de carga y esfuerzos.

Frente a este último mecanismo, es importante mencionar que en los muros con reforzamiento externo suele generarse una disgregación o separación de la capa de refuerzo al someterse a cargas, por esta razón es vital el uso de conectores transversales para restringir la deformación transversal del reforzamiento (Shabdin et al., 2018; Meriggi et al., 2021; Yardim & Lalaj, 2016). Cuando se separa el refuerzo del muro, se genera una transferencia de toda la carga aplicada únicamente a la mampostería, la cual tiende a desintegrarse generando una falla frágil en el elemento, como se muestra en la Figura 2-8.

*Figura 2-8. Desprendimiento del refuerzo con TRM. Fuente: (Yardim & Lalaj, 2016)*



Por último, el reforzamiento con TRM limita los efectos de segundo orden y aumenta la resistencia del muro al estar sometido a cargas de compresión excéntrica, por lo que presenta un comportamiento más rígido tanto en el plano del elemento como fuera (Bernat et al., 2013). Bui et al. (2015) resalta que los estudios desarrollados frente a TRM carecen de diversidad de materiales estudiados y configuraciones de refuerzo. Así, teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante el reforzamiento de muros de mampostería con textiles embebidos en una matriz cementante se plantea el uso de materiales alternativos que involucren conceptos de sostenibilidad a bajo costo como textiles fabricados a partir de fibras naturales.

## **2.1.5 Normatividad rehabilitación de muros de mampostería**

A continuación, se presentan los lineamientos normativos establecidos en las normas técnicas complementarias (NTC) de México frente a la rehabilitación de muros de mampostería y lineamientos normativos del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) de Perú frente al reforzamiento con geomalla en edificaciones de adobe. Esta última, se presenta dentro de este marco normativo teniendo en cuenta que, aunque el material del muro corresponde a adobe, las recomendaciones a nivel constructivo realizadas en la normatividad frente al uso de geomallas son pertinentes para futuras investigaciones sobre el reforzamiento de muros de mampostería mediante mortero y tejido de fique (fique TRM).

### **2.1.5.1 NTC para diseño y construcción de estructuras de mampostería**

Las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Mampostería (2020) de la normatividad mexicana, establece que para determinar la necesidad de rehabilitación se debe establecer el tipo de daño, el cual puede ser un daño ligero (donde la magnitud del daño estructural es ligera o insignificante y la edificación cumple con la normatividad vigente) o un daño mayor (donde la magnitud del daño estructural es moderada o severa y la edificación no cumple con la normatividad vigente). En el caso de daños ligeros o insignificantes debe realizarse una restauración o reparación de los elementos afectados, por el contrario, si el daño es moderado o severo se debe realizar una evaluación donde se establezca si es posible llevar a cabo una reparación de los elementos dañados y modificar la capacidad de toda la estructura o se recomienda la demolición total o parcial de la estructura.

#### **2.1.5.1.1 Reparación de elementos de mampostería**

La reparación o restauración de un elemento de mampostería tiene como objetivo recuperar su capacidad estructural, sin embargo, el nivel de restauración de su capacidad estructural depende del modo de comportamiento del elemento, la magnitud del daño y la calidad de la reparación realizada, por lo cual se debe proveer que la capacidad estructural considerada en el análisis y evaluación de la edificación sea factible de alcanzar acorde a los factores previamente mencionados. Cabe mencionar que los elementos que presenten algún tipo de daño y que se contemple sean reforzados deben ser previamente reparados. A continuación,

se señalan algunas de las alternativas de reparación formuladas por la norma, dependiendo el daño que presente el elemento.

✓ **Reemplazo de piezas, mortero, barras y concreto dañados**

Cuando sea necesario sustituir materiales dañados en un muro de mampostería, porque este presenta un daño severo o muy grave es necesario apuntalar el elemento previo a su reparación. Se debe considerar:

- a. Una adecuada adherencia entre los materiales existentes y los materiales nuevos.
- b. Cambios volumétricos debidos a la contracción por fraguado.
- c. Uso de materiales del mismo tipo y con una resistencia al menos igual al material original

✓ **Reparación de daños debido a la corrosión**

Cuando el acero de refuerzo de un muro de mampostería presente corrosión es necesario retirar la mampostería que se encuentre agrietada para exponer totalmente las varillas corroídas y sanas. Las varillas de refuerzo (Sanas y corroídas) y la superficie del material existente deben limpiarse para garantizar una adecuada adherencia entre los materiales y garantizar su comportamiento como un material compuesto. Las varillas de acero corroídas que tengan una pérdida de más del 25% de la sección transversal deben ser reemplazadas o incrementar la sección de refuerzo mediante la incorporación de varillas adicionales ancladas adecuadamente. Posterior a la limpieza de las superficies, el reemplazo de elementos de refuerzo o la instalación de nuevas varillas se debe proteger el refuerzo mediante mampostería o concreto con una menor permeabilidad a los materiales existentes.

✓ **Reparación de grietas**

Se plantean tres alternativas para realizar la reparación de las grietas que presenta un muro en mampostería (Tabla 2-5), entre las cuales se encuentran: inyección de fluidos, inserción de piezas metálicas y recubrimientos con mallas electrosoldadas.

Tabla 2-5. Técnicas de reparación de grietas. Adaptado de (Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Mampostería, 2020)

<b>Técnicas</b>	<b>Materiales</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Recomendaciones</b>
<b>Inyección de fluidos</b>	Resinas o fluidos a base de polímeros o cementos hidráulicos	Se debe retirar el acabado del muro al menos 300mm adyacentes a la grieta. Inyectar el fluido en la grieta y vacíos existentes. En caso de grietas mayores a 5mm se podrán rellenar con piezas pequeñas de mampostería (Rajuelas).	Viscosidad y tipo de resina epóxica se determinan en función del ancho de la grieta y la capacidad de absorción de las piezas. Los cementos hidráulicos se dosifican para que fluyan por las grietas y vacíos sin aumentar la segregación, sangrado o contracción plástica.
<b>Inserción de piezas metálicas</b>	Placas, grapas, pernos u otros elementos metálicos.	Instalar las piezas metálicas ancladas a la mampostería, de manera que crucen la grieta existente. Los elementos se anclan para garantizar que desarrollen la fuerza de diseño. El refuerzo se cubre con mortero impermeable para protegerlos de la intemperie	Se puede insertar las varillas metálicas en perforaciones realizadas a la mampostería, adhiriendo con lechada o epóxico inyectado en las perforaciones. Las perforaciones deben realizarse con un equipo que no dañe la mampostería.
<b>Recubrimientos sobre mallas</b>	Bandas de malla de alambre soldado	La malla se instala sobre la grieta y se conecta a la mampostería, luego se realiza un recubrimiento con mortero.	Las mallas deben anclarse a la mampostería para que puedan alcanzar la fuerza de diseño.

#### **2.1.5.1.2 Reforzamiento de elementos en mampostería**

Cuando se requiera modificar la capacidad de deformación o resistencia de un elemento estructural, es necesario realizar el reforzamiento de este. El reforzamiento genera cambios en su rigidez que deben tomarse en cuenta en el análisis estructural, dado que se debe evaluar que los elementos reforzados no produzcan que los elementos no intervenidos alcancen prematuramente, estados límites de servicio o de falla, que puedan producir comportamientos desfavorables y no estables en la edificación.

✓ ***Encamisado de elementos de mampostería***

Los muros de mampostería se pueden reforzar colocando mallas metálicas o plásticas recubiertas con mortero, encamisando con ferrocemento o con materiales plásticos adheridos con resinas. Cuando el encamisado se realiza mediante materiales plásticos adheridos con resinas se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- a. Retirar el recubrimiento y proporcionar una superficie lisa que permita la adherencia de los materiales plásticos y las resinas, esto con el fin de garantizar la transferencia de esfuerzos entre el elemento de mampostería y el material de refuerzo.
- b. Las aristas del muro deben redondearse para evitar la ruptura de las fibras por el desgaste que estas puedan sufrir por fricción.
- c. Garantizar la compatibilidad entre las resinas y las fibras.
- d. Cuando se empleen resinas que se degraden al estar expuestas a rayos ultravioletas y cuando los elementos se prevea que estarán expuestos a la radiación solar, el encamisado se debe recubrir con un material protector.

✓ ***Adición de elementos confinantes de concreto reforzado***

Las edificaciones que no cuentan con columnas o vigas de confinamiento o que estas no cumplan con la normatividad vigente, se deben incorporar estos elementos en la edificación, los cuales deben diseñarse siguiendo los requerimientos normativos y garantizando que el refuerzo longitudinal se encuentre anclado de manera que alcance el esfuerzo de fluencia especificado.

✓ ***Adición o retiro de muros***

En las edificaciones que presenten irregularidades, defectos en la estructuración, que requieran reforzar la estructura en su conjunto o efectuar una modificación al proyecto original, se deben incorporar o retirar muros estructurales. Pero se debe tener en cuenta que la rigidez de los nuevos muros incorporados sea compatible con la estructura original, de manera que se garantice un trabajo conjunto. En particular, se deben considerar las conexiones entre los nuevos elementos y la estructura original; así como la transmisión de las cargas a la cimentación.



Cabe anotar, que al momento de realizar la reparación o reforzamiento de un elemento de mampostería es necesario diseñar las conexiones entre los elementos nuevos y los existentes, de manera que se logre un comportamiento monolítico y asegurar la transmisión de esfuerzos entre ellos.

### **2.1.5.2 Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)**

El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) corresponde al marco normativo peruano que establece los criterios y requisitos mínimos de calidad para el diseño, producción y conservación de las edificaciones y habilitaciones urbanas. En particular, en el anexo 1 del título E.080 “Refuerzo de geomalla en edificaciones de adobe” establece lineamientos normativos que pueden extrapolarse a futuras investigaciones que se realicen implementando la metodología de reforzamiento externo mediante recubrimiento de mortero con malla de fique en muros de mampostería.

A nivel del refuerzo se deben tener las siguientes consideraciones (Ministerio de vivienda construcción y saneamiento, 2017):

- a. Los refuerzos que sean externos a los muros deben estar embebidos en el pañete.
- b. Se deben usar refuerzos en ambas direcciones para controlar los desplazamientos y evitar sufrir colapsos parciales.
- c. Los refuerzos se fijan desde la base del sobrecimiento hasta la viga superior. La conexión entre el muro y la cimentación debe realizarse uniando las mallas de refuerzo de los muros al sobrecimiento; de igual modo la conexión entre el muro y el techo se debe realizar amarando las mallas de refuerzo del muro a la viga superior.
- d. Cuando se emplean refuerzos de tipo vegetal como sogas de cabuya, sisal o fibras naturales trenzadas, el refuerzo debe estar conformado por mallas ortogonales externas. Las conexiones de los elementos verticales y horizontales se realizan con cuerdas de nylon o sogas sintéticas, usando nudo llano.
- e. Se debe garantizar la flexibilidad y durabilidad del material para su uso como refuerzo embebido en tierra y en nuestro caso en mortero.
- f. Los muros portantes o no portantes, incluyendo los vanos deben envolverse con las geomallas, tensándolas uniformemente.
- g. El uso de otro tipo de mallas solo es permitido si acredita su capacidad de sismorresistencia en ensayos cíclicos a escala natural.

- h. El refuerzo horizontal debe coincidir con los niveles inferior y superior de los vanos.

## 2.2 Fibras naturales

Las fibras naturales son materiales conformados por filamentos de origen biológico cuyas propiedades físicas, químicas y mecánicas las han hecho aptas para su uso en construcción debido a características como su apariencia, textura, longitud, resistencia y flexibilidad (Rendón & Neyra, 2020). Las fibras naturales empleadas para el refuerzo de matrices cementantes se pueden clasificar en tres tipos según su origen (Onuaguluchi & Banthia, 2016). El primer tipo son las fibras de origen animal, que se obtienen a partir de las secreciones de glándulas especializadas o productos de folículos pilosos de animales o insectos; entre estas fibras se encuentran la seda, la lana y la fibra capilar. El segundo tipo son las fibras de origen mineral, entre las que se encuentran el asbesto, la wollastonita (mineral de grupo VII - silicatos) y la palygorskita (mineral de la clase de los filosilicatos). Por último, las fibras vegetales se extraen de las plantas. Estas últimas son de interés en el desarrollo de este trabajo, ya que la fibra de fique es de origen vegetal.

Ahora bien, según Onuaguluchi & Banthia (2016), las fibras de origen vegetal se clasifican según su origen como fibras de vasos conductores del tallo (yute, lino, abacá, cáñamo, ramio, plátano, soja, kenaf), de hoja (hoja de piña, sisal, caroa, harakeke, henequén, palma, fique), de fruto o semilla (coco, cáscara de arroz, algodón, ciba), de tallo (maíz, caña de azúcar, berenjena, girasol, paja de cultivos como cebada, trigo y arroz), de hierba (centeno, bambú, hierba serpiente, hierba elefante, bagazo) y de madera (una variedad de árboles que se divide en maderas blandas y duras). Las fibras de hoja, en particular, son fibras gruesas y duras obtenidas por raspado manual o extracción mecánica y tienen una gran resistencia mecánica.

Las fibras vegetales se consideran una alternativa viable para sustituir a las fibras sintéticas como las fibras de vidrio o de carbono (Onuaguluchi & Banthia, 2016; Ramesh et al., 2017) debido a sus numerosas ventajas que se enumeran en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6. Ventajas y desventajas de las fibras naturales. Fuente: (Stamboulis et al., 2000)

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Recurso renovable/Reciclable	Propiedades dependen de diversos factores
Biodegradable	Producción artesanal (pocos procesos industrializados)
Bajo costo de materias primas	Falta de estudios robustos
Baja densidad	Baja adherencia fibra matriz
Alta porosidad	Baja resistencia al fuego
CO2 neutral	Absorción de humedad
Buena resistencia a la tracción	Aplicaciones no estructurales
Buen módulo de Young	Materiales finales de alto costo
No genera residuos cuando se incinera	Carencia de procesos de fabricación robustos
Baja energía consumida durante su fabricación	Baja temperatura operacional
No generan irritación en la piel	Susceptible al ataque de organismos vivos
No abrasivo con máquinas	

Una de las desventajas de las fibras vegetales es que sus propiedades dependen de varios factores que ocurren a través de las diferentes etapas de su ciclo de obtención (Tabla 2-7). El proceso de obtención de la fibra de fique adquirida para el desarrollo de este trabajo no cuenta con ningún tipo de trazabilidad y se considera más un proceso artesanal, por lo que es de esperar que existan variaciones en los resultados obtenidos durante su caracterización.

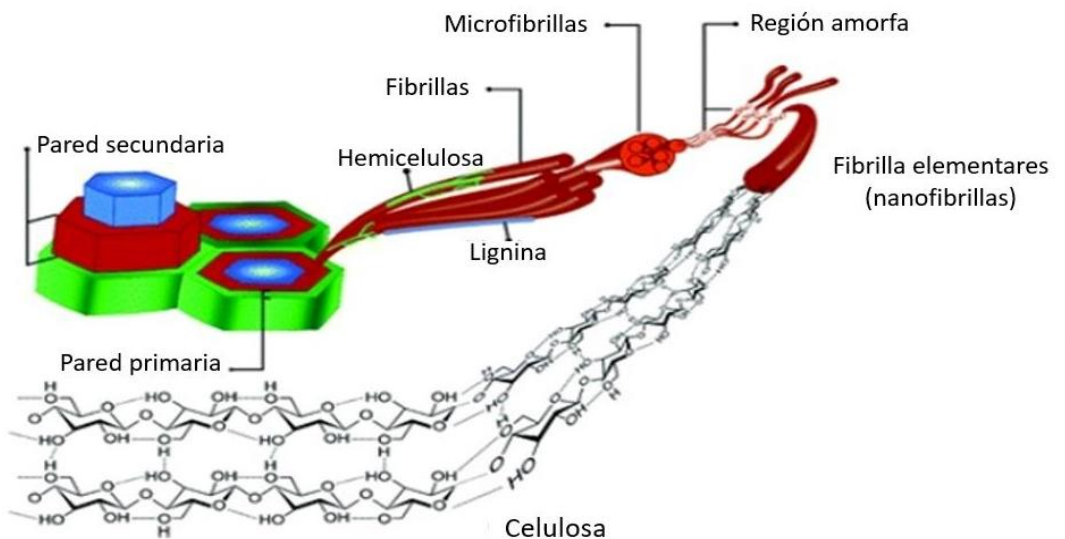
Tabla 2-7 Factores que afectan la calidad de las fibras vegetales.

<b>Etapas</b>	<b>Factores que afectan la calidad de la fibra vegetal</b>
<b>Producción</b>	Especie de la planta Condiciones de cultivo Ubicación del cultivo Localización de la fibra en la planta Clima local
<b>Cosecha</b>	Madurez de la fibra: -Espesor de la pared celular -Aspereza de las fibras -Adherencia entre las fibras y la estructura circundante
<b>Extracción</b>	Tipo de método de desfibrado
<b>Suministro</b>	Condiciones de transporte Condiciones de almacenaje Edad de la fibra

Las fibras vegetales tienen una estructura jerárquica (Figura 2-9), en la que la fibra está compuesta por un conjunto de fibras elementales (células de fibras vegetales), cuyas paredes están formadas por microfibrillas, que a su vez están conformadas por nanofibrillas de celulosa (también conocidas como fibrillas elementales, con diámetro entre 2-20nm) (Rojas et al., 2015). Estas últimas son la unidad estructural básica de las fibras vegetales y resultan de la unión de 30-100 cadenas de celulosa, algunas de las cuales se organizan en regiones ordenadas (cristalinas) y desordenadas (amorfas) (Rojas et al., 2015). Las fibras elementales

están unidas por lignina y hemicelulosa tanto transversal como longitudinalmente. Y en sentido longitudinal, los extremos de las fibras elementales se sobreponen para formar filamentos multicelulares (Pinzón Galvis, 2013).

Figura 2-9. Estructura jerárquica de la celulosa extraída de las plantas. Modificado de: (Rojas et al., 2015)

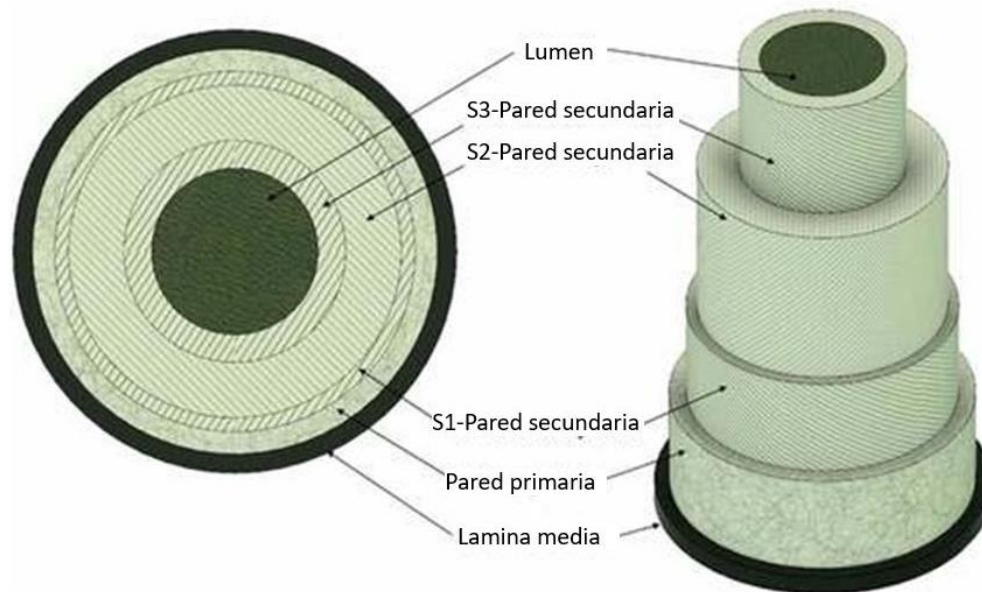


El esquema de la constitución estructural de una célula de fibra vegetal (fibra elemental) se muestra en la Figura 2-10. En esta figura, podemos observar un canal central, denominado lumen, que es el responsable de la circulación de nutrientes y agua. Alrededor del lumen se encuentra la pared celular, que consta de varias capas (lámina media, pared primaria y pared secundaria). La pared celular de lignocelulosa es una estructura natural conformada por varios compuestos químicos dispuestos en espiral. Entre los compuestos químicos se encuentran la celulosa, la hemicelulosa, la lignina, la cera, la ceniza, la pectina y la humedad.

Las capas de la pared celular están compuestas por microfibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de hemicelulosa y lignina (Akil et al., 2011; Laverde et al., 2022). La pared secundaria se divide en pared secundaria externa (S1), pared secundaria media (S2) y pared secundaria interna (S3) (Chokshi et al., 2022). La pared celular primaria controla el ritmo y la dirección del crecimiento, las interacciones célula-célula y proporciona soporte estructural y resistencia mecánica (Chokshi et al., 2022). Las paredes secundarias están conformadas principalmente de celulosa, la resistencia mecánica de la fibra depende de esta pared y el

contenido de celulosa es directamente proporcional al módulo de Young y a la resistencia a la tracción de la fibra (Chokshi et al., 2022; Laverde et al., 2022).

*Figura 2-10. Representación esquemática la célula de la fibra vegetal. Modificado de: (Akil et al., 2011)*



Ahora bien, respecto a los tres biopolímeros que conforman las fibras cabe resaltar lo siguiente:

- La función principal de la celulosa es proporcionar estabilidad y resistencia a la pared celular de la planta. Tiene una estructura cristalina, fuerte y resistente a la hidrólisis (Barbosa Galeano & Mayorga Rojas, 2015).
- La hemicelulosa tiene la función de contribuir al fortalecimiento de la pared celular a través de su interacción con la celulosa, y en algunas paredes interactúa con la lignina. Tiene una estructura aleatoria y amorfa, por lo que es fácilmente hidrolizada por ácidos, bases diluidas y enzimas. Es un heteropolímero que pertenece a la familia de los polisacáridos (Barbosa Galeano & Mayorga Rojas, 2015).
- La lignina es una macromolécula completa con gran variedad de grupos funcionales y más de 10 tipos de enlaces intermoleculares, incluyendo enlaces éter. Se define como un polifenol amorfo con una estructura tridimensional formada por la asociación de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (Barbosa Galeano & Mayorga Rojas, 2015). La lignina no se hidroliza fácilmente y está unida a la celulosa por enlaces fuertes. Su

función principal es proporcionar soporte en la estructura principal, recubriendo la celulosa y hemicelulosa del ataque de microbios.

Por último, Onuaguluchi & Banthia (2016) relacionan la influencia de la incorporación de fibras naturales no tratadas en las propiedades de matrices cementicias en estado fresco y endurecido:

- La incorporación de fibras naturales (yute, pulpa de eucalipto, coco y sisal) provoca una disminución en la trabajabilidad de la mezcla, la cual depende del aspecto de la fibra (longitud) y de la dosis de fibras incorporadas a la mezcla. Esto se debe a la absorción de humedad por parte de las fibras naturales hidrófilas. Para eliminar este efecto negativo, se recomienda reducir los componentes químicos de las fibras que absorben agua, humedecer las fibras antes de su incorporación a la mezcla o tener en cuenta el porcentaje de absorción de agua en el diseño de la mezcla.
- Las fibras naturales (bagazo de caña de azúcar, cáñamo, compuestos de madera) tienen un efecto adverso en la hidratación de los compuestos de cemento, lo que provoca un retraso en el tiempo de fraguado y un bajo calor de hidratación. Las causas de esta reacción se atribuyen a la hidrólisis alcalina de la lignina, la solubilización parcial de la hemicelulosa y la disolución de azúcares solubles (la hemicelulosa es un polisacárido que contiene diferentes tipos de azúcar en su composición), que producen compuestos de calcio que disminuyen la temperatura de hidratación del cemento y retrasan la formación de productos de hidratación. Para ello, se recomienda el uso de fibras pretratadas con bajo contenido de lignina, el aumento de la temperatura de curado, el uso de aceleradores químicos y la adición de materiales complementarios con una elevada superficie específica, como la piedra caliza finamente molida.
- Por el contrario, la incorporación de fibras naturales (coco, sisal y lino) aumenta la resistencia a la contracción plástica y, por tanto, contribuye al control del agrietamiento en los morteros. Esto se debe a que mejora el comportamiento de la matriz frente a las tensiones de tracción generadas en la mezcla durante el fraguado, al tener las fibras un módulo de elasticidad mayor comparado con el módulo de la matriz en edades tempranas, pero también puede atribuirse a una unión adecuada entre la matriz y las fibras. Cabe señalar que en estas investigaciones se utilizaron fibras cortas con una dosificación baja, lo que difiere de este trabajo en el que se incorporan mallas de fique a un recubrimiento de mortero.

- La contracción por secado aumenta con la adición de fibras naturales (sisal y coco) debido a su elevada absorción de agua, superficie rugosa y mayor porosidad en la matriz cementicia.
- Las fibras naturales mejoran la tenacidad, la ductilidad y la resistencia al impacto del material compuesto. Se observó que las losas reforzadas con fibra de coco presentaban una mayor resistencia al impacto debido a su elevada ductilidad, que permite reducir la fragilidad de los compuestos cementicios. Por otro lado, la incorporación de fibras (yute, coco, algas marinas) incrementa la resistencia a la flexión y aumenta la energía de fractura del material compuesto; sin embargo, reduce la resistencia a la compresión (Kesikidou & Stefanidou, 2019).

El contenido de humedad afecta la resistencia mecánica de los compuestos reforzados, debido a que la saturación de agua disminuye la resistencia a la flexión y aumenta la tenacidad. Esta respuesta del material compuesto se genera debido a que la absorción de agua destruye los enlaces de hidrogeno entre las fibras y entre las fibras y la matriz, lo que induce una baja adherencia entre la fibra y la matriz, por lo que el modo de falla es por extracción (Onuaguluchi & Banthia, 2016).

### 2.2.1 Fibras de fique

El fique es una planta nativa de la América tropical, particularmente de Colombia y Venezuela, conocida científicamente con el nombre de *Furcraea sp.* Su género es *Furcraea* y pertenece a la familia de las *Agavaceae* (Echeverri E et al., 2015; Pinzón Galvis, 2013). En Colombia, los principales departamentos productores son Cauca, Nariño, Antioquia, Santander y Boyacá, con un área estimada de producción de 23.000 hectáreas (Duque, 2011).

El fique es una planta grande de tallo erguido, de entre 2 y 7m de altura, con hojas carnosas, puntiagudas, acanaladas, largas (1-3m) y angostas (10-20cm) que crecen directamente del tallo y que se distribuyen de manera radial (Pinzón Galvis, 2013). Las plantas jóvenes constan de un rosetón de hojas gruesas, carnosas, de color verde azulado (Pinzón Galvis, 2013), mientras que las plantas adultas cuentan en la base con un tronco corto (Max. 30cm); con hojas lisas de color verde en el haz y ásperas en el envés, los márgenes tienen aguijones (dentado espinoso) de color castaño o moreno-rojizo que se curvan hacia la parte distal de la hoja y están separados por trechos inermes de 4-8cm (Artesanías de Colombia & Fundación

para la orientación familiar, 2014); y su flor es de color blanco verdoso y florece una sola vez en su ciclo de vida (Pinzón Galvis, 2013). Estas plantas tienen una vida promedio entre 14 y 20 años, el desarrollo de la plantación es de 36 meses, momento en el cual empieza la cosecha y su rendimiento varía durante los tres primeros años (4T/ha el primer año, 6 T/ha en el segundo año y 8T/ha al tercer año) (Artesanías de Colombia & Fundación para la orientación familiar, 2014).

Las hojas de fique están compuestas por: 5% de fibra, 70% de jugo, 8% de fibra corta o estopa y 17% de bagazo (Duque, 2011). La fibra larga se utiliza en la industria textil y para la fabricación de empaques, el jugo para la extracción de esteroides, la estopa para pulpa de papel, y el bagazo para materiales de construcción y fertilizantes (Duque, 2011). Este trabajo está enfocado en el uso de la fibra larga que ha sido empleada para la conformación de mallas de fique, la cual es comúnmente utilizada para la fabricación de costales.

La producción de fibras largas de fique se realiza mediante el siguiente procedimiento (Duque, 2011):

1. En primer lugar, se cosechan las hojas maduras y se clasifican según su longitud, sanidad y color. Las hojas maduras se identifican porque están a unos 45° del tallo (separadas 2 cm). Posteriormente, se retiran las espinas para facilitar el transporte al sitio de desfibrado, como se muestra en la Figura 2-11-A.
2. Se realiza un corte de 10 a 15 cm en el extremo interior de la hoja, este proceso se conoce como despalmado. Este proceso se realiza para reducir motas y enredos en las fibras durante el desfibrado.
3. Se realiza el desfibrado, un proceso que separa las fibras largas de los demás componentes de la hoja. La calidad de la fibra se ve comprometida si el proceso de desfibrado se realiza después de 12 a 15 horas posterior al corte. Este proceso puede realizarse manual o mecánicamente (Figura 2-11-B).
4. La fibra se somete a un proceso de fermentación para mejorar su calidad, que consiste en extender la fibra en un tanque de almacenamiento y llenarlo hasta que el agua cubra la superficie de la fibra. A continuación, la fibra se pisa o macera y se deja hasta el día siguiente. Tras este periodo de tiempo, la fibra se lava una vez más y se sacude.
5. Las fibras se secan hasta alcanzar un contenido de humedad del 12% colocándolas sobre líneas de alambre como se muestra en la Figura 2-11-C.



6. Por último, se empacan en fajos de 1 kilo y bultos de 40 a 50 fajos.

Figura 2-11. Registro fotográfico proceso de fabricación fibras largas Fique. A). Retiro de espinas. B). Desfibrado. C). Secado D). Empaque. Fuente: (Duque, 2011)



Como se mencionó anteriormente, el fique se clasifica como una fibra vegetal de hoja proveniente de los haces vasculares (Pérez Mejía, 1974), en los que las fibras tienen una textura gruesa, áspera, dura y rígida. Las fibras de fique son llamadas fibras estructurales debido a que su función principal en la planta es sostener y dar rigidez a las hojas (Pérez Mejía, 1974).

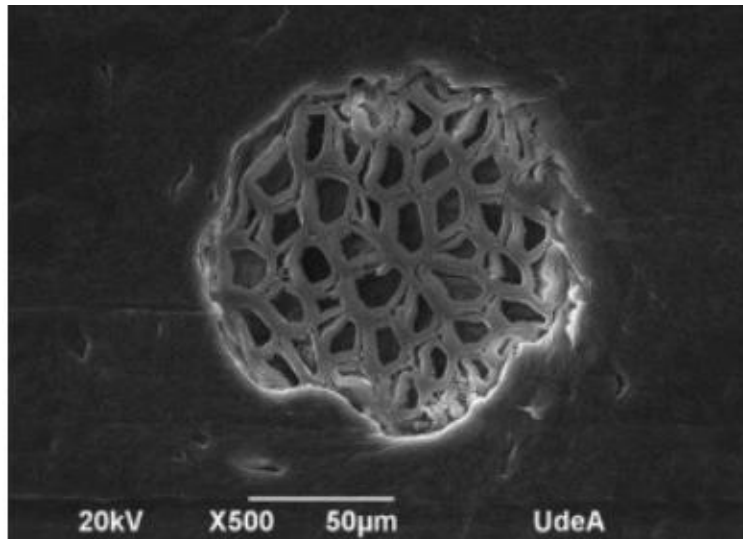
La Tabla 2-8 muestra las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de fique. Cabe señalar que las grandes variaciones de diámetro y propiedades mecánicas se deben a que la respuesta física de la fibra varía a lo largo de la longitud de la hoja para soportar su propio peso (Delvasto et al., 2010).

Tabla 2-8. Características físicas y mecánicas de las fibras de fique. Fuente (Delvasto et al., 2010)

Diámetro Equivalente	0,16-0,42mm
Densidad aparente	0,723 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica	1,47 g/cm <sup>3</sup>
% de absorción de agua	60%
Humedad relativa de equilibrio	8,12%
Resistencia a la tracción	43-571MPa
Elongación máxima	9,8%
Módulo de elasticidad	8,2-9,1GPa

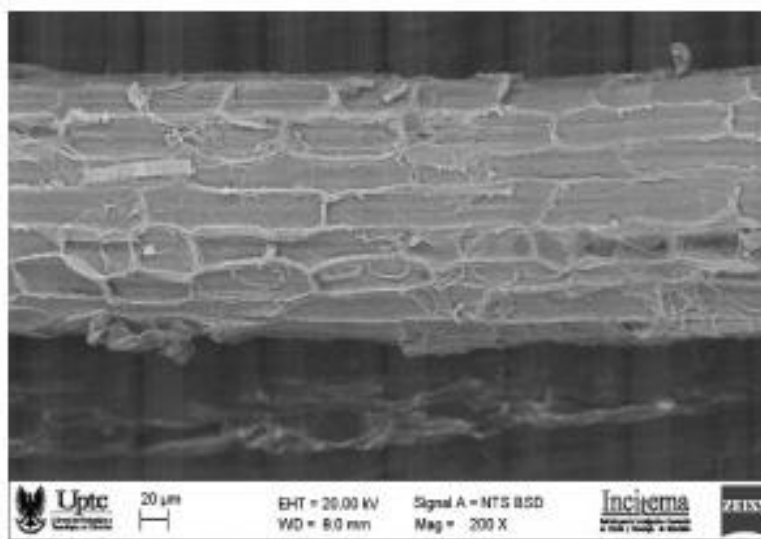
La sección transversal de la fibra de fique tiene una forma elíptica como se ve en la Figura 2-12. El diámetro del lumen es  $17,6 \pm 4,1\mu\text{m}$ , mientras que las paredes celulares tienen un espesor de  $2,9 \pm 2,9\mu\text{m}$  y se cuenta un promedio de 55 células (fibras elementales) en la sección transversal (Gomez et al., 2020).

Figura 2-12. Micrografía SEM de la sección transversal de la fibra de fique. Fuente: (Gomez et al., 2020)



Como puede observarse, la estructura de las fibras de fique sigue la estructura común de pared celular que se encuentra en las fibras vegetales y está compuesta por fibras elementales, como se explica en la sección 2.2 Fibras Naturales. Como se ve en la Figura 2-13, varias fibras elementales se unen longitudinalmente para formar filamentos multicelulares.

Figura 2-13. Corte longitudinal fibras de fique. (Camargo López, 2022)



La Tabla 2-9 muestra la composición química de las fibras de fique reportada por diferentes autores. Las fibras de fique están compuestas principalmente de celulosa que, combinada con lignina para formar un compuesto denominado lignocelulosa, pero también están compuestas de hemicelulosa. Las fibras duras como el fique tienen un alto contenido de lignina en sus paredes (Rodríguez Almaraya & Pérez García, 2000).

*Tabla 2-9. Composición química de las fibras de fique. Fuente: Propia.*

Celulosa	62,7% 70%	(Pérez Mejía, 1974) (Delvasto et al., 2010)
Hemicelulosa	22,1-27,1%	(Castro Molano et al., 2012)
Agua	12%	(Delvasto et al., 2010)
Lignina	10,1% 12%	(Delvasto et al., 2010) (Pérez Mejía, 1974)
Cenizas	2,6%	(Pérez Mejía, 1974)

## 2.2.2 Tratamiento fibras de fique

Como se ha mencionado previamente, algunas de las propiedades en estado fresco o endurecido del material compuesto (Matriz cementicia + fibras naturales) pueden verse afectadas debido al uso de fibras naturales sin ningún tipo de tratamiento que permitan mitigar los efectos adversos debido principalmente a su alta absorción de agua (por su naturaleza hidrofílica) que genera una mala interfaz entre la matriz y el refuerzo y su baja resistencia a los álcalis dado que se produce una hidrólisis alcalina parcial de la celulosa, lo que reduce el grado de polimerización de las cadenas macromoleculares, llevando a que el material compuesto tienda a fragilizarse en el tiempo (Laverde et al., 2022).

Laverde et al. (2022) indica que existen dos tipos de tratamientos para mejorar la durabilidad de los compuestos reforzados con fibras vegetales: los tratamientos que se aplican a las fibras y los que modifican directamente la matriz. Los tratamientos aplicados a las fibras buscan modificarlas químicamente para minimizar su susceptibilidad a la alta alcalinidad de la matriz, reducir su naturaleza hidrófila y mejorar la trasmisión de esfuerzos al maximizar la resistencia interfacial entre la fibra y la matriz (Karthi et al., 2019). Los tratamientos que modifican la matriz cementicia tienen como objetivo reducir su alcalinidad causada por el alto contenido de hidróxido de calcio (Laverde et al., 2022). Entre los tratamientos aplicados a las fibras se encuentran silanización, hornificación y alcalinización y entre los tratamientos aplicados a la

matriz se encuentran carbonatación acelerada y adición de compuestos puzolánicos como humo de sílice.

En particular, la alcalinización es una alternativa sencilla y de bajo costo (Laverde et al., 2022), por esto fue la alternativa seleccionada para el tratamiento de las mallas de fique que serían empleadas en el reforzamiento de los muros de mampostería objeto de este trabajo.

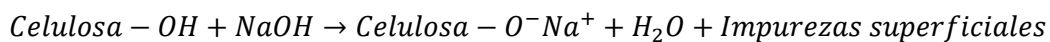
El tratamiento alcalino es un tratamiento químico, el cual consiste en lavar las fibras naturales (Celulósicas) en una solución acuosa de una base fuerte, produciendo un cambio en su estructura, dimensiones, morfología y propiedades mecánicas (Acevedo de la Espriella et al., 2021; Acuña Mejía, 2007). A nivel físico, el tratamiento alcalino elimina la lignina, hemicelulosa, ceras y aceites de la lámina media (Capa externa) de la pared celular y causa fibrilación, lo que incrementa el área superficial en contacto con la matriz (Moreno Jaraba, 2012) e incrementa la rugosidad de la superficie de la fibra, lo que mejora su adherencia mecánica (Gomes et al., 2007).

La disminución en la concentración de la hemicelulosa produce una reducción en la rigidez y la densidad de la región interfibrilar, por lo que las fibrillas se reacomodan en la dirección de los esfuerzos de tensión, generando una mejor distribución de las cargas y por ende un mejor desempeño a la tensión (Acuña Mejía, 2007). Por otro lado, la disminución en la concentración de lignina genera que la sección central que une las células sea más plástica y homogénea por la eliminación de micro vacíos, esto conlleva a una mejor unión química y mecánica de las fibras con la matriz cementicia (Acuña Mejía, 2007; Acevedo de la Espriella et al., 2021).

A nivel químico, se produce la modificación más importante del tratamiento que consiste en la ruptura de los enlaces de hidrogeno de la red, por lo que los grupos hidroxilos de la celulosa en los alcóxidos serán más activos, dado que sufren una ionización lo que facilita la exposición de los grupos OH-reactivos en la superficie de la fibra, esto reduce su naturaleza hidrofílica (Laverde et al., 2022).

El tratamiento alcalino más empleado en las fibras naturales es la aplicación de una solución con hidróxido de sodio (NaOH) entre el 2 y 5% w/w (Laverde et al., 2022), en el cual se produce una hidrólisis básica a la lignina, lo que aumenta significativamente la rugosidad de la fibra y por lo cual se mejora la adherencia mecánica con la matriz de cemento (Velásquez Restrepo

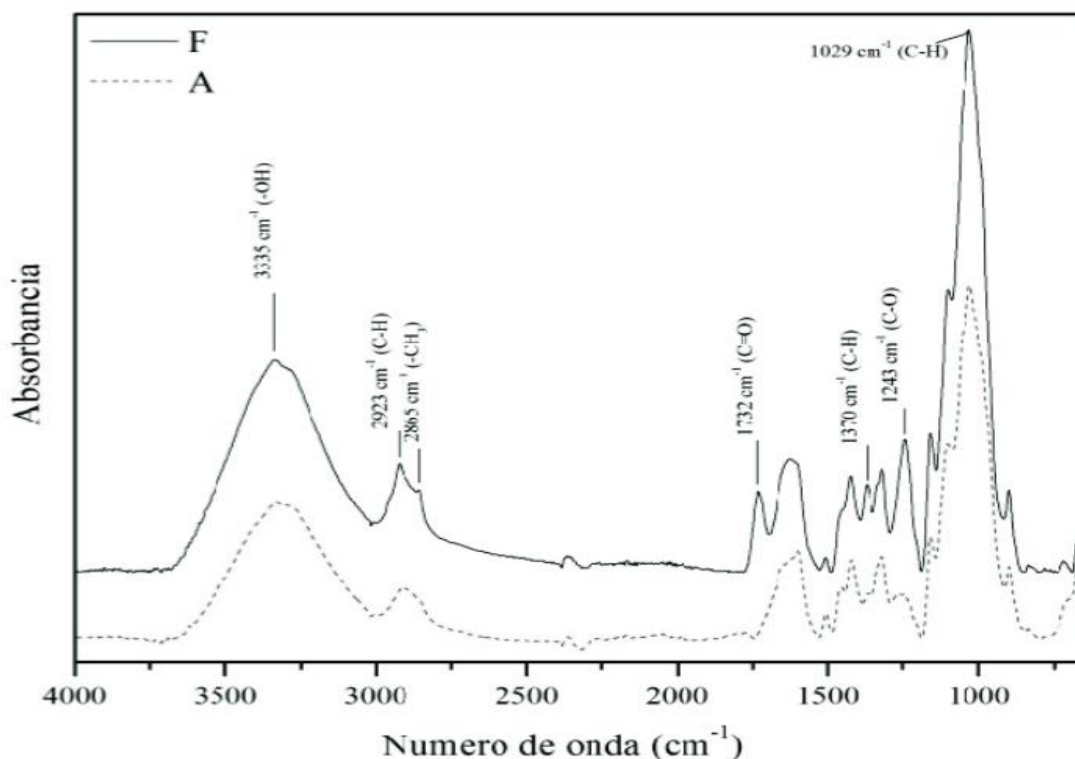
et al., 2016). La reacción que se genera entre la celulosa y el NaOH se muestra a continuación (Mwaikambo & Ansell, 2002):



Al momento de considerar realizar un tratamiento alcalino se deben establecer tres parámetros fundamentales que son la concentración del hidróxido de sodio, el tiempo del tratamiento y la temperatura, dado que una alta concentración puede despolimerizar la celulosa y designizar la fibra de manera excesiva lo que va a producir efectos adversos en la resistencia de la fibra (Sullcahuamán et al., 2007).

Respecto al efecto que tiene el tratamiento alcalino (con Hidróxido de Sodio) en las fibras de fique, en los análisis realizados mediante espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), los cuales se pueden apreciar en la Figura 2-14, se evidencia que desaparecen las bandas 2865, 1370 y 1243 $\text{cm}^{-1}$  atribuidas a los enlaces -CH<sub>3</sub>, C-H y C-O presentes en la lignina, lo mismo sucede con la banda 1732 $\text{cm}^{-1}$  relacionada a la presencia de grupos carbonilo provenientes de la hemicelulosa y las pectinas (Muñoz Vélez et al., 2014).

Figura 2-14. Espectro FTIR de fibras de fique sin tratar (F) y tratadas (A) Fuente: (Muñoz Vélez et al., 2014)



En la investigación realizada por Castro et al (2017) fueron tratadas fibras de fique a diferentes concentraciones de NaOH (2.5, 3.7% y 5%) y diferentes tiempos de exposición (10, 30, 60, 90, 120, 300min), en donde se pudo apreciar que el comportamiento a tracción en el material compuesto se incrementó a partir del tratamiento y que los mejores desempeños se presentan en un tiempo de exposición de 30min y una concentración del 5%.

El comportamiento presentado en estas fibras se debe a la reducción de impurezas y componentes no celulósicos de las paredes vegetales, así como a variaciones en la morfología de la sección transversal de la fibra e incluso la orientación molecular y la cristalinidad. A partir del análisis realizado por Castro et al (2017), mediante microscopía óptica se pudo observar que las fibras tratadas se reducen el tamaño de los lúmenes de las fibras elementales y se genera una mayor homogeneidad de la sección transversal al igual que una mayor regularidad en la forma de los lúmenes. Estos cambios morfológicos están relacionados con la reorganización de las cadenas de celulosa al interior de la pared celular.

# 3. METODOLOGÍA

## 3.1 Caracterización de materiales

### 3.1.1 Cemento

El cemento utilizado para el desarrollo de esta investigación corresponde a un cemento UG de uso general, el cual, de acuerdo con su ficha técnica, cumple con las especificaciones establecidas por la **NTC 121 de 2014** “Especificación de desempeño para cemento hidráulico”. Con el fin de garantizar unas características similares en el material empleado, se utilizó el mismo tipo de cemento durante todo el desarrollo del proyecto. El cemento utilizado durante el desarrollo de este trabajo fue un cemento de uso general (UG) de la empresa Cemex, el cual es empleado para la fabricación de mortero de pega y mortero de recubrimiento (pañete).

Se llevó a cabo una caracterización del cemento mediante la determinación de su densidad y finura. Para determinar estas propiedades, se seleccionó al azar una muestra de cemento de uno de los bultos adquiridos para la construcción de los muros de mampostería.

#### 3.1.1.1 Densidad del cemento

Para determinar la densidad de la muestra de cemento se utilizó el procedimiento estipulado en la norma **NTC 221** “Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico”. La densidad se determinó utilizando kerosene libre de agua y un frasco de Le Chatelier, durante el ensayo se registraron los siguientes datos:

- $V_{i-dc}$  = Lectura inicial del kerosene, registrada después de introducirlo en el frasco de Le Chatelier sumergido en el baño de agua.
- $M_{acem}$  = Peso de la muestra de cemento

- $V_{f-dc}$  = Lectura final del kerosene, registrada después de extraer el aire acumulado en la muestra.

El registro fotográfico del procedimiento desarrollado se puede observar en la Figura 3-1.

*Figura 3-1. Registro fotográfico del procedimiento para determinación de densidad en cemento*



### 3.1.1.2 Finura o superficie específica

La determinación de la finura o superficie específica se realizó de acuerdo con la norma **NTC 33** “Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire”. El aparato de permeabilidad al aire de Blaine se puede observar en la Figura 3-2.

*Figura 3-2. Aparato de Blaine para determinación de módulo de finura*





La determinación del volumen aparente de la capa compactada  $V_{r-f}$  no se realizó durante el ensayo, ya que corresponde a un volumen previamente establecido para la cámara de permeabilidad empleada por el personal técnico del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia. A partir del volumen aparente  $V_{r-f}$ , suministrado, fue posible calcular la masa de cemento requerida para realizar el ensayo, utilizando Ecuación 3-1.

Ecuación 3-1. 
$$M_{f_{cem}} = \rho_c * V_{r-f} * (1 - \varepsilon)$$

Donde  $\rho_c$  es la densidad del cemento y  $\varepsilon$  es la porosidad deseada de la muestra dentro de la cámara de permeabilidad, que equivale a 0,5.

Durante el ensayo se registraron los siguientes datos:

- $t_{f-e}$ : Tiempo de flujo (tiempo registrado desde que el menisco pasa la marca No. 2 hasta que desciende hasta la marca No. 3)
- $T_{f-e}$ : Temperatura a la que se ha realizado el ensayo

### 3.1.2 Agregado fino – Arena de Peña

Para la construcción de los muros y su recubrimiento se empleó arena de peña. Para su caracterización se determinó el contenido de humedad total evaporable de la arena según la norma **NTC 1776** “Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de Humedad de los Agregados”; la densidad relativa en estado saturado y superficialmente seco-SSS y el porcentaje de absorción según la norma **NTC 237** “Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino”; su granulometría y módulo de finura según las normas **NTC 78** “Método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75  $\mu\text{m}$  (no. 200) en agregados minerales” y **NTC 77** “Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos”, y la masa unitaria suelta y compacta según la norma **NTC 92** “Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (Masas Unitaria) y vacíos en agregados”.

### 3.1.2.1 Contenido de humedad total evaporable

Para determinar el contenido de humedad total evaporable del agregado fino (arena de peña) primero se seleccionaron las muestras. Esta selección se hizo de acuerdo con la norma **NTC 129** "*Práctica para la toma de muestras de agregados*". Para la construcción de los muros de mampostería, se adquirieron 24 bultos de arena, los cuales se almacenaron en un mismo punto de acopio en el patio interno del edificio 406, Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, en condiciones similares; sin embargo, la selección del material se hace con el fin de obtener muestras que sean representativas de la totalidad del agregado, para poder ensayar y determinar el valor de la propiedad.

Antes de tomar las muestras, se realizó una inspección visual, como sugiere la norma, durante la cual se observó que el material contenido en los todos los bultos de arena fuera similar, con una coloración que indicaba que tenían valores de humedad cercanos o iguales entre sí. Se pudo observar que el material tiene un menor grado de humedad en la superficie, ya que el color de la arena suele ser más claro; en contraste, cuando se retira el material de la superficie, el color más oscuro permite constatar que la arena es más húmeda.

Dado que el material está apilado en bultos, el plan de muestreo consistió en tomar muestras aleatorias de los diferentes bultos. Las submuestras se mezclaron para garantizar la homogeneidad de las muestras. Para evitar la segregación del material, se retiró la capa superficial de cada uno de los bultos y se tomó una muestra del centro del empaque con una pequeña pala metálica de uso manual. Se consideró que este plan de muestreo era el adecuado para representar el lote de material adquirido para la construcción de los muros.

Según la norma **NTC 1776**, la masa mínima de la muestra se elige en función del tamaño máximo nominal del agregado; en este caso, la masa requerida para la determinación de la humedad es de 0,5 kg. La muestra seleccionada de acuerdo con el plan de muestreo se puede observar en la Figura 3-3.

Figura 3-3. Muestra seleccionada para determinación de humedad.



La totalidad el material seccionado se fraccionó en tres muestras diferentes para determinar humedad, esto con el fin de poder obtener un promedio de los valores obtenidos. Cada una de las muestras contó con un peso de 1200g que corresponde a un valor mayor a la masa mínima solicitada en la norma.

Durante el ensayo se registraron los siguientes datos:

- $W_{ah}$  = Peso de la muestra en estado húmedo
- $W_{as+r}$  = Peso del material en estado seco y el peso del recipiente
- $W_r$  = Peso del recipiente

Se verificó que las muestras estuvieran completamente secas, para esto, se pesaron las muestras con una separación de tiempo de más de una hora, verificando que la variación del peso fuera menor al 0,1%.

### 3.1.2.2 Densidad relativa SSS y porcentaje de absorción

Para la determinación de la densidad relativa en estado Saturado y Superficialmente Seco-SSS y el porcentaje de absorción se seleccionaron tres muestras de manera aleatoria cada una con un peso de 1500g. Las muestras se sumergieron totalmente en agua durante 24 horas y después de este tiempo se retiró el agua que cubría la muestra.

Para llevar la muestra a una condición SSS, se retiró el exceso de agua aplicando calor mediante una estufa. Una vez se observó que el exceso de agua se había evaporado, se retiró

el platón de la estufa para evitar que la arena se seque de manera excesiva. Por la tonalidad oscura de la muestra se pudo establecer que la humedad era mayor a la requerida para estar en condición SSS, sin embargo, se decidió realizar el primer ensayo de humedad superficial bajo esta condición para verificar que la muestra no se hubiera secado en exceso.

El ensayo de humedad superficial se realizó mediante el ensayo de cono normalizado, para esto, el cono se colocó sobre una bandeja metálica lisa, por lo tanto, no absorbente, con el diámetro mayor hacia abajo. Dentro del cono se colocó la arena de peña en tres capas compactadas hasta llenar totalmente. A la primera porción de material adicionado se le proporcionaron 10 golpes leves con el pistón, a la segunda porción de material adicionado se le proporcionaron 10 golpes adicionales y la última porción de material adicionado se le proporcionaron 5 golpes, con el fin de completar los 25 golpes sugeridos por la norma. En la Figura 3-4 se puede observar el montaje del cono con el material enrasado en su superficie, previo a la realización del ensayo.

*Figura 3-4. Montaje de ensayo de Humedad Superficial*



Por último, se removió el material que se encontraba en la base y se levantó el cono de manera vertical. En el primer ensayo realizado a cada una de las muestras se encontró que el material se encontraba húmedo dado que la arena conservaba su forma cónica. Teniendo en cuenta que la arena no se encontraba en una condición SSS, se extendió sobre una superficie plástica, ubicada en una zona del laboratorio que permitiera la aireación y secado del material. El material extendido se agitaba para asegurar un secado homogéneo y era ensayado nuevamente a intervalos constantes hasta alcanzar la condición requerida. El material se encuentra en una condición SSS, cuando al retirar el molde se asienta levemente el agregado fino, tal como se puede apreciar en la Figura 3-5.

Figura 3-5. Muestra en condición Saturada y Superficialmente Seca



Con la muestra en condición SSS se procede a determinar la densidad relativa y porcentaje de absorción. En la probeta graduada se colocó un volumen de agua equivalente a 110ml, que corresponde al volumen inicial ( $L_i$ ). De la muestra en condición SSS se seleccionan 300g para determinar el volumen ocupado, el cual corresponde al peso de arena en condición SSS ( $W_{a-sss}$ ). Este material fue depositado dentro de la probeta graduada donde el nuevo nivel del agua en la probeta representa el volumen final ( $L_f$ ).

El material y el agua que se encontraban dentro de la probeta fueron colocados en un recipiente metálico, el cual se mantuvo en un horno a temperatura controlada de 110°C durante 24 horas. Después de las 24 horas se registró el peso del recipiente con el material fino en condición seca ( $W_{a_{s_{dr+r}}}$ ), y el peso del recipiente ( $W_r$ ).

### 3.1.2.3 Granulometría de agregado fino

Para la determinación de la granulometría de la arena de peña, se seleccionó la muestra siguiendo la norma **NTC 129**, obteniendo material de las diferentes lonas de la arena adquirida para la construcción de los muros y su recubrimiento. La muestra seleccionada se secó en el horno a condiciones de temperatura controlada de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas, el secado de la muestra se realizó previo a su reducción, teniendo en cuenta que la muestra inicial se iba a fraccionar en tres submuestras, donde cada una iba a ser empleada para determinar la granulometría del material.

La cantidad mínima de material para ensayo fue establecida siguiendo las indicaciones de las normas **NTC 78** y **NTC 77**. La norma **NTC 78** establece que, si la misma muestra de agregado fino va a ensayarse mediante la norma **NTC 77**, la cantidad mínima de material seleccionado

debe ser acorde a la establecida en dicha norma, así la cantidad mínima de material seco debía ser de 300g. El fraccionamiento y reducción de las submuestras se realizó siguiendo la norma **NTC 3647** “Ingeniería civil y arquitectura. Práctica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para la realización de ensayos” por el método de cuarteo. En este caso, se seleccionaron tres submuestras cada una con un peso seco inicial ( $W_{ia}$ ) de 1000g.

Para la determinación del porcentaje de material que pasaba el tamiz de  $75\mu\text{m}$  (**No. 200**) se siguió el procedimiento de lavado con agua potable. Inicialmente, el material seco se colocó en un recipiente plástico (balde) cubriéndolo con abundante agua y de manera manual se agitó con fuerza para garantizar la separación y suspensión de todas las partículas finas. El agua con las partículas finas suspendidas se vertió sobre una pila de tamices conformada por el tamiz No. 30 y el tamiz No. 200, se empleó el tamiz No. 30 para evitar que las partículas gruesas colmataran el tamiz No. 200. Este proceso se realizó vertiendo el agua de manera controlada, para evitar que el tamiz No. 200 se colmatará, al momento que se observaba que el tamiz No. 200 empezaba a acumularse material (Figura 3-6), éste se lavaba con abundante agua hasta que el agua de lavado pasará transparente y el material retenido fue depositado en un platón metálico.

Figura 3-6. Proceso de lavado de material sobre el tamiz de  $75\mu\text{m}$  (No. 200)



En esta primera etapa, se filtra el agua con las partículas suspendidas; sin embargo, conforme se va retirando estas partículas empieza a depositarse el material con las partículas más

gruesas. Durante el proceso de lavado se va incorporando agua en balde, se repite el proceso de agitar el material y filtrar con los tamices antes mencionados. Cuando se finalizó el proceso de lavado de la totalidad de la muestra, el material retenido que se había acumulado en el recipiente metálico fue secado durante 24h en el horno con una temperatura controlada de  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Posterior al secado, se determinó el peso del recipiente con el material retenido ( $W_{asg+r}$ ), y el peso del recipiente ( $W_r$ ).

Este material fue clasificado mediante una tamizadora mecánica durante 3 minutos, empleando los tamices No. 4 (4,75mm), No. 8 (2,36mm), No. 16 (1,18mm), No. 30 (600 $\mu\text{m}$ ), No. 50 (300 $\mu\text{m}$ ), No. 100 (150 $\mu\text{m}$ ), No. 200 (75 $\mu\text{m}$ ) y un fondo. Después de este periodo de tiempo, se determinó el peso del material retenido en cada uno de los tamices con una balanza de precisión y por medio de un cepillo se retiró el material que se encontraba acumulado en los tamices buscando evitar la pérdida de material. El peso del material que se perdió durante el lavado siguiendo la norma **NTC 78** se adicióno al peso de la muestra de material que se encontraba en el fondo del recipiente y que por ende pasa el tamiz de 75 $\mu\text{m}$  (No. 200).

#### 3.1.2.4 Masa Unitaria Suelta y Compacta

Inicialmente se seleccionó de manera aleatoria del material total adquirido dos muestras de arena de peña, cada muestra estaba conformada por 12kg que pudieran garantizar el llenado del molde al momento de ser compactadas. El material seleccionado se secó en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que alcanzara una masa constante. El volumen del molde ( $V_m$ ) corresponde a 1/10 pies cúbicos el cual corresponde a 0.0283m<sup>3</sup>.

Para determinar la densidad volumétrica (Masa unitaria) suelta se empleó el método C "Paleo". Durante el ensayo se registraron los siguientes datos:

- $G_s$  = Peso del molde y peso de la arena de peña suelta
- $T$  = Peso del molde vacío

El registro fotográfico del procedimiento se puede observar en la Figura 3-7.

Figura 3-7. Registro fotográfico determinación masa unitaria suelta.



Para determinar la densidad volumétrica (Masa unitaria) compactada se emplea el método A “Apisonamiento”, esto teniendo en cuenta que el material corresponde a arena de peña cuyo tamaño máximo nominal corresponde a 1.18mm. Durante el ensayo se registró el peso del molde y el peso de la arena de peña compacta ( $G_c$ ). El registro fotográfico del procedimiento se puede observar en la Figura 3-8.

Figura 3-8. Registro fotográfico determinación masa unitaria compactada



### 3.1.3 Unidades de mampostería

El desarrollo experimental de este componente de la investigación se realizó empleando unidades de mampostería de arcilla cocida, específicamente bloques No. 5 estándar con perforaciones horizontales (PH), los cuales se pueden observar en la Figura 3-9. El lote completo de unidades de mampostería empleado para la construcción de los muros fue



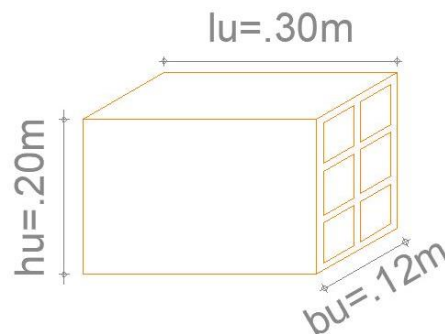
adquirido en un depósito de materiales ubicado en la ciudad de Bogotá (Deposito Bella Vista); sin embargo, acorde a la demarcación del bloque, pertenece a la ladrillera Los Cristales.

Figura 3-9. Unidades de mampostería – Bloque No. 5 estándar



En la Figura 3-10, se observan las medidas nominales indicadas por los fabricantes para el bloque No. 5 estándar; donde  $h_u$  representa la altura del bloque,  $b_u$  representa el ancho del bloque y  $l_u$  representa la longitud del bloque.

Figura 3-10. Vista Isométrica del Bloque No. 5 estándar (Dimensiones nominales Fabricante)



Para la caracterización de las unidades de mampostería se determinó su tolerancia dimensional, revisión de las dimensiones de paredes y tabiques, porcentaje de absorción por inmersión durante 24 horas y resistencia mecánica a la compresión siguiendo la norma **NTC 4017** "Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla". En la Tabla 3-1 se relaciona el plan de muestreo establecido para la caracterización de estas unidades de mampostería; la cantidad de especímenes seleccionados para el

desarrollo de los ensayos fue determinado acorde a la norma **NTC 4017**. Las normas de referencia empleada para evaluar las propiedades del material corresponden a la **NTC 4205-1** “Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 1: mampostería estructural” y **NTC 4205-2** “Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: mampostería no estructural”.

Tabla 3-1. Plan de muestreo para unidades de mampostería

<b>Ensayos</b>	<b>No. de especímenes</b>	<b>Norma de referencia</b>
Tolerancia Dimensional	12	NTC 4205-1 NTC 4205-2
Dimensión de paredes y tabiques	10	
Absorción de agua	5	
Resistencia a la compresión	7	

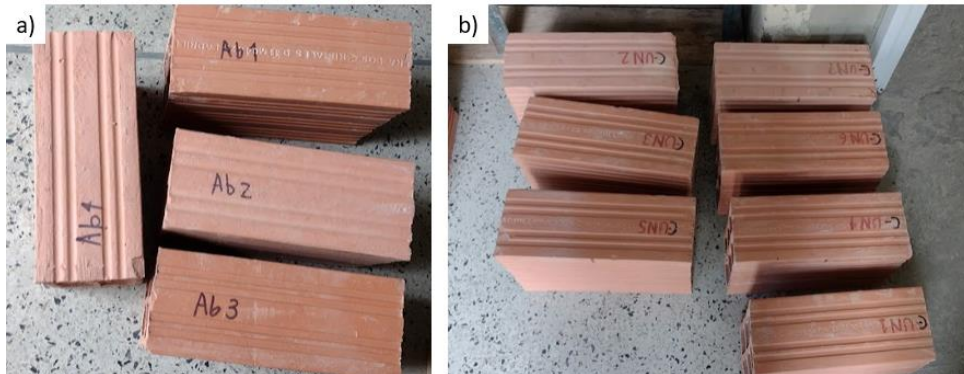
Se seleccionaron 7 unidades para compresión teniendo en cuenta que se pueden presentar valores atípicos.

### 3.1.3.1 Selección de las muestras y preparación previa

La selección de las muestras para los ensayos de caracterización se realizó de manera aleatoria del lote de unidades de mampostería. Teniendo en cuenta las recomendaciones establecidas por Molano Camargo y Torres Castellanos (2017) y a la norma **NTC 4017**, se seleccionaron unidades que no presentaran fisuras o irregularidades en los bordes. Los especímenes fueron limpiados con una escoba de cerdas suaves y una toalla para retirar cualquier resto de suciedad y polvo que se encontraba adherido a las paredes exteriores o al interior de sus cavidades.

Las unidades de mampostería fueron marcadas para identificar el ensayo para el cual serían empleadas, una vez se tomarán sus dimensiones. Las unidades de mampostería que fueron empleadas para absorción de agua por inmersión 24 horas fueron marcadas como **Ab#** y las unidades de mampostería que fueron empleadas para resistencia mecánica a la compresión fueron marcadas como **C-UN#**. En ambos casos, el símbolo # representa el número de identificación del elemento como se observa en la Figura 3-11.

Figura 3-11. Unidades de mampostería (a. Unidades para absorción; b. Unidades para resistencia a la compresión)



### 3.1.3.2 Secado y enfriamiento de las muestras

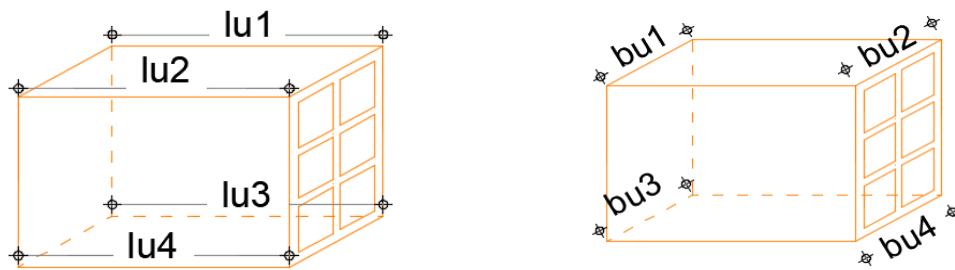
Para la medición de las dimensiones (longitud, ancho, altura, paredes y tabiques), determinación de la resistencia mecánica a la compresión y porcentaje de absorción de agua por inmersión 24 horas, las unidades de mampostería fueron secadas en el horno a una temperatura de  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Posterior al secado, los especímenes se retiraron del horno y se dejaron enfriar en un cuarto a temperatura ambiente por un periodo de 4 horas. Estos fueron ubicados separados entre sí para garantizar el paso de aire entre ellos, de manera que, al momento de proceder a realizar los ensayos, las unidades no se encuentren calientes al tacto.

### 3.1.3.3 Tolerancia dimensional (Medición de dimensiones y espesores de paredes y tabiques)

Para cada una de las dimensiones de longitud ( $l_u$ ), ancho ( $b_u$ ) y altura ( $h_u$ ) se realizaron 4 mediciones empleando un calibrador digital calibrado; el calibrador digital permite una precisión de 0,01mm, sin embargo, la norma **NTC 4017** establece que las mediciones deben realizarse con una aproximación de 1mm. Con el promedio de las 4 medidas se estableció cada una de las dimensiones del espécimen.

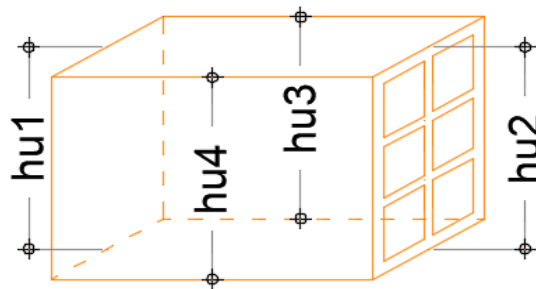
La medición de la longitud ( $l_u$ ) y ancho ( $b_u$ ) se realiza en los bordes de las caras perpendiculares a la carga a compresión (Molano Camargo & Torres Castellanos, 2017), como se puede observar en la Figura 3-12.

Figura 3-12. Ubicación toma de medidas - Longitudes y Anchos



Las mediciones de la altura ( $h_u$ ) se efectúan en el centro de cada una de las caras laterales de la unidad de mampostería (Figura 3-13).

Figura 3-13. Ubicación toma de medidas - Alturas



Para esta medición de alturas se marcaron los centros de las caras con un marcador y luego se tomó la medida con el calibrador, como se muestra en la Figura 3-14.

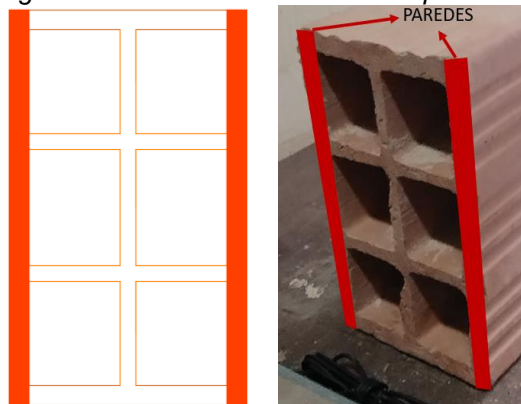
Figura 3-14. Marcación de centros y medición de altura.



Como parte de la caracterización física de las unidades de mampostería se tomaron las medidas de las paredes (P) y tabiques (tabiques exteriores (te) y tabiques interiores (ti)) de 10 unidades de mampostería, seleccionando 5 de las unidades que iban a ser sometidas a compresión y las 5 unidades a las cuales se les iba a determinar porcentaje de absorción. Las

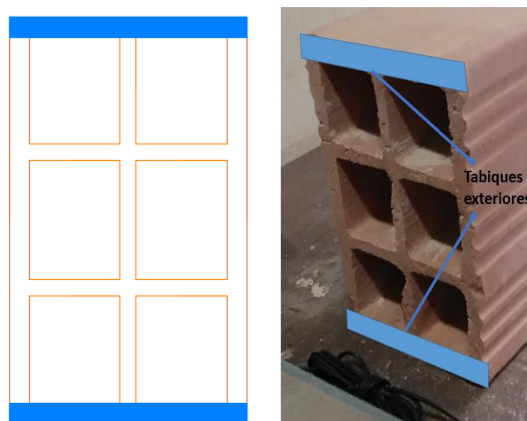
paredes exteriores corresponden a las caras externas longitudinales que constituyen los dos lados del muro (**NTC 4205-1**), las paredes de estas unidades de mampostería son macizas, estas se encuentran señaladas en las Figura 3-15.

Figura 3-15. Paredes exteriores bloque No. 5



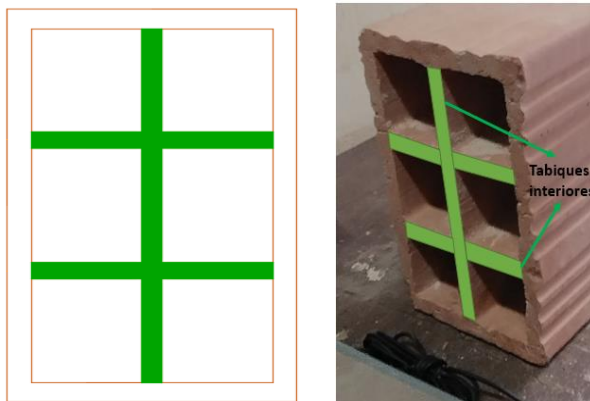
Los tabiques exteriores (te) son las caras exteriores que están en contacto con el mortero de pega de las juntas horizontales (**NTC 4205-1**). En estas unidades corresponden a las caras superior e inferior y son macizas (Figura 3-16).

Figura 3-16. Tabiques exteriores bloque No. 5



Los tabiques interiores (ti) son los elementos transversales que mantienen unidas las paredes de un lado con las opuestas o que separan celdas dentro de una pieza (**NTC 4205-1**). En la siguiente Figura 3-17 se señalan los tabiques internos del bloque No. 5 estándar.

Figura 3-17. Tabiques interiores bloque No. 5



Para la medición de espesores de paredes y tabiques se empleó un calibrador digital y teniendo en cuenta la recomendación de la norma **NTC 4205-1**, la medición de paredes y tabiques exteriores se realizó desde la cara interna hasta la superficie externa de las estrías. Se retiraron en particular rebabas que pudieran alterar la medida de las distancias acorde a lo indicado en la norma **NTC 4017**.

#### 3.1.3.4 Porcentaje de absorción de agua por inmersión 24 horas

Posterior a los procedimientos descritos en la sección 3.1.3.1 y 3.1.3.2, estas unidades fueron pesadas en una balanza (con una precisión de  $\pm 1g$ ) para obtener su peso seco antes de la inmersión ( $W_{u-s}$ ). Cabe indicar, que posterior a determinar su peso seco, se procedió a realizar el procedimiento descrito en la sección 3.1.3.3.

Una vez determinadas las dimensiones de los bloques, estos se sumergieron en agua por 24h, en las piscinas del laboratorio de estructuras. Posterior a este tiempo se extrajeron del agua y se secaron con un paño húmedo para retirar el exceso de agua que se encontraba en la superficie. Por último, se pesaron nuevamente las unidades de mampostería determinando el peso del bloque saturado superficialmente seco ( $W_{u-sss}$ ), empleando la misma balanza mencionada anteriormente. En la Figura 3-18 se presenta el registro fotográfico del procedimiento descrito.

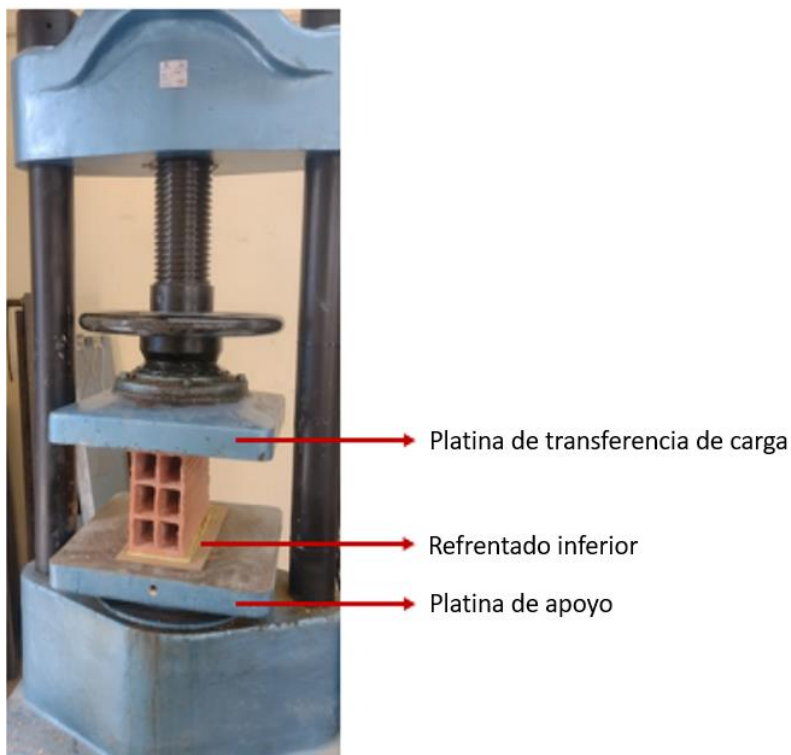
Figura 3-18. Registro fotográfico procedimiento porcentaje de absorción



### 3.1.3.5 Resistencia mecánica a la compresión

Para la determinación de la resistencia mecánica a la compresión se empleó un equipo que contaba con una capacidad de carga de 980,67kN y las dimensiones en las platinas de apoyo y transferencia de carga permiten ensayar los bloques completos, como se puede observar en la Figura 3-19.

Figura 3-19. Equipo para ensayo de resistencia a la compresión



Así, posterior a los procedimientos descritos en las secciones 3.1.3.1, 3.1.3.2 y 3.1.3.3, se continuó con el proceso para la determinación de la resistencia. De la información recopilada durante la etapa de medición (longitud ( $l_u$ ) y ancho ( $b_u$ ) promedio de cada bloque) se establece el área neta perpendicular a la carga de compresión ( $Au_n$ ).

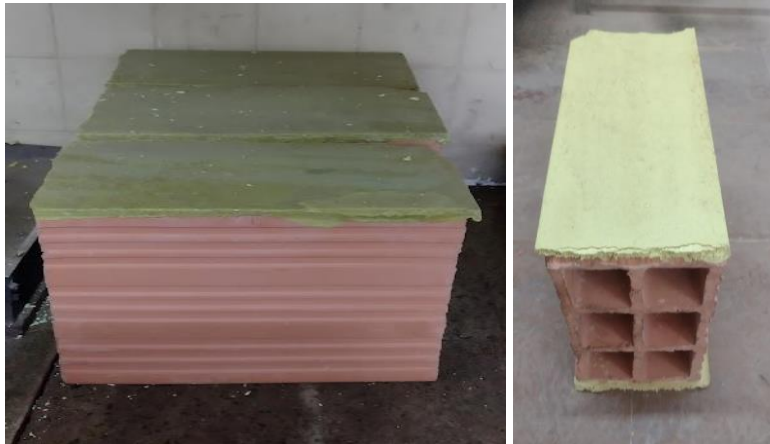
Ahora bien, dado que las caras superior e inferior de los bloques deben estar totalmente planas para garantizar la aplicación homogénea de la carga y disminuir el efecto de concentraciones de esfuerzo, fue necesario realizar un refrentado con mortero de azufre en ambas caras. Para esto, en una estufa se colocó el azufre hasta que estuviera en una condición líquida, controlando la temperatura para evitar que se sobrecalentará la mezcla y agitándola con un cucharón metálico. Antes de aplicar el azufre en el molde metálico, se extendió una capa fina de ACPM por medio de una estopa en las caras internas; el ACPM funciona como desmoldante, lo que facilita desprender el refrentado de la superficie y caras internas del molde, sin fisurarlo.

Luego, se llenó la superficie del molde con el azufre fundido, hasta tener un espesor aproximado de 6mm, dado que la actividad se realizaba de manera muy ágil (Para evitar que el azufre se solidificara), se aplicaban tres cucharadas llenas de la mezcla en el molde. Se coloca la superficie del bloque sobre el líquido y se sostiene de modo que se mantenga perpendicular a la superficie de refrentado, para esto se emplearon las guías metálicas que se encuentran en los laterales del molde.

Una vez, se visualizó el cambio en la tonalidad del azufre, se desprendió la unidad de mampostería con el refrentado. La mezcla pasa de un color amarillo oscuro a un tono amarillo claro como el que se observa en la Figura 3-20. El cambio de tonalidad del azufre evidencia que se encuentra totalmente solidificado y por ende no se va a fracturar o desprender durante el retiro del molde. Este proceso se realizó inicialmente por una cara y después se realizó el mismo procedimiento en la cara opuesta del bloque. Las unidades refrentadas se dejaron enfriar un lapso no mayor a 24h, en las cuales las capas de refrentado no presentaron ningún tipo de fisuración.



Figura 3-20. Unidades de Mampostería refrentadas.



Los especímenes se ensayan en posición horizontal, tal como van a ser instalados en los muros. Previo a realizar cada uno de los ensayos, se limpiaron los platos de la máquina, eliminando cualquier residuo de material y se alinearon los especímenes en el centro del plato de manera que se encontraran asentados uniformemente (Figura 3-21). Las unidades de mampostería se ensayaron hasta la carga máxima de ruptura ( $C_{max}$ ), la cual fue registrada mediante un indicador digital LEXUS MATRIX con el que cuenta el equipo empleado.

Figura 3-21. Montaje ensayo de resistencia a la compresión unidades de mampostería.



### 3.1.4 Malla de fique

Para el desarrollo de este trabajo final se adquirieron costales de fique en la plaza de mercados de abastos, con dos diferentes tipos de densidades de entramado. Por un lado, se compraron costales de fique fabricados con una malla que tiene una mayor separación entre hiladas al cual denominaremos ligera-**L**, dado que la malla tiene un menor peso por unidad de área (Figura 3-22).

*Figura 3-22. Costales de mallas de fique Ligera-L*



Y costales fabricados con una malla con menor separación entre hiladas al cual denominaremos Densa-**D** (Figura 3-23), la cual tiene un mayor peso por unidad de área.

*Figura 3-23. Costales de malla de fique Densa-D*



Dado que se seleccionaron dos configuraciones diferentes de entramado de la malla de fique, se realizó una caracterización física estableciendo la cantidad de hiladas por unidad de longitud (En ambos sentidos), diámetro de las hiladas (En ambos sentidos), separaciones entre hiladas (En ambos sentidos), peso por unidad de área y % vacíos.

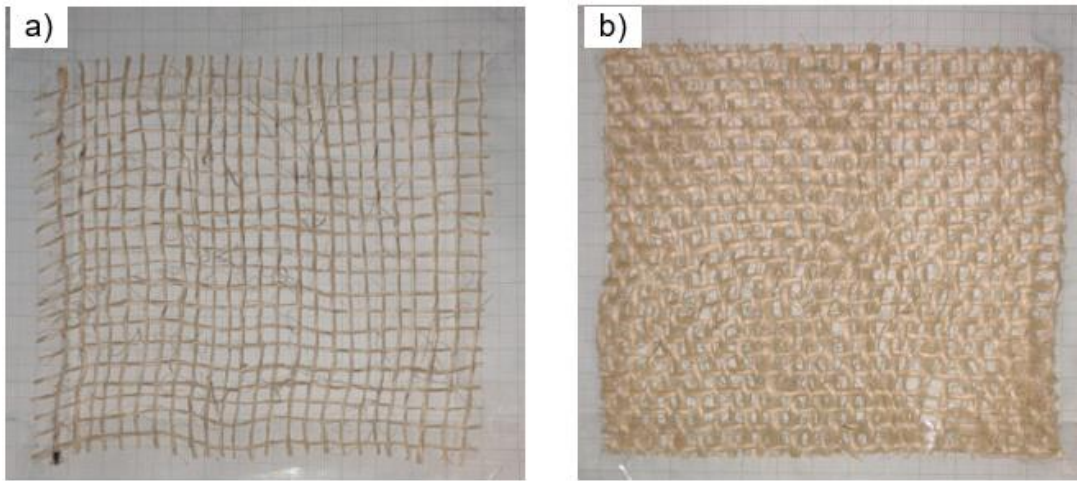
Tanto para los costales de malla densa como los costales de malla ligera, se seleccionaron muestras que fueron sometidas a un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (Pureza: > 98%) a diferentes concentraciones w/w, de 1%, 3%, 5% y 7%. Este rango de concentraciones para el tratamiento alcalino de las fibras fue seleccionado teniendo en cuenta la revisión realizada a la literatura en particular las investigaciones desarrolladas por Burbano Narváz & Núñez Núñez (2017), Coudert (2020) y Castro et al. (2007).

Con las muestras tratadas con hidróxido de sodio y una muestra sin ningún tratamiento se construyeron 15 probetas por tipo de entramado, que fueron ensayadas a tensión en una máquina universal para determinar las siguientes propiedades mecánicas: fuerza de ruptura, elongación aparente a la fuerza de ruptura, esfuerzo máximo a tracción, deformación por tracción última y su módulo de elasticidad a la tracción. La determinación de las propiedades mecánicas hace parte de la caracterización realizada a las mallas de fique.

#### **3.1.4.1 Caracterización física**

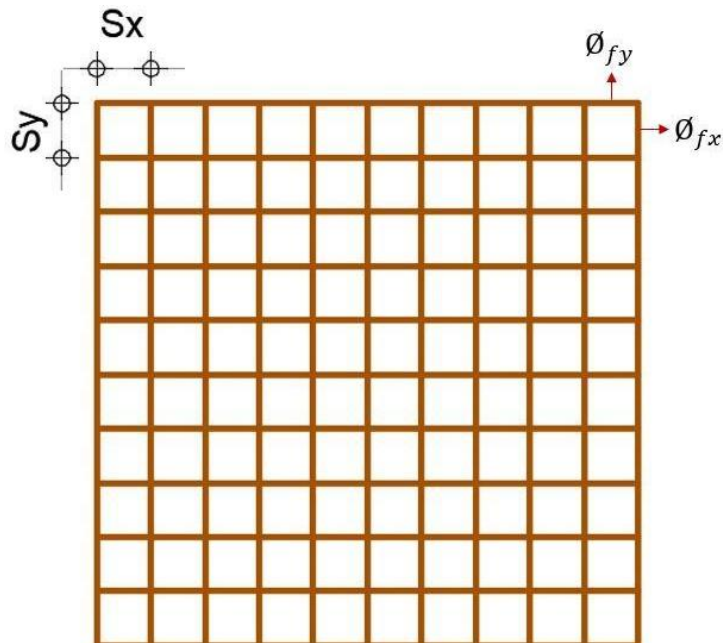
De los costales de fique se extrajeron 5 muestras por cada uno de los entramados, las cuales tenían forma cuadrada de aproximadamente 12cm x 12cm. Para identificar las muestras y los resultados obtenidos, estas fueron marcadas como **D- #** y **L- #**, donde el signo # indica la numeración de la muestra. Las muestras fueron adheridas con cinta transparente a una hoja de papel milimetrado, para garantizar que estuvieran templadas, como se observa en la Figura 3-24, donde se presenta una muestra de la malla ligera y una muestra de la malla densa.

Figura 3-24. Muestras de malla a) Ligera, b) Densa



A partir de un procesamiento digital de imágenes, empleando el programa IMAGEJ, se determinó la separación entre hiladas en el sentido X ( $S_x$ ), la separación entre hiladas en el sentido Y ( $S_y$ ), el diámetro de las hiladas en el sentido X ( $\phi_{fx}$ ) y el diámetro de las hiladas en el sentido Y ( $\phi_{fy}$ ) (Variables que se muestran en el esquema presentado en la Figura 3-25). Se realizaron 10 mediciones por cada una de las variables, en cada una de las muestras. Durante la medición de las separaciones entre hiladas, se despreciaron las franjas externas de las muestras dado que estas pudieron alterarse durante el proceso de corte.

Figura 3-25. Esquema separación y diámetro de hiladas en ambos sentidos



La calibración de la escala en el programa IMAGEJ se realizó usando como referencia la escala del papel milimetrado. En la Tabla 3-2 y la Tabla 3-3 se observan las medidas en pixeles y escala para las fotografías de las muestras de malla ligera y densa:

Tabla 3-2. Datos de calibración imágenes Malla Densa

<b>No. Medición</b>	<b>Longitud (Pixeles)</b>	<b>No. Medición</b>	<b>Longitud (Pixeles)</b>
1	709,003	11	708,006
2	707,006	12	707,001
3	705,001	13	704,001
4	710,001	14	708,001
5	706,000	15	705,006
6	704,006	16	709,018
7	705,003	17	710,035
8	705,003	18	708,035
9	708,001	19	707,000
10	710,000	20	708,006
<b>Promedio</b>		707,157	
<b>Longitud (mm)</b>		100	
<b>Escala (Pixeles/mm)</b>		7,072	

Tabla 3-3. Datos de calibración imágenes Malla ligera

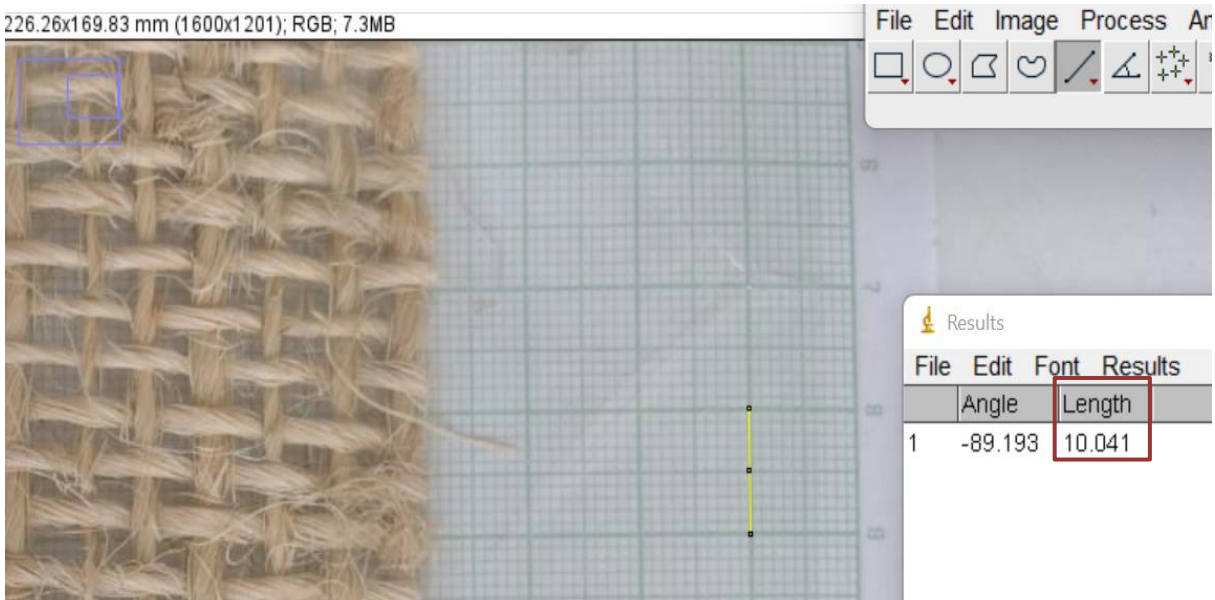
<b>No. Medición</b>	<b>Longitud (Pixeles)</b>	<b>No. Medición</b>	<b>Longitud (Pixeles)</b>
1	508,193	11	505,253
2	507,193	12	507,167
3	509,141	13	508,193
4	509,192	14	508,252
5	506,222	15	508,166
6	506,142	16	509,166
7	505,143	17	507,193
8	507,193	18	506,253
9	508,193	19	506,194
10	508,193	20	507,167
<b>Promedio</b>		507,390	
<b>Longitud (mm)</b>		100	
<b>Escala (Pixeles/mm)</b>		5,074	

La calibración de la escala se realizó una sola vez por tipo de entramado, dado que todas las muestras fueron fotografiadas con la misma distancia focal entre el lente de la cámara y la superficie. Dicha premisa se garantizó construyendo una estructura de soporte.

La escala establecida fue comprobada para cada una de las muestras, tomando una medida de una distancia conocida en el papel milimetrado, como se puede observar en la

Figura 3-26.

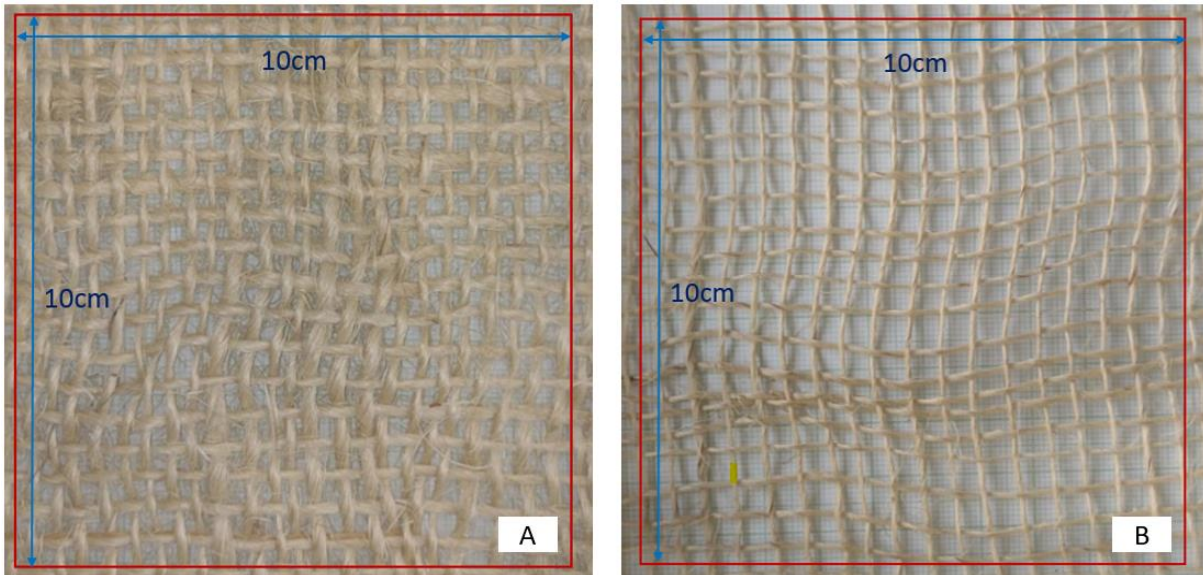
Figura 3-26. Comprobación calibración de mallas de fibra Densa y Ligera.



Para determinar la cantidad de hiladas por unidad de longitud se contaron la cantidad de hiladas que había en ambos sentidos en una longitud de 10cm (Figura 3-27). Se estableció

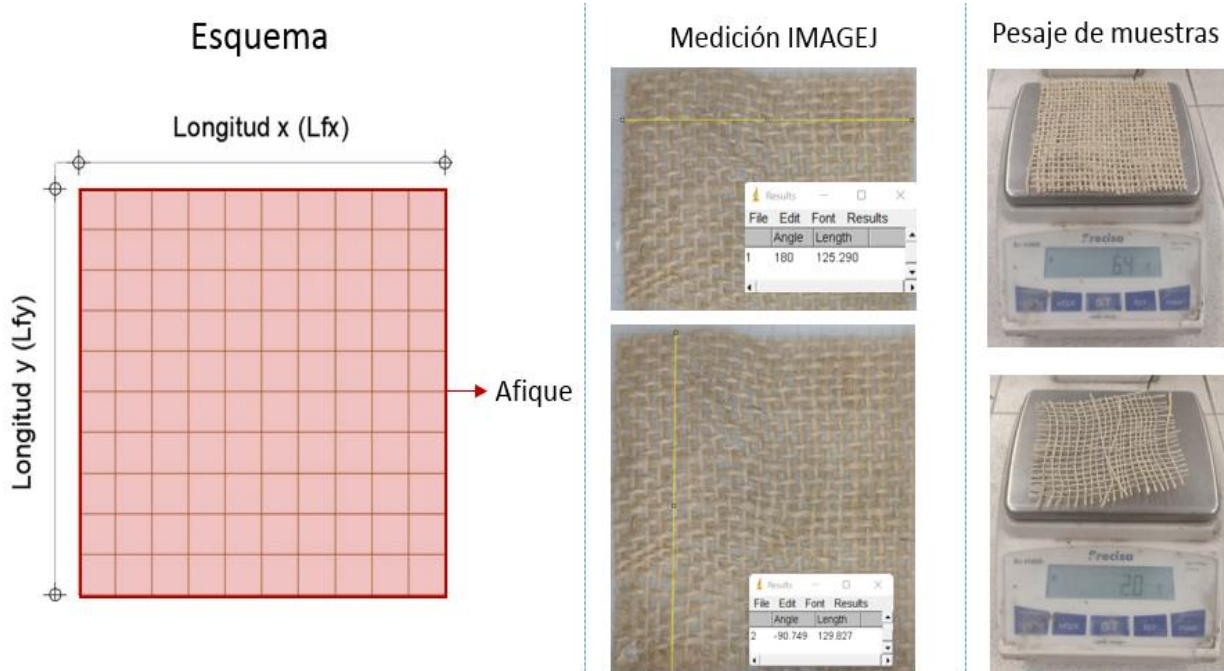
una medida menor a la longitud total de la muestra, dado que durante el proceso de corte se pueden deshilachar las hiladas ubicadas en los extremos.

Figura 3-27. Determinación cantidad de hiladas en ambos sentidos (A. Malla Densa y B. Malla Ligera)



Se estableció el peso por unidad de área ( $W_{fique}/A_{fique}$ ), determinando el área estimada de la muestra ( $A_{fique}$ ) mediante 3 mediciones de longitud en el sentido X ( $lf_x$ ) y 3 mediciones en el sentido Y ( $lf_y$ ), en el programa IMAGEJ, y se pesaron cada una de las muestras en una balanza de presión ( $W_{fique}$ ). Este procedimiento que se registra en la Figura 3-28.

Figura 3-28. Procedimiento determinación  $W_{fique}/A_{fique}$



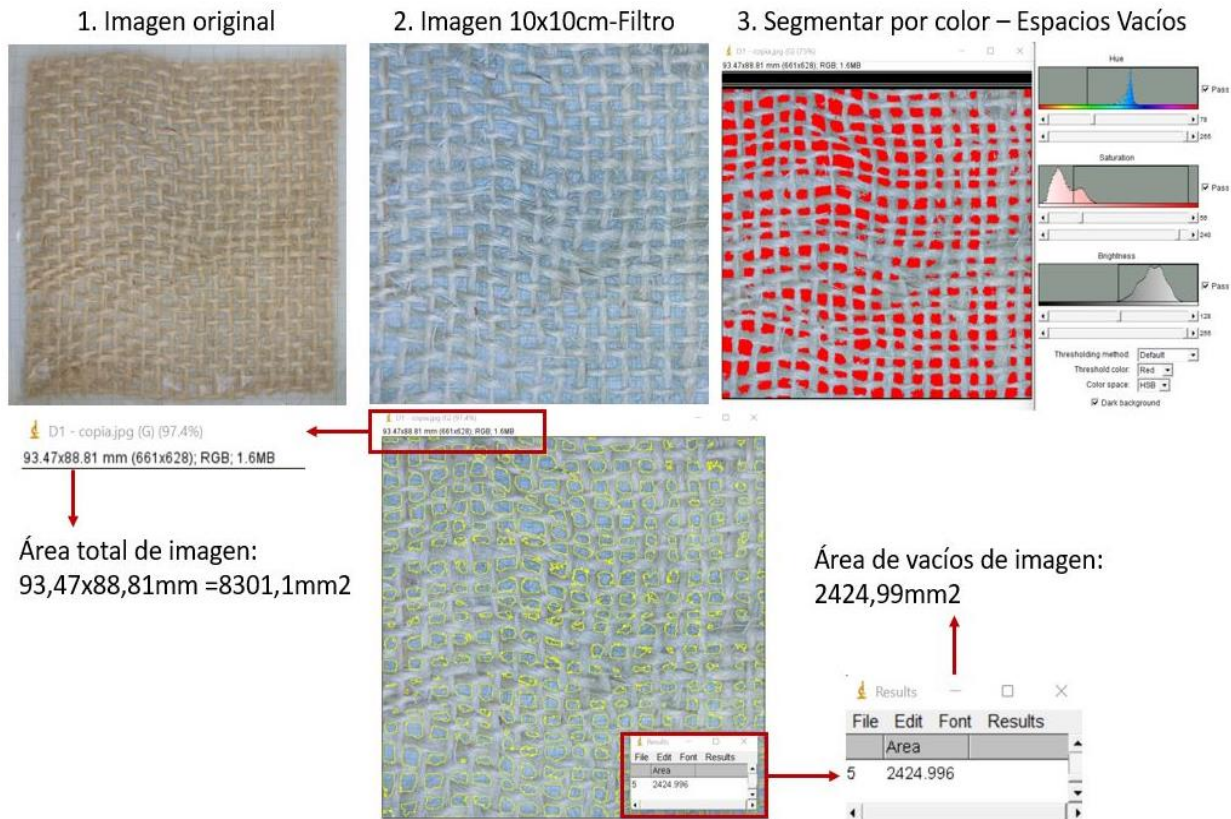
Por último, se estableció el porcentaje de vacíos mediante análisis digital de las imágenes, aplicando el siguiente procedimiento:

1. Se recortaron las fotografías de las probetas de fique a una medida de 10x10cm, descartando los extremos de la muestra que pudieron verse afectados durante el corte del material.
2. Se aplicó un filtro a la imagen para generar contraste entre el fondo y las hiladas de fibras de fique, buscando resaltar el fondo hacia una tonalidad azul, mientras las fibras se resaltaron hacia tonalidades amarillas, esto permitió una mejor segmentación en los umbrales de color, en el programa IMAGEJ.
3. Luego de escalar la imagen, se segmentan por color los pixeles de la imagen para señalar únicamente los espacios vacíos.
4. Se estableció el área de vacíos y el área total de la imagen. El área total de la imagen se calcula a partir de la información que muestra el programa IMAGEJ en la parte superior de la imagen analizada.

Este procedimiento se muestra en la Figura 3-29.



Figura 3-29. Procedimiento determinación porcentaje de vacíos



### 3.1.4.2 Caracterización mecánica

La determinación de las propiedades mecánicas a tensión de las mallas de fique fue realizada siguiendo las normas ASTM D 5035-11 "**Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)**" y ASTM D 3039-17 "**Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**". Las probetas de las mallas de fique fueron ensayadas a tensión en la maquina universal AG-IS SHIMADZU, del Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Universidad Nacional. La capacidad de la celda de carga empleada fue de 5kN.

Cabe resaltar, que se realizaron preensayos de los ensayos en la maquina universal, con el objetivo de ajustar el procedimiento empleado para la caracterización mecánica de los tejidos empleados. Inicialmente se ensayaron probetas sin ningún tipo de suplemento en los extremos; sin embargo, durante estos ensayos se observó que la malla era desgarrada o se

deslizaba de las mordazas, por lo cual era necesario realizar una preparación a las probetas que garantizara la correcta sujeción de cada espécimen y la falla por tensión.

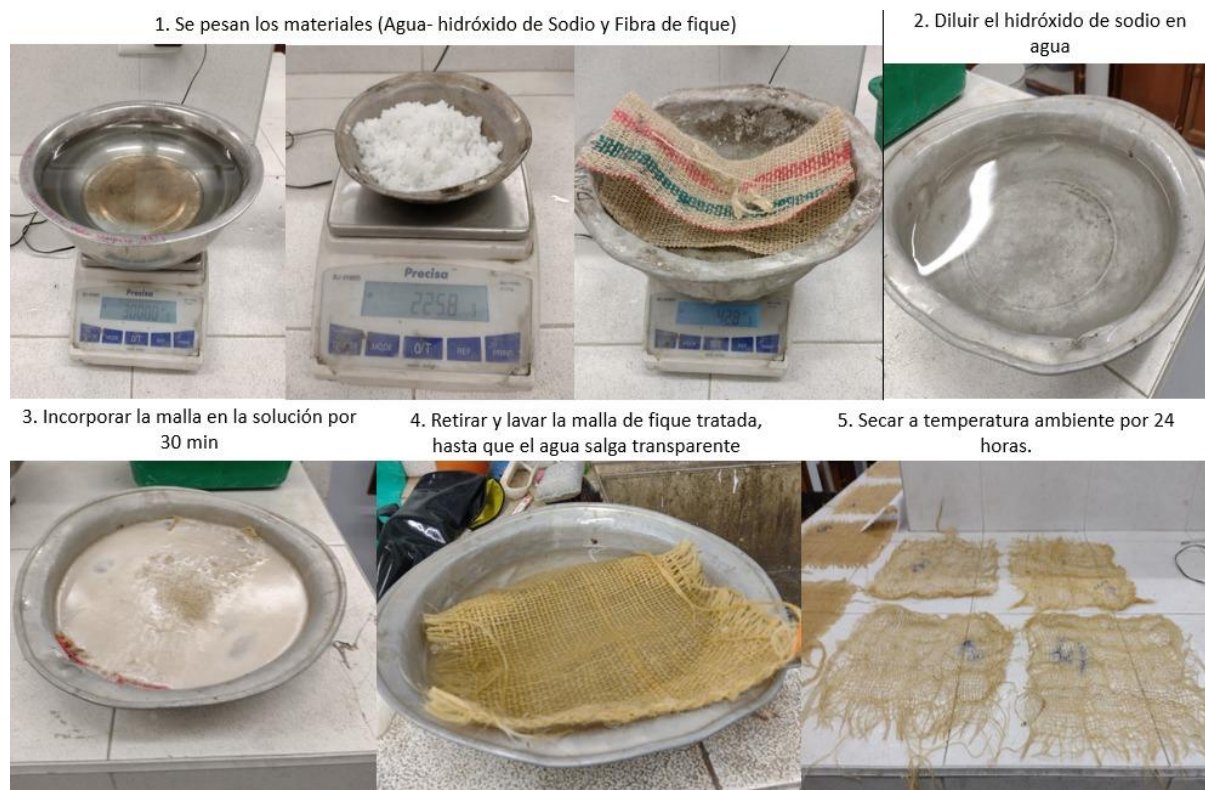
#### **3.1.4.2.1 Tratamiento alcalino de fibras de fique**

Las muestras de fibras fueron tratadas por un periodo de 30 minutos (Castro et al., 2007; Coudert, 2020), a diferentes concentraciones W/W (Peso de soluto/peso de solución) de Hidróxido de Sodio, al 1%, 3%, 5% y 7%. Durante el tratamiento alcalino se mantuvo la misma relación de peso de las mallas de fibras de fique en el solvente (Agua) por tipo de entramado; en las mallas ligeras el peso de las muestras tratadas era de 24.9g y en las mallas densas era de 42.8g.

Durante los tratamientos con hidróxido de sodio se utilizó equipo de protección personal conformado por la bata de laboratorio, botas punta de acero, guantes de látex, gafas y mascarara de seguridad, dado que el contacto del hidróxido de sodio con la piel y los ojos puede causar quemaduras e irritación y en casos graves hasta ceguera. Cabe resaltar que cualquier medida de seguridad adicional es necesario implementarla, al momento de manipular la solución se puede generar salpicadura o derrames sobre la ropa o en la piel por lo cual se recomienda en futuras investigaciones implementar impermeables de cuerpo completo.

En la Figura 3-30 se muestra el procedimiento llevado a cabo para el tratamiento de las muestras, en ellas se puede evidenciar que inicialmente se pesó la muestra de fibra, el agua y el hidróxido de sodio, luego se mezcló el agua con el hidróxido de sodio hasta que este último se diluyó completamente, en ese momento se incorporó la fibra dentro de la solución, garantizando que todo el material se mantuviera sumergido.

*Figura 3-30. Procedimiento tratamiento muestras de malla de fique.*










Posterior a los 30 minutos de tratamiento, se retiró la fibra de la solución y se lavó con abundante agua de grifo, realizando al menos tres lavados, hasta que el agua que escurría de la malla fuera completamente transparente. Por último, las mallas tratadas fueron secadas a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas.

Durante el tratamiento de las muestras se evidenció que a concentraciones del 5% y 7% se generaban gases y calor durante la reacción, esta condición fue vital al momento de elegir la concentración de hidróxido de sodio empleada para el tratamiento final de las mallas que serían empleadas para el reforzamiento de los muros. Teniendo en cuenta que el volumen de malla requerido para el reforzamiento de los muros era significativo (12 costales de malla ligera y 4 costales de malla densa), la cantidad de hidróxido de sodio requerida a concentraciones del 5% y 7% serían elevadas, generando un mayor riesgo de quemaduras y gases tóxicos.







En la Tabla 3-4, se relaciona un registro fotográfico de las mallas durante el tratamiento con hidróxido de sodio a diferentes concentraciones.

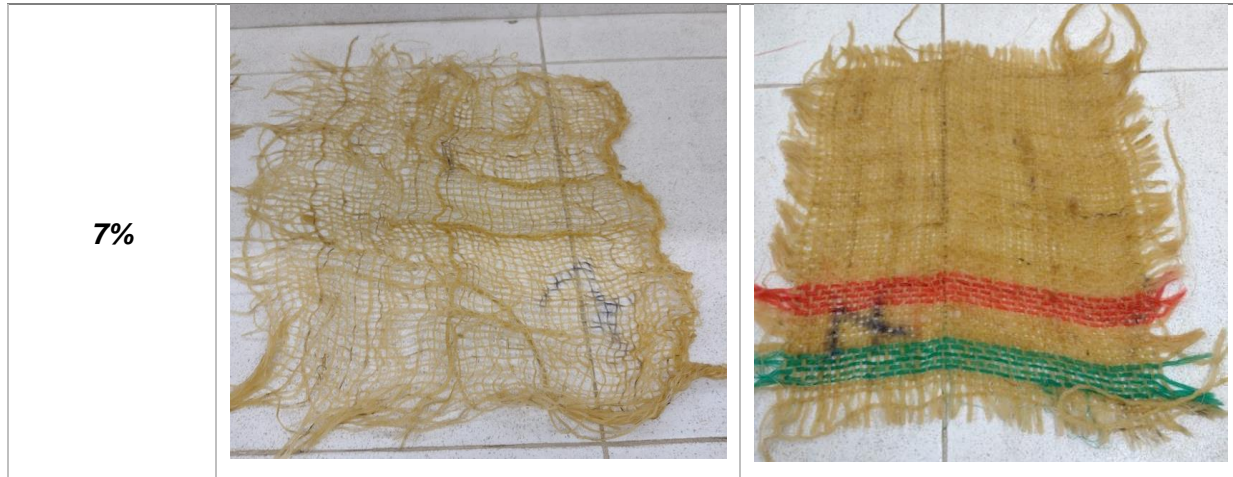
*Tabla 3-4. Registro fotográfico del tratamiento de muestras de malla de fique con diferentes concentraciones de NaOH.*

Concentración Hidróxido de sodio (w/w)	<i>Malla Ligera</i>	<i>Malla Densa</i>
1%	 A photograph showing a piece of light-colored, coarse mesh (fique TRM) submerged in a shallow metal tray containing a clear, colorless liquid. The mesh is partially submerged and appears to be floating or being held in place.	 A photograph showing a piece of light-colored, fine mesh (fique TRM) submerged in a shallow metal tray containing a clear, colorless liquid. The mesh is fully submerged and appears to be floating.
3%	 A photograph showing a piece of light-colored, coarse mesh (fique TRM) submerged in a shallow metal tray containing a slightly cloudy, light-colored liquid. The mesh is partially submerged and appears to be floating.	 A photograph showing a piece of light-colored, fine mesh (fique TRM) submerged in a shallow metal tray containing a slightly cloudy, light-colored liquid. The mesh is fully submerged and appears to be floating.
5%	 A photograph showing a piece of light-colored, coarse mesh (fique TRM) laid flat on a white surface. The mesh is fully submerged in a liquid, and its structure is clearly visible.	 A photograph showing a piece of light-colored, fine mesh (fique TRM) submerged in a shallow metal tray containing a slightly cloudy, light-colored liquid. The mesh is fully submerged and appears to be floating.
7%	 A photograph showing a piece of light-colored, coarse mesh (fique TRM) laid flat on a white surface. The mesh is fully submerged in a liquid, and its structure is clearly visible.	 A photograph showing a piece of light-colored, fine mesh (fique TRM) submerged in a shallow metal tray containing a slightly cloudy, light-colored liquid. The mesh is fully submerged and appears to be floating.

En la Tabla 3-5 se observan las muestras después de ser tratadas y lavadas con agua, se puede apreciar como al aumentar la concentración de hidróxido de sodio, se genera un cambio en la tonalidad de las mallas de fique y estas tienden a contraerse.

Tabla 3-5. Registro fotográfico de las muestras de malla de fique después del tratamiento con NaOH.

Concentración Hidróxido de sodio (w/w)	Malla Ligera	Malla Densa
1%		
3%		
5%		



#### 3.1.4.2.2 Preparación de las muestras

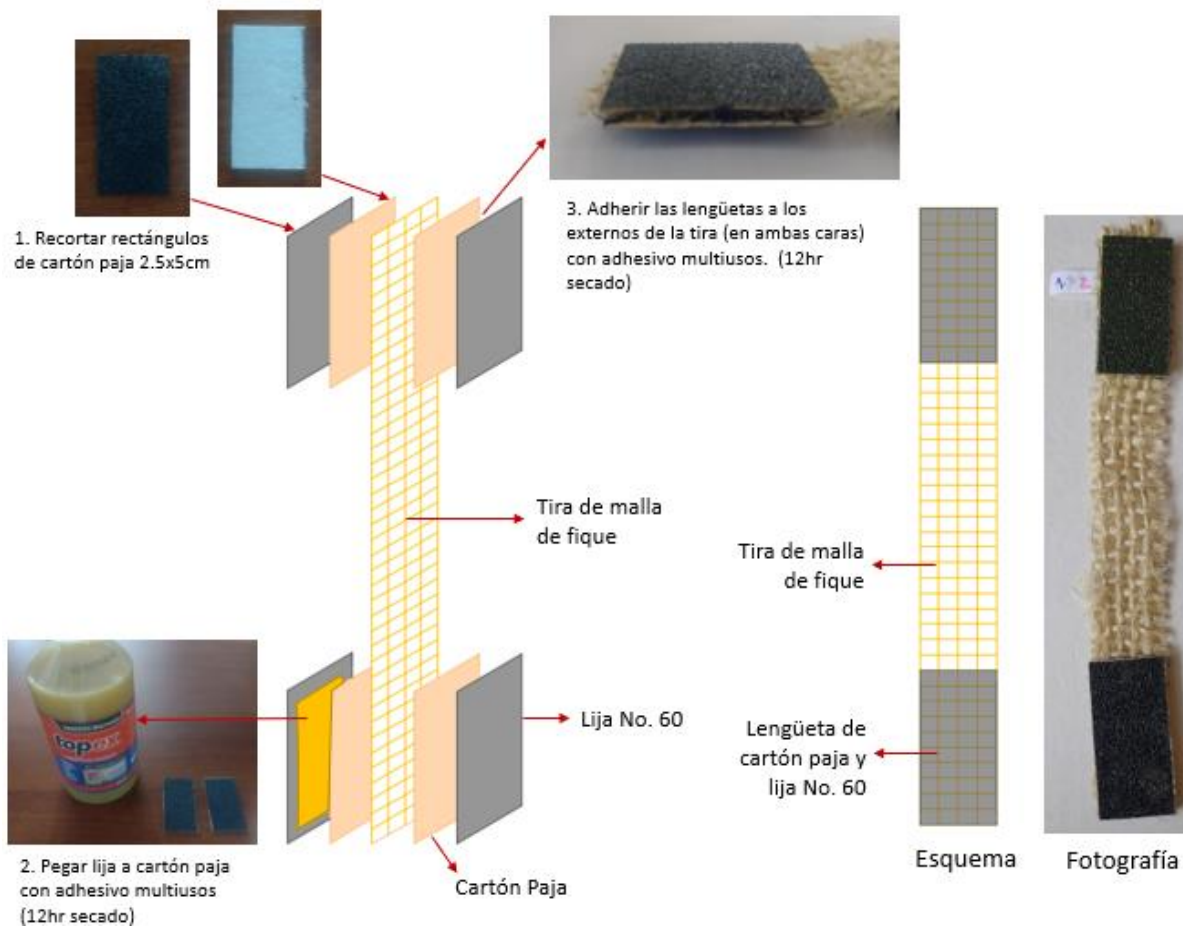
De cada una de las muestras de fique ligero y denso, con y sin tratamiento se extrajeron 3 tiras cortadas para ensayo. Las tiras de malla de fique (probetas) tenían un ancho de 25mm, el cual fue definido acorde al ancho de las mordazas de la máquina de tensión. Las probetas tenían una longitud de aproximadamente 20cm que se encuentra por encima de la longitud mínima recomendada por la norma **ASTM D 5035-11**. Las tiras fueron cortadas, garantizando que las hiladas de uno de sus sentidos se encontraran paralelas a la aplicación de la carga.

Ahora bien, como se mencionó previamente, durante las pruebas preliminares se determinó la necesidad de emplear suplementos de sujeción (lengüetas) en los extremos de las probetas. Cabe resaltar que la norma **ASTM D 3039-17** indica que un alto porcentaje de las fallas en los resultados de las pruebas están inducidas por el agarre generado por las mordazas. En las pruebas preliminares se observó que se generaba deslizamiento de la probeta y fallas en los tercios extremos por desgarre.

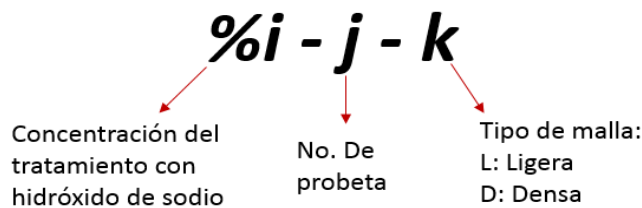
Las lengüetas fueron fabricadas con cartón paja y lija No. 60 y adheridas a las tiras de malla de fique. El proceso de fabricación consistió en: Cortar rectángulos de cartón paja y Lija No. 60 de 2.5cm de ancho por 5cm de longitud (Dimensiones internas de las mordazas), luego se pegó con adhesivo multiusos un rectángulo de lija a una de las caras de un rectángulo de cartón paja y se dejaron secar por 12 horas; por último, se pegaron estos elementos a ambos extremos de la tira de malla de fique. Para garantizar una adecuada adherencia, se colocó

peso sobre los extremos de la tira y se dejaron secar por 12 horas. Este procedimiento se observa en la Figura 3-31.

Figura 3-31. Procedimiento instalación de lengüetas en muestras de malla de fique (Ensayo a tensión)





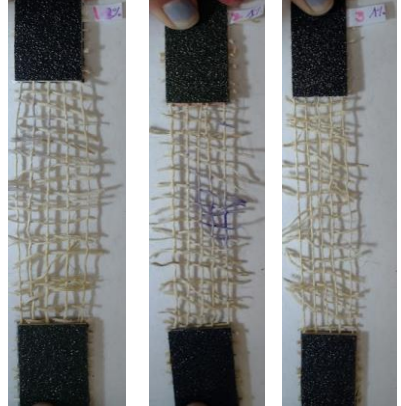

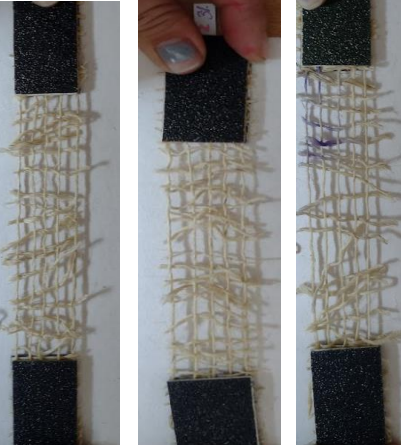
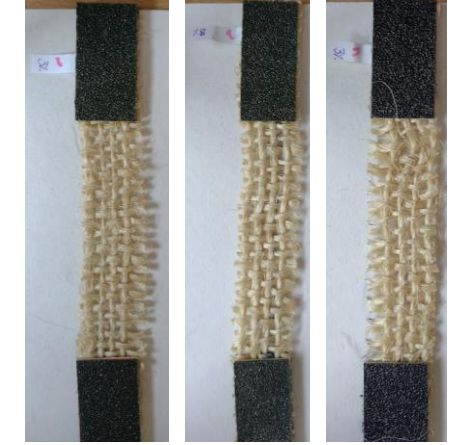
La nomenclatura establecida para diferenciar las probetas durante el desarrollo de los ensayos y la presentación de los resultados es:



De este modo, la siguiente nomenclatura **0%-1-L**, significa probeta No. 1, de malla ligera, sin tratamiento. Se debe señalar que por cada tipo de malla y concentración de tratamiento se fabricaron 3 muestras de modo que se contaran con tres repeticiones en el ensayo. En la

Tabla 3-6 se presentan las 30 probetas construidas para la caracterización mecánica de las mallas de fibra de fique.

Tabla 3-6. Registro fotografico de probetas en malla de fibra de fique.

Concentración Hidróxido de sodio (w/w)	Malla Ligera	Malla Densa
0%		
1%		
3%		





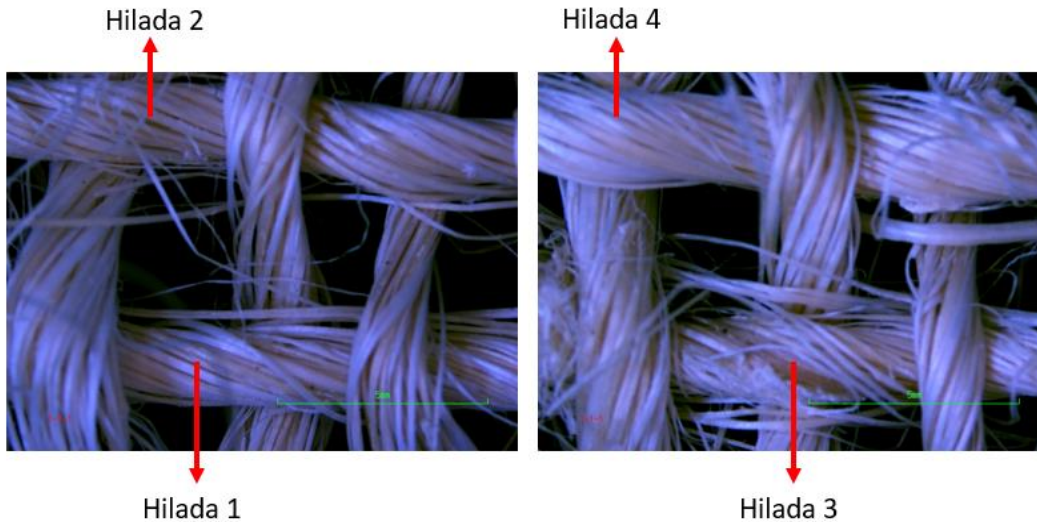
### 3.1.4.2.3 Procedimiento de ensayo

Previo al desarrollo del ensayo, se realizó la medición de la longitud libre entre las lengüetas para cada una de las probetas, la cual corresponde a la longitud inicial ( $l_i^{\%i-j-k}$ ), empleando un calibrador digital. En las probetas con tratamientos de 5% y el 7%, las fibras se encontraban contraídas, por lo cual durante la medición se estiraron de manera manual (Pretensión uniforme) hasta garantizar la alineación de las hiladas longitudinales.

Para el cálculo del área transversal aparente de la probeta ( $A_{ta}^{\%i-j-k}$ ), se tomaron entre 2 y 3 imágenes con un estereoscopio modelo SMZ800 de marca NIKON (El módulo de la cámara corresponde a DS-Fi2 y el captador de imagen digital es DS-L3) con un aumento de 2X, en el centro de la tira para determinar el diámetro ( $\phi_{\#-i}^{\%i-j-k}$ ) de cada una de las hiladas longitudinales (El signo # indica el número de hilada e  $i$  indica el número de la medición). Se realizaron 5 mediciones de su diámetro ( $\phi_{\#-i}^{\%i-j-k}$ ), en diferentes ubicaciones de las hiladas.

En la Figura 3-32 se muestran las imágenes tomadas con el estereoscopio para la probeta 1%-1-D.

Figura 3-32. Imágenes de las hiladas de fibra de fique tomadas con el estereoscopio



Como se puede observar, en la parte inferior izquierda de las imágenes se encuentra señalada una dimensión de 5mm, delimitada por barras. Esta medida permite realizar la calibración de las imágenes en el programa IMAGEJ. Para la calibración de la escala de las imágenes en mm, se tomaron 20 mediciones de la distancia conocida en pixeles, las cuales se presentan en la Tabla 3-7. La escala empleada para la calibración de las imágenes corresponde a: 105,2902 pixels/mm.

Tabla 3-7 Datos de calibración imágenes tomadas con el estereoscopio.

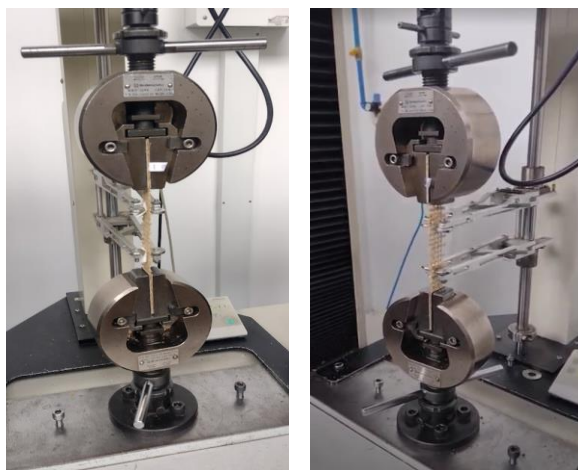
No. medición	Longitud (Píxeles)	No. medición	Longitud (Píxeles)
1	527,000	11	526,000
2	527,001	12	526,001
3	525,009	13	526,001
4	525,001	14	527,000
5	526,001	15	526,001
6	527,000	16	528,000
7	526,001	17	526,001
8	527,001	18	527,000
9	526,000	19	528,000
10	526,000	20	527,001
Promedio		526,451	
Longitud (mm)		5	
Escala (Pixels/mm)		105,2902	

A partir de las mediciones de los diámetros se obtuvo el diámetro promedio de la hilada ( $\phi_{prom.}^{i-j-k}$ ). Con el diámetro promedio de la hilada y se calculó el área transversal aparente de

la hilada ( $A_{\#}^{\%i-j-k}$ ), asumiendo sección transversal circular, y con la suma de las áreas transversales de todas las hiladas que conforman la probeta se calculó el área transversal de la probeta ( $A_{ta}^{\%i-j-k}$ ).

Luego se colocó la muestra en las mordazas de la máquina de ensayo, verificando que las hiladas longitudinales se encontraran paralelas al eje de aplicación de la fuerza. Se colocaron los brazos del extensómetro (Modelo SES-1000 de marca SHIMADZU con una galga extensiométrica de 50mm) en el centro de la probeta, adheridos a la muestra mediante cinta adhesiva. El montaje realizado para el desarrollo del ensayo a tensión de las mallas se puede observar en la Figura 3-33.

*Figura 3-33. Registro fotográfico de montaje del ensayo de tensión*



Las probetas fueron ensayadas a tensión a una velocidad de cabeza constante de 2mm/min hasta que la carga disminuyo significativamente, en ese punto se aumentó la velocidad hasta generarse la falla total de la probeta, acorde a lo sugerido por la norma **ASTM D 3039-17**. Las fallas de las probetas se generaron dentro del rango de 1 a 10 minutos. Por medio del programa TRAPEZIUM2 se registraron la carga aplicada (N), el desplazamiento del cabezal (mm) y la deformación registrada por el extensómetro (mm) cada 0.05s. Las condiciones del ambiente de prueba son: humedad relativa de 62% y Temperatura de 16°C.

### **3.1.5 Mortero de pega y mortero de recubrimiento**

Para el desarrollo de este trabajo final, se emplearon dosificaciones diferentes para el mortero de pega y recubrimiento, dado que, los muros construidos sin el reforzamiento de fibra de fique deben simular condiciones similares a las que se pueden encontrar en viviendas existentes, aun con las debilidades mecánicas que pueden presentar las mezclas del mortero de pega frente a su resistencia a la compresión en comparación con los requerimientos de la norma.

Para el mortero de recubrimiento que hace parte de la alternativa planteada para el reforzamiento de los muros, se utilizaron los resultados obtenidos de fluidez y resistencia a la compresión de diferentes mezclas para determinar una dosificación adecuada para dar cumplimiento a la normatividad existente y que la dosificación seleccionada permitiera la medición de los materiales requeridos de manera práctica durante el desarrollo de la actividad para un oficial o un maestro de obra.

La fluidez de los morteros de pega (Muestras tomadas durante la construcción de los muros) y recubrimiento (Mezclas de prueba y muestras tomadas durante la construcción de los muros) se determinó mediante la norma **NTC 5784** “*Método para determinar la fluidez de morteros de cemento*” como se puede observar en la Figura 3-34.

*Figura 3-34. Procedimiento ensayo de fluidez mortero*



La resistencia a la compresión del mortero se evaluó siguiendo la norma **NTC 220** “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50mm o 2” de lado” como se puede observar en la Figura 3-35.

Figura 3-35. Procedimiento ensayo de resistencia a la compresión - Mortero





### 3.1.5.1 Mortero de pega

El mortero de pega fue dosificado siguiendo las mezclas que tradicionalmente se emplean en el sector de la construcción, con una relación cemento-arena de 1:3 y una relación agua/cemento (A/C) de 1. La relación A/C fue establecida por el maestro de obra durante la primera mezcla, dado que se estableció incorporar agua hasta que consideró que la mezcla contaba con la trabajabilidad requerida para la construcción de los muros. El mortero fue preparado en una mezcladora eléctrica como se observa en la Figura 3-36.

Figura 3-36. Preparación mortero de pega para construcción de muros



Durante el proceso de construcción de los muros se tomaron 3 muestras del mortero de pega (**MP- #**), a las cuales se le determinó su fluidez y resistencia a la compresión a los 28 días. Por cada una de las muestras tomadas se fabricaron tres cubos de 50mm de lado para ensayo de resistencia a la compresión.

### 3.1.5.2 Mortero de recubrimiento

#### 3.1.5.2.1 Diseño de mezcla

Para el mortero de recubrimiento se estableció la dosificación de la mezcla realizando muestras de prueba con relaciones de cemento/arena que fueran fácilmente cuantificables en la práctica, con una relación de arena aproximada a un valor entero (1:3; 1:2; 1:2.5). Aunque el valor de 2.5 no es un valor entero si puede convertirse a una medida cuantificable en obra al expresarlo como 2:5, incorporando 5 baldes de arena por 2 baldes de cemento. Estas relaciones se encuentran en términos de volumen por lo que los resultados de la caracterización como densidad del cemento y densidad de la arena permiten realizar la conversión en términos de masa para las muestras de prueba.

Ahora bien, establecidas las relaciones de cemento/arena se determinó la dosificación de A/C para cada una de las muestras de prueba, para esto se realizaron ensayos de fluidez. El mortero de recubrimiento debía tener una consistencia media o plástica con un rango de fluidez entre 100 -120%. La dosificación de A/C fue establecida por ensayo y error, pero teniendo en cuenta los resultados de fluidez y resistencia a la compresión de las muestras del mortero de pega, dado que se redujo la cantidad de agua incorporada a las mezclas de prueba (1:3, 1:2.5 y 1:2).

La arena de peña empleada en las mezclas de prueba fue secada en el horno por 24 horas previo a la preparación de las mezclas y los morteros fueron mezclados de manera mecánica siguiendo la norma **NTC 112** “*Cementos. Mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica*”. En la Figura 3-37 se presenta un registro fotográfico del procedimiento que fue llevado a cabo.

Figura 3-37. Procedimiento mezclas de prueba – mortero de recubrimiento.



Con las mezclas de mortero que contaban con una fluidez dentro de los rangos señalados, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a los 7 y 14 días, preparando tres cubos por mezcla para cada edad de ensayo. En la Tabla 3-8 se pueden observar las dosificaciones de las mezclas de prueba.

Tabla 3-8. Resumen de dosificaciones para mezclas de prueba

<b>Relación Cemento: Arena</b>	<b>Relación Agua/Cemento (A/C)</b>
1:2	0,60
	0,70
1:2,5 (2:5)	0,60
	0,75
	0,80
1:3	0,80
	0,90

A partir de los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas, se seleccionó la dosificación que permitía alcanzar una resistencia mínima de 12,5MPa proyectando la resistencia de las mezclas a los 28 días con los resultados obtenidos a los 7 y 14 días. Este



valor mínimo acorde a la NSR-10; Título D; Capítulo 12 “Mampostería reforzada externamente”.

#### **3.1.5.2.2 Recubrimiento muros de ensayo**

Los morteros de recubrimiento para el reforzamiento de los muros de mampostería se fabricaron en una mezcladora eléctrica con la dosificación establecida. Durante el reforzamiento de los muros, se tomaron 4 muestras del mortero de recubrimiento (**MR- #**) a las cuales se les determinó fluidez y resistencia a la compresión a los 28 días (3 cubos por mezcla). Se tomaron mayor número de muestras del mortero de recubrimiento en comparación al mortero de pega, debido a que el volumen de mortero elaborado para los recubrimientos fue mayor al volumen de mortero elaborado para el mortero de pega; de manera adicional, fue necesario realizar la actividad durante cuatro jornadas, mientras la construcción de los muros se realizó en dos jornadas.

### **3.2 Muros a tracción diagonal**

La evaluación experimental del comportamiento a corte de los muros de mampostería reforzados externamente mediante mortero y malla de fique, se efectuó ensayando 16 muros a tracción diagonal, ejerciendo una carga de compresión a lo largo de una diagonal. La norma **ASTM E 519-21** “*Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*” fue la guía para la ejecución de este ensayo; sin embargo, por las dimensiones del marco metálico disponible en el Laboratorio de Estructuras, no es posible cumplir con las dimensiones mínimas exigidas en la norma, en promedio los muros tienen 1.09m de longitud y 1.09m de altura.

Cabe resaltar, que la norma **ASTM E 519-21** indica que se requieren mínimo 3 especímenes igualmente contruidos, en este caso, los lotes estaban conformados por 4 especímenes. La razón por la cual, se construyó un muro adicional fue que inicialmente se había considerado emplear uno de los muros para establecer la carga máxima y de esta manera calibrar los incrementos de carga que permitieran realizar al menos diez lecturas de deformación. Sin embargo, durante el primer ensayo realizado sobre un muro sin reforzamiento, se evidenció que era posible anticipar la falla del muro, por el ruido que se generaba mientras se fracturaba la mampostería y al determinar la carga máxima que resistía este muro patrón. Se pudo establecer que con incrementos de 100psi en el gato hidráulico empleado para aplicar la

carga, se obtendrían más de 10 lecturas de deformaciones para graficar las curvas de esfuerzo de corte vs deformación unitaria.

### 3.2.1 Especímenes de prueba

Para el desarrollo de este trabajo final se construyeron 16 muros de mampostería, empleando bloque No. 5 estándar y mortero de pega con una dosificación cemento/arena de 1:3 y relación A/C de 1 como se había mencionado previamente (Figura 3-38). Todos los muros fueron construidos por el mismo personal de obra, el cual estuvo conformado por un maestro de obra y sus tres ayudantes. El uso de personal de obra para la construcción de los muros tenía como finalidad que los muros construidos presentaran características similares a las que presentan muros de viviendas reales, por esta misma razón se emplearon materiales que podían adquirirse en un depósito de materiales a bajo costo, aunque estos no cumplieran con los requerimientos normativos de la NSR-10. Los muros estaban conformados por 5 hiladas de bloque y en cada hilada se emplearon 3 unidades completas y medio bloque. El espesor máximo de las juntas horizontales fue de 10mm, pero las juntas verticales tenían espesores entre 10 y 20mm.

*Figura 3-38. Muros de mampostería sin reforzamiento*

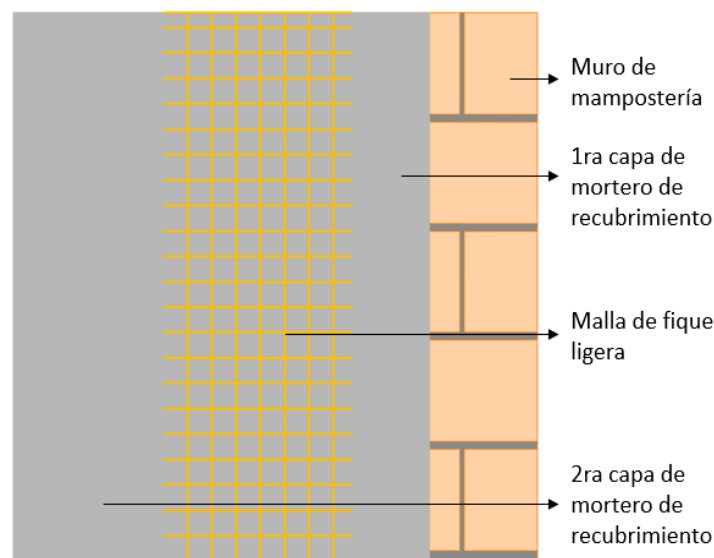


De los 16 muros construidos se destinaron 4 ejemplares como lote de referencia, dado que no contaron con ningún tipo de reforzamiento. Estos muros conforman la línea base y permiten determinar la influencia del reforzamiento realizado mediante el recubrimiento de mortero y malla de fique. Para el presente trabajo de investigación estos 4 muros serán indicados con las siglas **Mt-P-#**, el signo # indica la numeración del ejemplar dentro de esta categoría y permite la identificación del muro. Los 12 muros restantes fueron reforzados con mortero y malla de fique, con tres configuraciones de reforzamiento.

El segundo lote estaba conformado por 4 muros que cuentan con un recubrimiento de mortero en una de sus caras y embebida se colocó malla de fique ligera. Para el presente trabajo de investigación estos especímenes serán indicados con las siglas **Mt-R1L-#**. Esta nomenclatura significa **Mt**: Muros a tracción diagonal, **R1L**: Reforzados por 1 cara con malla de fique ligera y el signo **#**: la numeración del ejemplar dentro de esta categoría y permite la identificación del muro. En la

Figura 3-39 y Figura 3-40 se observa la configuración de estos elementos:

*Figura 3-39. Configuración de los muros del lote Mt-R1L, vista frontal*

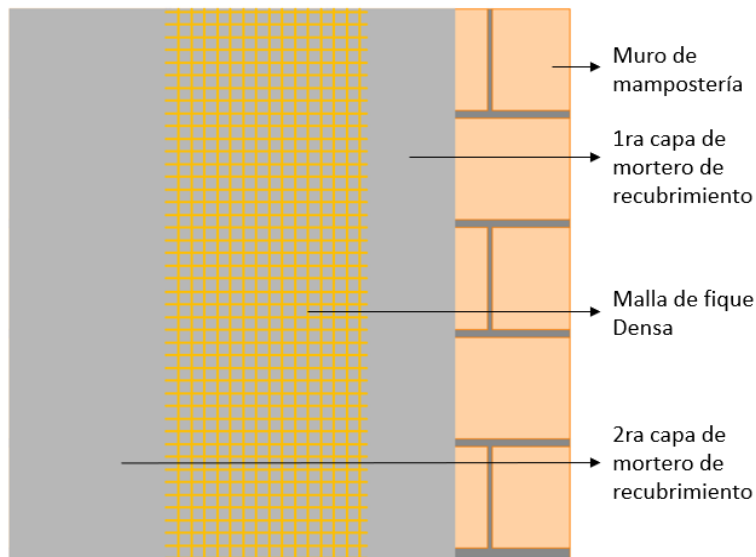


*Figura 3-40. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R1L, vista Lateral*

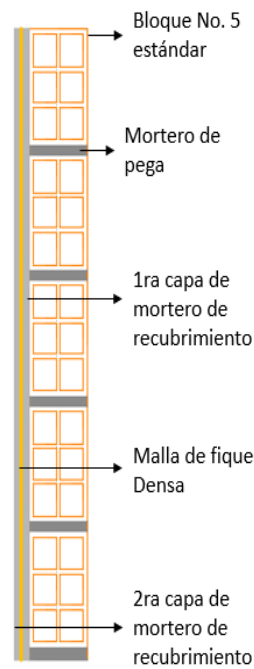


El tercer lote estaba conformado por 4 muros con recubrimiento de mortero en una de sus caras y embebida se colocó malla de fique densa. Para el presente trabajo de investigación estos especímenes serán indicados con las siglas **Mt-R1D-#**. Esta nomenclatura significa **Mt**: Muros a tracción diagonal, **R1D**: Reforzados por 1 cara con malla de fique densa y el signo **#**: la numeración del ejemplar dentro de esta categoría y permite la identificación del muro. En la Figura 3-41 y Figura 3-42 se observa la configuración de estos elementos:

*Figura 3-41. Configuración de los muros del lote Mt-R1D. Vista frontal*



*Figura 3-42. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R1D. Vista lateral*



El último lote estaba conformado por 4 muros con recubrimiento de mortero en las dos caras y embebida se colocó malla de fique ligera. Para el presente trabajo de investigación estos especímenes serán indicados con las siglas **Mt-R2L-#**. Esta nomenclatura significa **Mt**: Muros a tracción diagonal, **R2L**: Reforzados por 2 caras con malla de fique ligera y el signo **#**: la numeración del ejemplar dentro de esta categoría y permite la identificación del muro. En la Figura 3-43 y Figura 3-44 se observa la configuración de estos elementos:

Figura 3-43. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R2L. Vista frontal

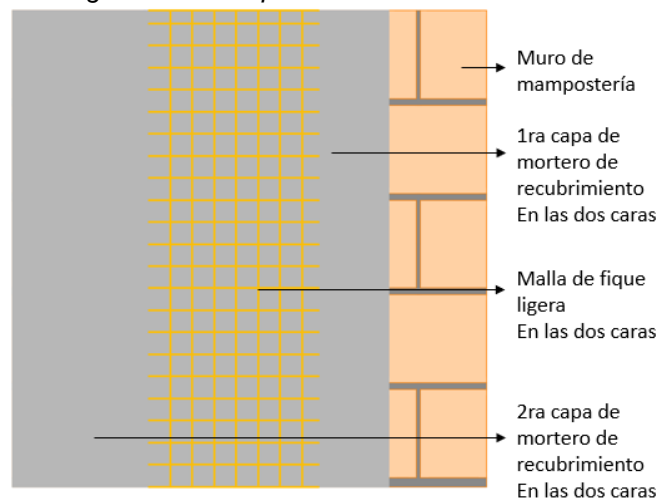
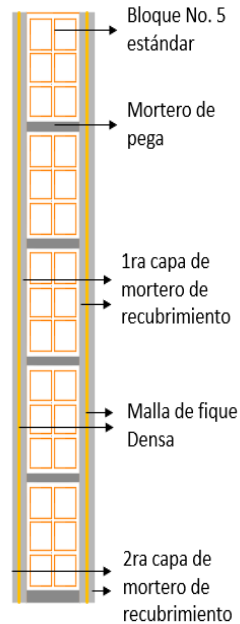


Figura 3-44. Configuración en capas de los muros del lote Mt-R2L. Vista Lateral



A manera de resumen se presenta en la Tabla 3-9, las propiedades de los lotes construidos para ensayo a tracción diagonal.

Tabla 3-9. Características de muros no reforzados y reforzados con TRM fique

<b>Lote de muros</b>	<b>Cantidad de ejemplares</b>	<b>Tipo de malla</b>	<b>Condición</b>
<b>Mt-P</b>	4		Muro no reforzado
<b>Mt-R1L</b>	4	Ligera	Reforzado en una sola cara
<b>Mt-R1D</b>	4	Densa	Reforzado en una sola cara
<b>Mt-R2L</b>	4	Ligera	Reforzado en ambas caras

Aunque inicialmente se desconocía el comportamiento que presentarían las mallas de fique dentro de la capa de reforzamiento, se formuló que la malla densa, no permitiría una adecuada conexión entre la primera y la segunda capa de mortero, razón por la cual se podría presentar una separación de la capa de refuerzo del muro de mampostería, por lo que, no se consideró necesario realizar especímenes de muro reforzados con malla densa en ambas caras.

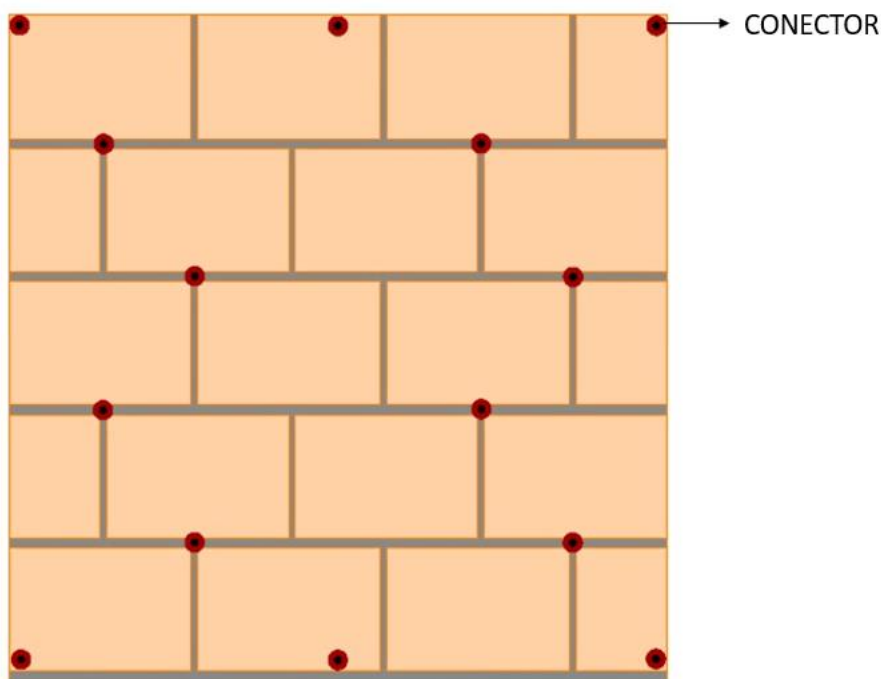
### 3.2.2 Conectores

Se evidenció la necesidad de implementar conectores que no solo anclaran la malla al muro de mampostería, sino que actuaran como conectores de cortante y permitieran la transferencia del esfuerzo del muro al recubrimiento y la malla de fique.

La alternativa usada como conectores fueron chazos y tornillos de 3/16"; sin embargo, debido a la reducida área de la cabeza del tornillo y dado que en las mallas ligeras se presenta una mayor separación entre las hiladas era necesario complementar esta alternativa con un suplemento. Para esto se utilizaron tapas metálicas de botellas de bebidas (Tapas de cervezas y gaseosas) que incrementaran el área de contacto con las mallas.

La ubicación de los conectores se señala en la Figura 3-45. Durante el proceso de reforzamiento se evidenció la necesidad de incorporar los conectores ubicados en el eje central, en la parte superior e inferior, con el fin garantizar que la malla se encontrara estirada y evitar que esta se descolgara generando peso sobre los recubrimientos.

*Figura 3-45. Ubicación de conectores transversales en muros de prueba*



### 3.2.3 Preparación costales de fique

Los costales tienen una costura en los laterales mediante un hilo plástico, por lo que inicialmente se retiraron las costuras, de modo que la malla quedara completamente suelta.

La malla de fique densa y ligera fue sometida a un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio a una concentración de 3% w/w por 30 minutos; esta concentración fue definida a partir de la revisión bibliográfica, las condiciones de seguridad y practicidad identificadas durante la caracterización de las mallas y los resultados obtenidos en la caracterización mecánica. Cabe resaltar que, durante el tratamiento de las muestras para caracterización, se observó que el hidróxido de sodio corroía los contenedores e implementos metálicos, por lo que el tratamiento de las mallas para el reforzamiento se realizó en una caneca plástica de 1000L.

Para determinar la cantidad de agua empleada en la solución, se pesó cada incorporación de agua, al final cuando se había llenado la caneca plástica hasta un nivel que permitiera la incorporación de las mallas sin desbordarse, se totalizó la cantidad de agua en la caneca, la cual corresponde al peso total de agua en la solución (Solvente). Con la cantidad de agua establecida, se calculó la cantidad de hidróxido de sodio necesario para el tratamiento de las mallas.

Dado que la cantidad de hidróxido de sodio era considerable y con el fin de evitar cualquier tipo de accidente durante el desarrollo del ensayo, se fue incorporando el hidróxido de sodio en bajas cantidades en el agua mediante una pala metálica. Conforme se incorporaba hidróxido de sodio en el agua, esta se agitaba, para garantizar que el hidróxido de sodio se disolviera completamente. Luego, se colocaron las mallas de fique dentro de la solución, garantizando que todo el material se mantuviera sumergido durante el tiempo del tratamiento (30min). Esta primera etapa se puede evidenciar en el registro fotográfico presentado en la Figura 3-46.

*Figura 3-46. Registro fotográfico 1ra etapa del tratamiento alcalino de las mallas de fique*





Una vez culminado el tiempo de tratamiento, se retiraron las mallas de fique de la caneca y fueron lavadas con abundante agua, al menos 3 veces, hasta que el agua saliera completamente transparente. Posteriormente las mallas se sumergieron en agua limpia por 15 minutos y se realizó un nuevo lavado. Esto con el fin de retirar cualquier residuo de hidróxido de sodio que se encontrara adherido a las fibras y que pudieran deteriorarlas. Esta segunda etapa del procedimiento se puede evidenciar en la Figura 3-47.

*Figura 3-47. Registro fotográfico 2da etapa del tratamiento alcalino de las mallas de fique.*



Por último, los costales se extendieron sobre una superficie de concreto para que secan por ventilación natural, hasta el día que fueron empleados para el reforzamiento de los muros, esto teniendo en cuenta que las fibras celulósicas con una humedad superior al 9% son susceptibles al ataque de bacterias y hongos (Arluna, 2021).

### 3.2.4 Construcción de especímenes de prueba

La construcción de los muros se desarrolló siguiendo el procedimiento que se describe a continuación: Se niveló la tabla de apoyo sobre la cual se construirían los muros y se cimbró el centro de la tabla para ubicar la primera hilada del muro. Se colocó la primera junta para pegar la primera hilada de bloque No. 5 estándar y se colocó la primera hilada, revisando la nivelación y horizontalidad con una boquillera y un nivel de burbuja. Luego, se instaló un marco en madera que permitiera garantizar la modulación de las hiladas y durante su instalación se revisó la verticalidad de ambos laterales que permitiera regular el plomo del muro durante su construcción. Por último, se continúa con la construcción del resto de las hiladas, hasta alcanzar la altura proyectada del muro. El proceso descrito se evidencia en la Figura 3-48.

*Figura 3-48. Proceso de construcción de muros de mampostería.*



Con un tiempo de curado mayor a 28 días, se procedió a taladrar los muros en los puntos establecidos en la Figura 3-49, para instalar los chazos de 3/16", a los cuales se les colocó los tornillos sin ajustarlos, con el fin de evitar que durante la primera capa de mortero de recubrimiento fueran sellados con la mezcla. Cabe anotar, que las primeras y últimas celdas de muro se rellenaron con mortero en la misma dosificación que el mortero de recubrimiento para garantizar el anclaje de los conectores en los extremos del muro.

*Figura 3-49. Registro fotográfico de ubicación de chazos en muros de prueba*



Se procedió a aplicar una primera capa de mortero y luego se instalaron las mallas de fique del reforzamiento, anclándolas al muro y a la primera capa de mortero con los conectores,

como se aprecia en la Figura 3-50. De manera adicional, se instalaron dos guías verticales en los laterales del muro que permitieran que el recubrimiento estuviera plomado y con el mismo espesor en toda el área del muro.

*Figura 3-50. Registro fotográfico de 1ra etapa de reforzamiento mediante TRM fique*



Se aplicó una segunda capa de mortero, la cual fue esparcida con una boquillaera metálica y se afinaron los pañetes con una llana de madera húmeda (Figura 3-51).

*Figura 3-51. Registro fotográfico de 2da etapa de reforzamiento mediante TRM fique*



Al día siguiente, se aplicó agua sobre las caras reforzadas y se forraron con stretch film (vinipel). Los muros se mantuvieron forrados hasta un día antes del ensayo, con un tiempo de fraguado de 28 días y como se observa en la Figura 3-52, al momento de retirar el stretch film, éste había mantenido la humedad en el recubrimiento.

Figura 3-52. Registro fotográfico durante y al finalizar el tiempo de curado.

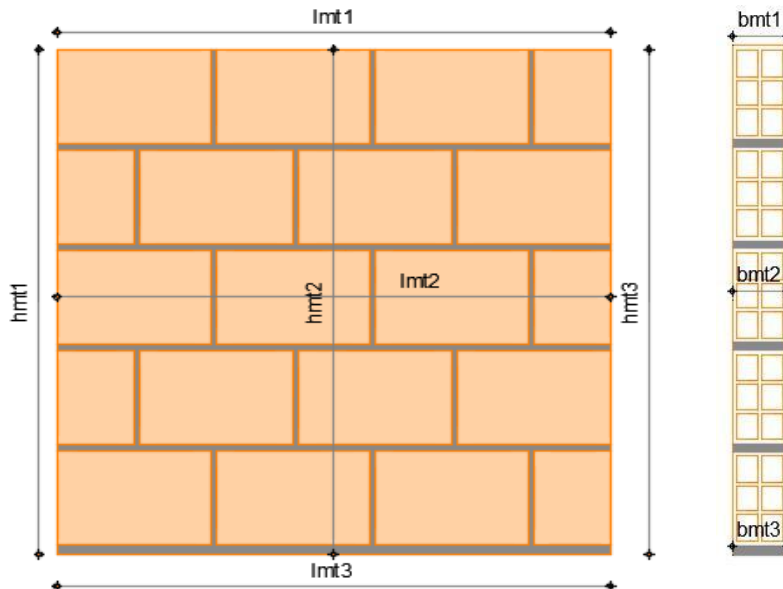


### 3.2.5 Procedimiento de ensayo

Inicialmente se realizaron las mediciones requeridas para la determinación del área neta:

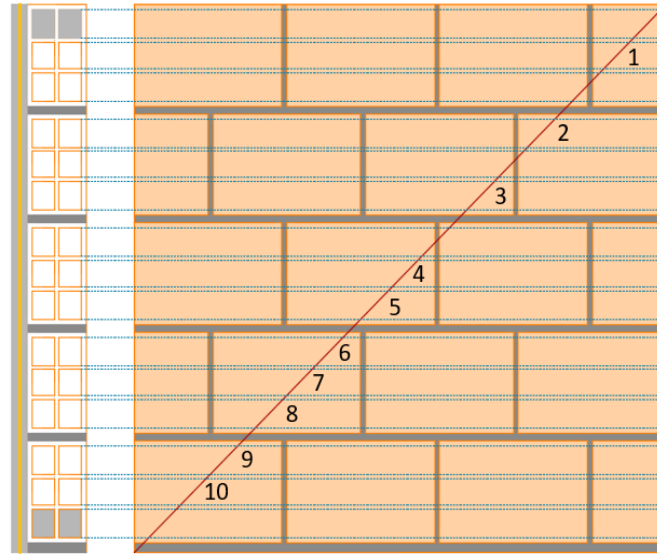
De cada muro se tomaron 3 medidas de longitud ( $l_{mt\#}$ ), altura ( $h_{mt\#}$ ) y espesor ( $b_{mt\#}$ ), en las ubicaciones señaladas en la Figura 3-53. Cabe resaltar, que el espesor de los muros reforzados se mide incluyendo el espesor de los recubrimientos, bien sea por una cara o por ambas caras.

Figura 3-53. Dimensiones medidas de los muros de prueba para ensayo de tracción diagonal



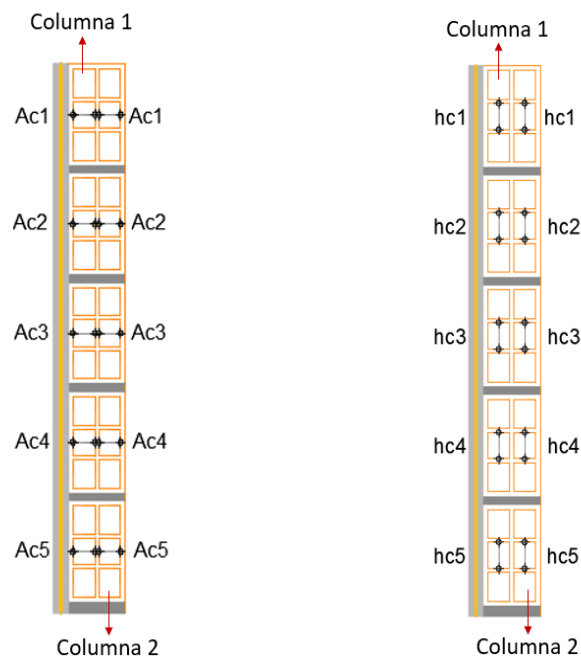
Se cuantificaron la cantidad de celdas en los bloques que se encontraban vacías sobre la línea acción de aplicación de la carga o la diagonal del muro, como se evidencia en la Figura 3-54. Por cada columna de celdas, hay 10 celdas vacías, sin mortero de pega o relleno.

Figura 3-54. Esquema de cantidad de vacíos en la línea de acción de aplicación de la carga.



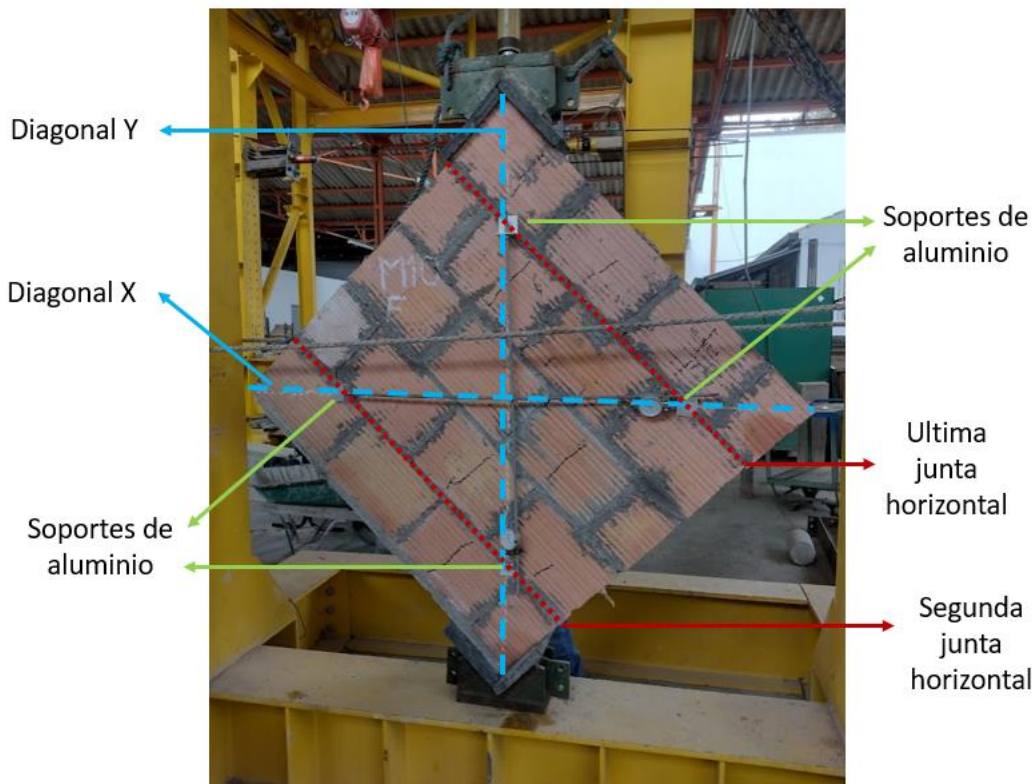
Y se realizaron 5 mediciones del ancho ( $a_{C\#}$ ) y 5 mediciones de la altura ( $h_{C\#}$ ) de las celdas en ambas columnas del muro (Figura 3-55), para determinar el ancho ( $a_{Cprom\#}$ ) y altura ( $h_{Cprom\#}$ ) promedio de las celdas de cada columna. El signo # indica la columna de celdas a la que corresponde.

Figura 3-55. Dimensiones de ancho y altura de vacíos medidos en los muros de prueba para ensayo de tracción diagonal



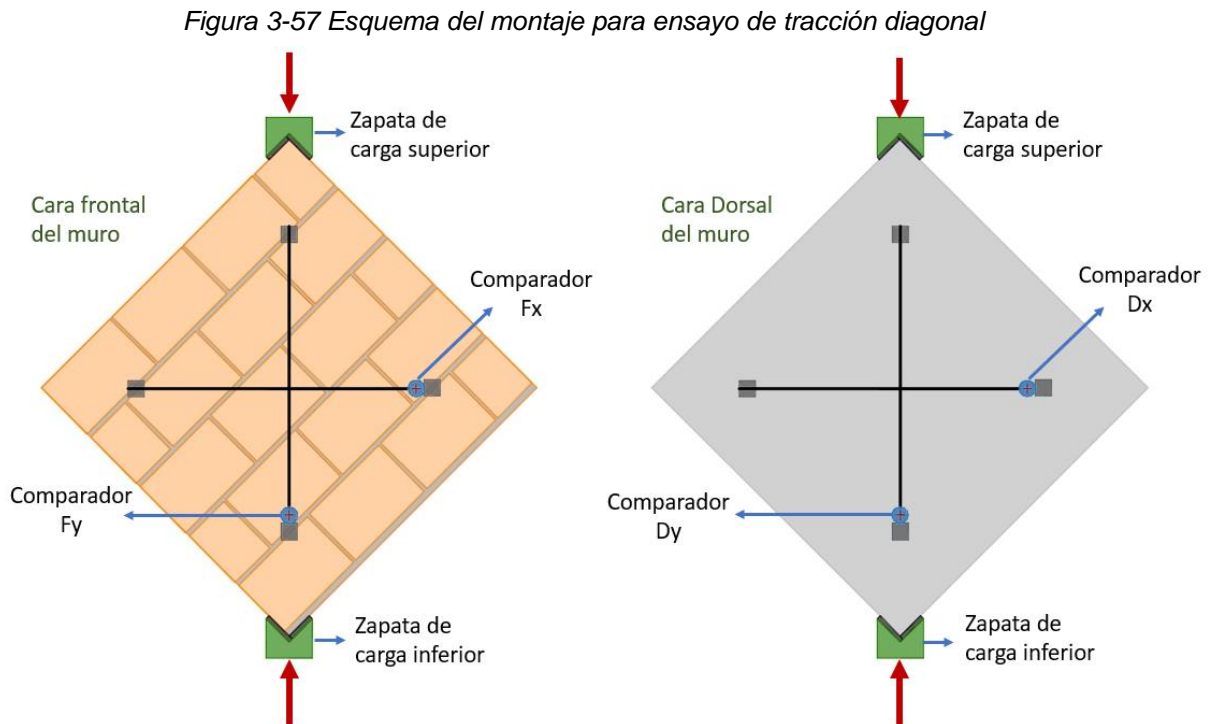
Ahora bien, durante el desarrollo del ensayo se registraron las deformaciones que presentaba el muro en sentido vertical (Y) y horizontal (X), en ambas caras (Frontal y Dorsal). Estas deformaciones fueron medidas a través de comparadores de carátula (Con una precisión de centésimas de milímetro). Cada medidor o comparador de carátula se instaló en una varilla roscada de 3/8", la cual estaba soportada mediante ángulos de aluminio de 2"x2" y longitud 5cm. Estos soportes fueron fijados al muro mediante chazo y tornillo de 1/4". Los puntos de perforación para estos anclajes corresponden a los puntos de intersección de las diagonales del muro con la segunda y última junta horizontal, como se puede apreciar en la Figura 3-56.

Figura 3-56. Ubicación de soportes para instalación de comparadores de carátula



Los soportes de aluminio y los medidores de carátula, se instalaron cuando el muro se encontraba ubicado sobre el marco de ensayo con las zapatas de carga, ya que, durante el montaje, los soportes representan un riesgo para la integridad física de las personas involucradas. Antes de iniciar con el montaje de muro se registró la longitud de la diagonal vertical, la cual corresponde a la longitud calibrada en dirección paralela a la carga ( $L_{dy}$ ).

El montaje realizado para el ensayo de tracción diagonal se presenta en la Figura 3-57, en ella se representa la cara frontal y dorsal del muro con sus comparadores de caratula en sentido X y sentido Y. Para cada uno de los muros ensayados se registró si la cara dorsal o frontal se encontraba o no reforzada, con el fin de comparar, cuál de ellas presentaba una mayor deformación.



Durante el desarrollo del ensayo, se llevó a cabo un registro fotográfico que permitiera hacer una descripción clara del modo de falla y se anexó al desarrollo de este trabajo final. Esta información permite comparar los modos de falla generados para cada una de las configuraciones ensayadas. Y con la información obtenida del ensayo se generaron gráficas de esfuerzo de corte ( $S_s$ ) vs deformación unitaria a corte ( $\gamma$ ).



# 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 4.1 Caracterización de materiales

### 4.1.1 Cemento

#### 4.1.1.1 Densidad del cemento

Los datos obtenidos durante el ensayo para calcular la densidad del cemento se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Datos obtenidos para calcular la densidad de cemento

<b>Masa del cemento</b>	$M_{dcem}$	64,001	g
<b>Lectura Inicial</b>	$V_{i-dc}$	0,85	ml
<b>Lectura Final</b>	$V_{f-dc}$	23,1	ml

Con esta información se puede establecer que el volumen de líquido desplazado por la masa de cemento ( $V_{dcem}$ ), corresponde a la diferencia entre la lectura final ( $V_{f-dc}$ ) y la lectura inicial ( $V_{i-dc}$ ):

$$\text{Ecuación 4-1} \quad V_{dcem} = V_{f-dc} - V_{i-dc} = 23,1ml - 0,85ml = 22,25ml = 22,25cm^3$$

Por lo tanto, la densidad del cemento ( $\rho_c$ ) corresponde a:

$$\text{Ecuación 4-2} \quad \rho_c = \frac{\text{Masa del cemento } (M_{dcem})}{\text{Volumen desplazado } (V_{dcem})} = \frac{64,001g}{22,25cm^3} = 2,88 \frac{g}{cm^3}$$

El volumen de la muestra con el keroseno previo a la extracción del aire incorporado en los espacios porosos del cemento fue de 23,3 ml, por lo tanto, después de colocar la muestra en el baño de agua se redujo el nivel del volumen en 0,2 ml.

A partir de este valor de densidad se evidencia que el cemento de Cemex empleado para la construcción de los muros corresponde probablemente a un cemento adicionado, esto teniendo en cuenta lo relacionado por Molano y Torres (2017) dado que un cemento hidráulico sin adiciones tiene una densidad entre 3,1 y 3,15 g/cm<sup>3</sup>, mientras un cemento con adiciones tiene una densidad entre 2,8 y 3,1 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.1.2 Finura del cemento

La determinación del volumen aparente de la capa compactada de cemento fue establecida mediante el método de desplazamiento del mercurio. El volumen aparente del cemento fue determinado en el laboratorio de estructuras, el cual tiene un valor de  $V_{r-f} = 1,847 \text{ cm}^3$ .

La muestra que se debe incorporar dentro de la cámara de permeabilidad fue calculada a partir del volumen aparente de la capa de cemento (Ecuación 3-1), donde  $\varepsilon$  corresponde a la porosidad deseada de la capa de cemento que, como se mencionó en la metodología, tiene un valor de 0,5.  $\rho_c$  es la densidad de la muestra de cemento previamente determinada:

$$M_{f_{cem}} = 2,88 \frac{g}{\text{cm}^3} * 1,847 \text{ cm}^3 * (1 - 0,5)$$

$$M_{f_{cem}} = 2,6596g$$

El intervalo de tiempo registrado entre el paso del menisco del líquido por la segunda y la tercera marca fue de  $t_{f-e} = 2$  minutos y 40,25s que corresponde a  $t_{f-e} = 160,25$ s. La temperatura del aire al interior del laboratorio  $T_{f-e}$  se encontraba a 20,6°C. A partir de la temperatura  $T_{f-e}$  se determina la raíz de la viscosidad del aire  $\sqrt{n}$ , para esto, es necesario realizar interpolación a partir de los valores relacionados en la Tabla 4-2. En la tabla se relaciona el valor de la raíz de la viscosidad del aire  $\sqrt{n}$  para una temperatura ambiente de 20,6°C.

Tabla 4-2 Viscosidad del aire en función de la temperatura del medio ambiente. Tomada de Molano y Torres (2017)

Temperatura C°	$\sqrt{n}$
20	0,01344
21	0,01346
20,6	0,013452

La constante de calibración del permeabilímetro de Blaine del laboratorio  $k$  tiene un valor de 17,2. A partir de la información registrada se calculó la superficie específica mediante la Ecuación 4-3.

$$Ecuación\ 4-3 \quad S = \frac{k\sqrt{t_{f-e}}}{\rho_c\sqrt{n}}$$

$$s = \frac{17,2 * \sqrt{160,25s}}{2,88 \frac{g}{cm^3} * 0,01344} = 5620,15 \frac{cm^2}{g} = 562,01 \frac{m^2}{kg}$$

Acorde a lo indicado por Molano y Torres (2017), todos los tipos de cemento hidráulicos debe tener un valor mínimo de 280 m<sup>2</sup>/kg como criterio de aceptación, este valor definido en la norma **NTC 121-14** “Especificación de desempeño para cemento hidráulico”. Sin embargo, es importante aclarar que en la actualización de la norma **NTC 121-21** no se establece un valor mínimo de finura como criterio de aceptación, pero si la importancia del reporte de la finura del cemento. El valor de la finura calculado para el cemento empleado en el desarrollo de este trabajo final se encuentra por encima del valor mínimo establecido (100% más). Esta alta finura es un indicativo que el cemento empleado es altamente adicionado teniendo en cuenta que también presenta una baja densidad, como se mencionó previamente.

Cabe resaltar que esta propiedad influye en el calor liberado y la velocidad de hidratación, por lo cual un valor más alto en la finura del cemento genera altas resistencias iniciales, pero con una gran liberación de calor de hidratación (Molano y Torres, 2017; Neville, 1988). Esta conclusión es importante dado que implica la necesidad de realizar un adecuado proceso de curado para evitar problemas de retracción y fisuración en los pañetes.

## 4.1.2 Agregado Fino

### 4.1.2.1 Contenido de Humedad total evaporable

Con el peso seco ( $W_{as}$ ) y el peso húmedo ( $W_{ah}$ ) de las muestras se puede obtener el contenido de humedad total evaporable por medio de la Ecuación 4-4.

$$Ecuación\ 4-4 \quad \%H_a = \frac{W_{ah} - W_{as}}{W_{as}} * 100$$

Los datos obtenidos durante el desarrollo del ensayo y los resultados del contenido total evaporable se encuentran consignados en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3. Resultados humedad natural de la arena de peña

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Peso Recipiente</b>	g	181,4	266,6	187,9
<b>Peso Muestra Húmeda</b>	g	1200	1200	1200
<b>Peso Rec.+ Muestra Seca (1ra medición)</b>	g	1339,1	1417,8	1340,1
<b>Peso Rec.+ Muestra Seca (2da medición)</b>	g	1338,9	1417,3	1340
<b>Diferencias de peso</b>	%	0,01%	0,04%	0,01%
<b>Peso Muestra Seca</b>	g	1157,5	1150,7	1152,1
<b>Humedad total evaporable</b>	%	3,7%	4,3%	4,2%
<b>Promedio</b>	%	4,0%		
<b>C.V.</b>	%	8,01%		

En los resultados presentados se observa que para las tres muestras se verificó que la muestra estuviera completamente seca, dado que la pérdida de masa entre dos mediciones de peso seco no fue mayor al 0,04%; se recalca que la norma **NTC 1776**, indica que la pérdida no debe ser mayor al 0,1%. El contenido de humedad total evaporable promedio de las tres muestras analizadas tiene un valor de 4%. Acorde a lo indicado por Imbachi Huaca et al. (2007), la humedad natural de la arena se encuentra entre el 1-2% del peso del material, sin embargo, en este caso la humedad de la arena de peña se encuentra por encima de este rango de humedad, esto se debe a que la arena se encontraba almacenada en bolsas plásticas, las cuales evitan la evaporación del agua acumulada en el material. En la caracterización realizada por García Carrión (2020) se registra un contenido de humedad total evaporable en la arena de peña de 6,12%.

#### 4.1.2.2 Densidad relativa SSS y % de absorción

La densidad relativa SSS ( $\rho_{a-sss}$ ) se obtiene a partir de la relación entre el peso de la arena y el volumen desplazado, respecto al peso de la arena. Es importante recalcar que el peso de la arena seca ( $W_{as_{dr}} = W_{as_{dr+r}} - W_r$ ) se ve afectado por la relación entre el peso de la arena seca y el peso de la arena en estado SSS, como se puede ver en la Ecuación 4-5.

$$\text{Ecuación 4-5} \quad \rho_{a-sss} = \frac{W_{as,dr} * \left(\frac{W_{as,dr}}{W_{a-sss}}\right)}{L_f - L_i}$$

A continuación, en la Tabla 4-4 se presentan los datos obtenidos durante el desarrollo del ensayo y los resultados de la densidad relativa SSS para las tres muestras:

Tabla 4-4 Resultados densidad relativa SSS de la arena de peña

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Peso arena SSS</b>	g	300	300	300
<b>Peso platón+ Peso arena seca</b>	g	476,5	479,5	470,5
<b>Peso Platón</b>	g	183,6	187,8	177,9
<b>Peso arena Seca</b>	g	292,9	291,7	292,6
<b>Lectura inicial</b>	ml	110	110,7	110
<b>Lectura final</b>	ml	230	234	232
<b>Densidad relativa SSS</b>	g/cm3	2,38	2,30	2,34
<b>Promedio</b>	g/cm3	2,34		
<b>C.V.</b>	%	1,77%		

A partir de los datos relacionados en la Tabla 4-4, se obtiene el % de absorción, dado que corresponde a la relación entre la diferencia de peso de la arena en estado SSS ( $W_{a-sss}$ ) y el peso de la arena seca ( $W_{as,dr}$ ) y el peso de la arena seca ( $W_{as,dr}$ ), como se observa en la Ecuación 4-6.

$$\text{Ecuación 4-6} \quad \% \text{ Absorción} = \frac{W_{a-sss} - W_{as,dr}}{W_{as,dr}}$$

En la Tabla 4-5 se presentan los % de absorción para cada una de las muestras analizadas:

Tabla 4-5. Resultados % de absorción de la arena de peña

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Absorción</b>	%	2,42	2,85	2,53
<b>Promedio</b>	%	2,60		
<b>C.V.</b>	%	8,4%		

De los resultados presentados, se observa que la arena de peña tiene una densidad relativa SSS promedio de 2,34 g/cm<sup>3</sup> y un % de absorción promedio de 2,6%. Al comparar los resultados con los obtenidos por Cubides Torres et al. (2020), se puede apreciar que el porcentaje de absorción obtenido en la arena de peña es menor al obtenido en su

caracterización que fue 2,93% y la densidad relativa SSS también es menor al obtenido en su caracterización que fue de 2,61 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2.3 Granulometría y módulo de finura

Como resultado del proceso del lavado de la arena de peña, se obtiene que en promedio se han perdido 161,73g, que corresponde al material que pasa el tamiz No. 200 y en términos porcentuales equivale al 16,17% de la totalidad de la muestra.

En la Tabla 4-6 se presentan los datos y resultados de esta primera etapa para determinar la granulometría de la arena de peña.

Tabla 4-6. Resultados proceso de lavado de arena de peña

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Peso Seco previo lavado</b>	g	1000	1000	1000
<b>Peso Seco posterior lavado + recipiente</b>	g	1005,8	1013,7	1026,1
<b>Peso recipiente</b>	g	170,2	177	183,6
<b>Peso Seco posterior lavado</b>	g	835,6	836,7	842,5
<b>Pasa No. 200 por lavado</b>	g	164,4	163,3	157,5
<b>Promedio</b>	g	161,73		
<b>C.V.</b>	%	2,3%		
<b>% Pasa tamiz 75 µm (No. 200)</b>	%	16,17%		

En la Tabla 4-7,

Tabla 4-8 y Tabla 4-9 se presentan los datos y resultados obtenidos del proceso de tamizado mecánico del material seco posterior al lavado. Dentro de la información relacionada en las tablas se puede observar que la pérdida de material respecto a la cantidad original no es superior al 0,3% (límite indicado en la norma **NTC 77**), siendo el máximo obtenido para la tercera muestra con un valor de 0,24%. Cabe indicar, que el peso del material que pasa el tamiz No. 200 durante el proceso de lavado (Tabla 4-6) se adicionó al peso del material que quedó retenido en el fondo y en las tablas se presenta el valor total de material que pasa el tamiz No. 200.

Tabla 4-7. Resultados granulometría de la muestra 1 de arena de peña

<b>Muestra 1</b>					
<b>Malla No.</b>	<b>Diámetro apertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>% Retenido Parcial</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa Acumulado</b>
3/8	9,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	4,75	18,1	1,81%	1,81%	98,19%
8	2,36	66,2	6,62%	8,43%	91,57%
16	1,18	61,5	6,15%	14,58%	85,42%
30	0,6	77,3	7,73%	22,31%	77,69%
50	0,3	193,7	19,37%	41,68%	58,32%
100	0,15	296,2	29,62%	71,30%	28,70%
200	0,075	121,4	12,14%	83,44%	16,56%
Pasa 200		165,5	16,55%	99,99%	0,01%
<b>TOTAL</b>		999,9	99,99%		
<b>% Perdida de material</b>		0,01%			
<b>Módulo de finura</b>		2,44			

Tabla 4-8. Resultados granulometría de la muestra 2 de arena de peña

<b>Muestra 2</b>					
<b>Malla No.</b>	<b>Diámetro apertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>% Retenido Parcial</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa Acumulado</b>
3/8	9,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	4,75	14,5	1,45%	1,45%	98,55%
8	2,36	67,2	6,72%	8,17%	91,83%
16	1,18	67,4	6,74%	14,91%	85,09%
30	0,6	79,3	7,93%	22,84%	77,16%
50	0,3	175,5	17,55%	40,39%	59,61%
100	0,15	294,8	29,48%	69,87%	30,13%
200	0,075	136	13,60%	83,47%	16,53%
Pasa 200		164,9	16,49%	99,96%	0,04%
<b>TOTAL</b>		999,6	99,96%		
<b>% Perdida de material</b>		0,04%			
<b>Módulo de finura</b>		2,41			

Tabla 4-9. Resultados granulométría de la muestra 3 de arena de peña

<b>Muestra 3</b>					
<b>Malla No.</b>	<b>Diámetro apertura (mm)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>% Retenido Parcial</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa Acumulado</b>
3/8	9,5	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	4,75	15,2	1,52%	1,52%	98,48%
8	2,36	60,1	6,01%	7,53%	92,47%
16	1,18	64,7	6,47%	14,00%	86,00%
30	0,6	76,7	7,67%	21,67%	78,33%
50	0,3	182,7	18,27%	39,94%	60,06%
100	0,15	297,3	29,73%	69,67%	30,33%
200	0,075	141	14,10%	83,77%	16,23%
Pasa 200		159,9	15,99%	99,76%	0,24%
<b>TOTAL</b>		997,6	99,76%		
<b>% Perdida de material</b>		0,24%			
<b>Módulo de finura</b>		2,38			

El módulo de finura ( $MF$ ) que se presenta en las tablas (Tabla 4-7, Tabla 4-8 y Tabla 4-9) fue obtenido sumando los porcentajes acumulados retenidos de material desde el tamiz No. 4 hasta el tamiz No. 100 (valores sombreados en las tablas) y dividiendo la suma entre 100, como se expresa en la Ecuación 4-7.

$$\text{Ecuación 4-7} \quad MF = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado (No.4+No. 8+No. 16+No. 30+No. 50+No. 100)}}{100}$$

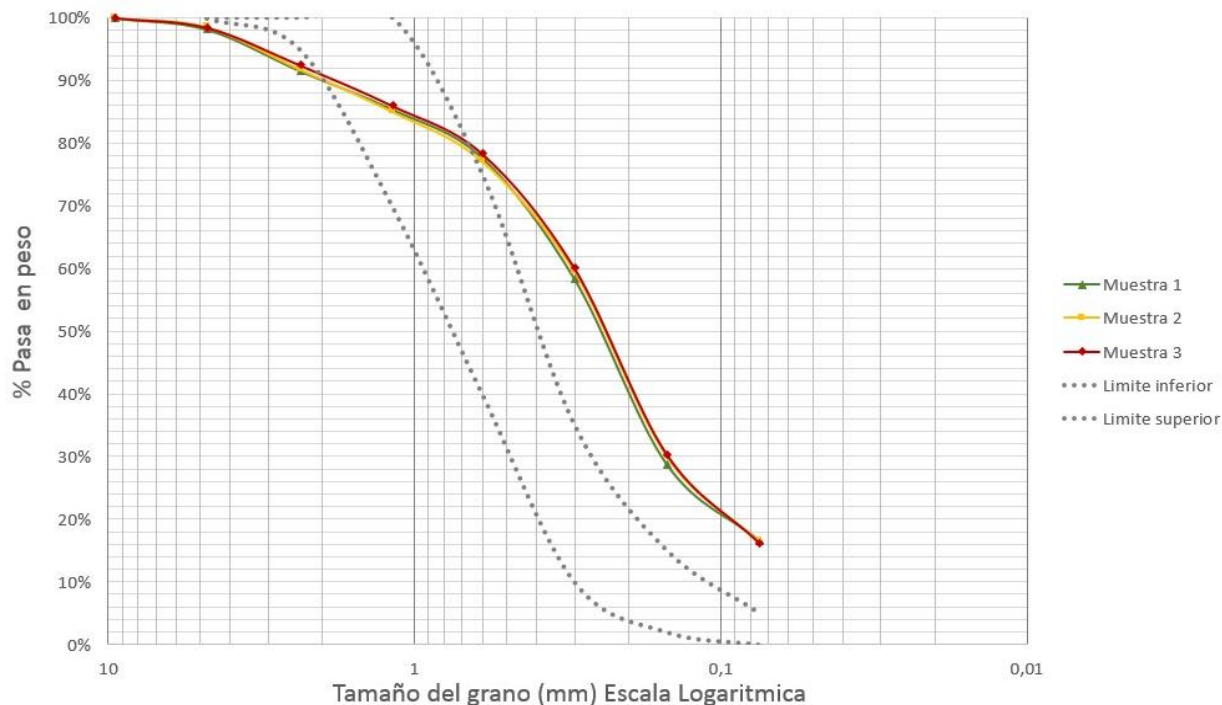
El promedio del módulo de finura obtenido para las muestras ensayadas tiene un valor de 2,41 con un coeficiente de variación C.V% de 1,13%. Acorde a lo indicado por Álvarez Acuña (1999), esta arena de peña se puede clasificar con una arena fina dado que presenta un módulo de finura entre 2.0 y 2.7, esto implica que el agregado fino puede generar una gran demanda adicional de agua.

De manera adicional, a partir de la investigación realizada por Salamanca Correa (1985) y Palomino Rivera (2019), este valor de módulo de finura afectará la resistencia a la compresión del mortero, dado que a menores módulos de finura del agregado fino se obtienen menores valores de resistencia a la compresión.



En la Figura 4-1, se presentan las curvas granulométricas de las muestras de arena de peña, en las cuales se pueden observar que las tres muestras presentan granulometrías similares; de manera adicional en la gráfica se presentan los límites granulométricos (Líneas punteadas de color gris) para una arena natural establecidos por la **NTC 2240 “Agregado para mortero de mampostería”**.

Figura 4-1. Curvas granulométricas arena de peña



En la Figura 4-1, se hace evidente que la arena de peña no cumple con los límites establecidos por la norma, el % de material que pasa los tamices No. 4 y No. 8 se encuentran por debajo del límite inferior mientras que los % de material que pasa los tamices No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200 se encuentra por encima del límite superior establecido. Con el fin de dar mayor claridad a lo explicado anteriormente, se presenta en la Tabla 4-10, los valores numéricos de los límites granulométricos y el promedio de los % que pasan cada uno de los tamices de las tres muestras. Se obtuvo el promedio de las tres muestras para realizar su comparación, teniendo en cuenta que las curvas granulométricas reflejaban que la granulometría para las tres muestras presentaba valores similares.

Tabla 4-10. Límites granulométricos NTC 2240 y valores promedios de % que pasa de la arena de peña

<b>Malla No.</b>	<b>Diámetro abertura (mm)</b>	<b>Límite superior % pasa</b>	<b>Límite Inferior % pasa</b>	<b>Promedio % pasa de la muestra</b>
3/8	9,5			100,00%
4	4,75	100%	100%	98,41%
8	2,36	95%	100%	91,96%
16	1,18	70%	100%	85,50%
30	0,6	40%	75%	77,73%
50	0,3	10%	35%	59,33%
100	0,15	2%	15%	29,72%
200	0,075	0%	5%	16,44%

El promedio de porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 y, por lo tanto, material muy fino que presenta la arena de peña corresponde 16,44%. Este valor refleja que en particular esta arena presenta un valor alto de partículas muy finas (arcillas: tamaño de partícula inferior a 0,002mm y limos: tamaño de partícula entre 0,002 y 0,074mm), lo cual a todas luces va a afectar la resistencia a compresión de los morteros de las juntas y el revestimiento.

Por último, del análisis granulométrico realizado a la arena de peña se establece que el tamaño máximo del agregado corresponde a 9,5mm dado que en el tamiz No. 3/8 permite el paso del 100% del material (Sánchez de Guzmán, 2001); y el tamaño máximo nominal del material ensayado corresponde a 1.18mm dado que corresponde al tamiz inmediatamente superior al tamiz que presenta un porcentaje retenido acumulado del 15% o más (Sánchez de Guzmán, 2001).

A pesar de que la arena de peña adquirida para el desarrollo de este trabajo final no cumple con los valores estipulados por la norma y conociendo las repercusiones que puede tener el uso de este material en las propiedades del mortero, esta se empleó para la construcción de los muros de mampostería y sus respectivos recubrimientos sujeto a tres premisas: Primero como se indicó en la introducción del documento, este trabajo final se ha proyectado para el reforzamiento de vivienda de bajo costo, por lo cual, los muros de mampostería existentes en este tipo de edificaciones no han sido construidos bajo el cumplimiento de las normas existentes. Segundo, el plantear el peor escenario posible para los muros existentes permite evaluar si con el sistema planteado se mejora la resistencia a cortante del muro de mampostería. Tercero, si se compara el costo de la arena de peña (\$120.000/m<sup>3</sup>), la arena de

pozo (\$135.000/m<sup>3</sup>) y la arena de río (\$155.000/m<sup>3</sup>) en el mercado al momento de realizar esta investigación, se evidencia que el costo de la arena de peña es menor.

#### 4.1.2.4 Masa unitaria suelta y compacta

De los datos y resultados obtenidos durante la realización del ensayo y presentados en la Tabla 4-11, se puede definir que la arena de peña empleada en el mortero de pega y el mortero de los recubrimientos cuenta con una masa unitaria suelta promedio de 1388,69kg/m<sup>3</sup> (1,39g/cm<sup>3</sup>) con un %C.V. de 1,10% y una masa unitaria compacta promedio de 1485,98kg/m<sup>3</sup> (1,49g/cm<sup>3</sup>) con un %C.V. de 1,12%.

Tabla 4-11. Resultados masa unitaria suelta y compacta de la arena de peña

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
<b>Volumen molde (V)</b>	m3	0,00283	0,00283	0,00283
<b>Peso molde (T)</b>	Kg	2,71	2,71	2,71
<b>Peso molde + arena suelta (G<sub>s</sub>)</b>	Kg	6,61	6,69	6,63
<b>Peso molde + arena compacta (G<sub>c</sub>)</b>	Kg	6,87	6,96	6,94
<b>Masa Unitaria Suelta (M<sub>s</sub>)</b>	kg/m3	1375,97	1405,65	1384,45
<b>Masa Unitaria Compacta (M<sub>c</sub>)</b>	kg/m3	1467,14	1498,94	1491,87

La masa unitaria suelta (M<sub>s</sub>) se determinó aplicando la Ecuación 4-8.

$$\text{Ecuación 4-8} \quad M_s = \frac{(G_s - T)}{V}$$

Mientras que la masa unitaria compacta (M<sub>c</sub>) se determinó aplicando la Ecuación 4-9.

$$\text{Ecuación 4-9} \quad M_c = \frac{(G_c - T)}{V}$$

### 4.1.3 Unidades de mampostería

#### 4.1.3.1 Tolerancia dimensional (Medición de tamaño y espesores de tabiques y paredes)

Las medidas nominales del bloque No. 5 estándar corresponden a las relacionadas en la Tabla 4-12. En esta misma tabla, se relacionan la diferencia máxima (D<sub>max</sub>) entre las dimensiones

nominales y el promedio resultante del muestreo acorde a la norma **NTC 4205-1**. La diferencia máxima se obtuvo aplicando la Ecuación 4-10.

$$\text{Ecuación 4-10} \quad D_{max} = \pm 0,25\sqrt{\text{Dimensión nominal}} \text{ ó } \pm 2\text{mm, tomado el mayor valor}$$

Por otro lado, también se presenta el recorrido máximo ( $R_{max}$ ) que pueden tener las dimensiones de las unidades de mampostería estructural. Dicho valor se calcula mediante la Ecuación 4-11 y la Ecuación 4-12.

$$\text{Ecuación 4-11} \quad R_{max} = 0,3\sqrt{\text{Dimensión nominal}}; \text{ Para ancho y altura}$$

$$\text{Ecuación 4-12} \quad R_{max} = 0,6\sqrt{\text{Dimensión nominal}}; \text{ Para longitud}$$

Tabla 4-12. Medidas nominales Bloque No. 5

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Dimensión Nominal</b>	<b>Diferencia máxima (<math>D_{max}</math>)</b>	<b>Recorrido máximo (<math>R_{max}</math>)</b>
<b>Ancho</b>	<i>mm</i>	120	3	3
<b>Longitud</b>	<i>mm</i>	300	4	10
<b>Altura</b>	<i>mm</i>	200	4	4

Los datos obtenidos de las dimensiones de las unidades de mampostería se relacionan en el Anexo A: Dimensiones unidades de mampostería, durante este análisis únicamente se presentan los valores promedios, máximos y mínimos obtenidos, que permitan comparar dichos valores frente a los requisitos normativos establecidos en las normas **NTC 4205-1** y **NTC 4205-2**.

Inicialmente se estableció la diferencia que presentan el ancho, longitud y altura promedio de cada una de las unidades seleccionadas respecto a la dimensión nominal; en la Tabla 4-13 se puede observar que en ninguna de las dimensiones promedio de los bloques sobrepasa la diferencia máxima establecida en la Tabla 4-12.

Tabla 4-13. Dimensiones promedio y diferencias de unidades de mampostería

<i>Espécimen</i>	Ancho promedio (mm)	Diferencia Ancho (mm)	Longitud Promedio (mm)	Diferencia Longitud (mm)	Altura Promedio (mm)	Diferencia Altura (mm)
<i>C-UN 1</i>	120,0	0	299,3	1	198,7	1
<i>C-UN 2</i>	122,1	2	298,7	1	203,5	4
<i>C-UN 3</i>	118,5	2	298,5	2	199,1	1
<i>C-UN 4</i>	120,2	0	303,3	3	198,0	2
<i>C-UN 5</i>	120,3	0	303,5	4	198,6	1
<i>C-UN 6</i>	120,2	0	304,2	4	199,9	0
<i>C-UN 7</i>	121,8	2	302,5	3	204,0	4
<i>Ab1</i>	119,7	0	303,2	3	197,9	2
<i>Ab2</i>	122,4	2	300,8	1	202,1	2
<i>Ab3</i>	118,9	1	296,1	4	198,9	1
<i>Ab4</i>	121,7	2	301,7	2	201,9	2
<i>Ab5</i>	120,1	0	300,7	1	198,0	2

Frente al recorrido del ancho y la altura, en la Tabla 4-14 se observa que en los especímenes AB3 y AB5, la diferencia entre el ancho máximo y el ancho mínimo es mayor al recorrido máximo calculado para el ancho de las unidades; y en el espécimen C-UN4 se presenta una diferencia entre la altura máxima y la altura mínima mayor al recorrido máximo calculado para la altura de las unidades.

Tabla 4-14. Ancho máximo y mínimo; altura máxima y mínima y recorridos de unidades

<i>Espécimen</i>	Ancho Max. (mm)	Ancho Min. (mm)	Recorrido Ancho (mm)	Altura Max. (mm)	Altura Min. (mm)	Recorrido Altura (mm)
<i>C-UN 1</i>	121	119	2	200	197	3
<i>C-UN 2</i>	124	121	3	205	202	3
<i>C-UN 3</i>	120	117	3	200	198	2
<i>C-UN 4</i>	121	119	2	201	194	7
<i>C-UN 5</i>	122	119	3	199	198	1
<i>C-UN 6</i>	122	119	3	202	199	3
<i>C-UN 7</i>	123	121	2	205	202	3
<i>Ab1</i>	121	119	2	199	197	2
<i>Ab2</i>	123	120	3	203	201	2
<i>Ab3</i>	121	117	4	200	198	2
<i>Ab4</i>	122	121	1	203	201	2
<i>Ab5</i>	122	118	4	199	197	2

Por otro lado, en la Tabla 4-15 se reportan los recorridos obtenidos para las longitudes de las unidades de mampostería seleccionadas, donde se puede apreciar que todos los valores son

menores al recorrido máximo permitido para esta dimensión acorde a lo estipulado en la **NTC 4205-1**.

Tabla 4-15. Longitud máxima, mínima y recorrido de las unidades de mampostería

<b>Espécimen</b>	<b>Longitud Max. (mm)</b>	<b>Longitud Min. (mm)</b>	<b>Recorrido Longitud (mm)</b>
<b>C-UN 1</b>	300	298	2
<b>C-UN 2</b>	302	297	5
<b>C-UN 3</b>	300	297	3
<b>C-UN 4</b>	306	301	5
<b>C-UN 5</b>	306	302	4
<b>C-UN 6</b>	306	302	4
<b>C-UN 7</b>	304	301	3
<b>Ab1</b>	305	303	2
<b>Ab2</b>	307	297	10
<b>Ab3</b>	298	295	3
<b>Ab4</b>	303	301	2
<b>Ab5</b>	302	299	3

Una vez revisada las dimensiones frente la **NTC 4205-1** para mampostería estructural se hace la revisión frente a la **NTC 4205-2** para mampostería no estructural, en la cual se estipula que las dimensiones pueden variar  $\pm 3\%$  de las medidas nominales especificadas. En la Tabla 4-16 se relacionan las medidas máximas y mínimas del ancho de las unidades seleccionadas con sus respectivas variaciones respecto a las medidas nominales; en ellas se puede observar que la variación máxima presentada corresponde a un 2,97% en la unidad C-UN2, esta variación se encuentra dentro del límite establecido por la norma **NTC 4205-2**.

Tabla 4-16. Ancho máximo, mínimo y variación de las unidades de mampostería.

<b>Espécimen</b>	<b>Ancho Max. (mm)</b>	<b>Variación %</b>	<b>Ancho Min. (mm)</b>	<b>Variación %</b>
<b>C-UN 1</b>	121	0,83%	119	-0,83%
<b>C-UN 2</b>	124	2,97%	121	0,83%
<b>C-UN 3</b>	120	0,00%	117	-2,50%
<b>C-UN 4</b>	121	0,83%	119	-0,83%
<b>C-UN 5</b>	122	1,67%	119	-0,83%
<b>C-UN 6</b>	122	1,67%	119	-0,83%
<b>C-UN 7</b>	123	2,50%	121	0,83%
<b>Ab1</b>	121	0,83%	119	-0,83%
<b>Ab2</b>	123	2,50%	120	0,00%
<b>Ab3</b>	121	0,83%	117	-2,50%
<b>Ab4</b>	122	1,67%	121	0,83%
<b>Ab5</b>	122	1,67%	118	-1,67%

En la Tabla 4-17 se relacionan las medidas máximas y mínimas de la longitud de las unidades seleccionadas con sus respectivas variaciones respecto a las medidas nominales, en ellas se puede observar que la variación máxima presentada corresponde a un 2,33% en la unidad AB2, esta variación se encuentra dentro del límite establecido por la norma **NTC 4205-2**.

Tabla 4-17. Longitud máxima, mínima y variación de las unidades de mampostería

<b>Espécimen</b>	<b>Longitud Max. (mm)</b>	<b>Variación %</b>	<b>Longitud Min. (mm)</b>	<b>Variación %</b>
<b>C-UN 1</b>	300	0,00%	298	-0,67%
<b>C-UN 2</b>	302	0,67%	297	-1,00%
<b>C-UN 3</b>	300	0,00%	297	-1,00%
<b>C-UN 4</b>	306	2,00%	301	0,33%
<b>C-UN 5</b>	306	2,00%	302	0,67%
<b>C-UN 6</b>	306	2,00%	302	0,67%
<b>C-UN 7</b>	304	1,33%	301	0,33%
<b>Ab1</b>	305	1,67%	303	1,00%
<b>Ab2</b>	307	2,33%	297	-1,00%
<b>Ab3</b>	298	-0,67%	295	-1,67%
<b>Ab4</b>	303	1,00%	301	0,33%
<b>Ab5</b>	302	0,67%	299	-0,33%

Por último, en la Tabla 4-18 se relacionan las medidas máximas y mínimas de la altura de las unidades seleccionadas con sus respectivas variaciones respecto a las medidas nominales, en ellas se puede observar que la variación máxima presentada corresponde a un -3% en la unidad C-UN4, esta variación se encuentra en el límite establecido por la norma **NTC 4205-2**.

Tabla 4-18. Altura máxima, mínima y variación de las unidades de mampostería

<b>Espécimen</b>	<b>Altura Max. (mm)</b>	<b>Variación %</b>	<b>Altura Min. (mm)</b>	<b>Variación %</b>
<b>C-UN 1</b>	200	0,00%	197	-1,50%
<b>C-UN 2</b>	205	2,50%	202	1,00%
<b>C-UN 3</b>	200	0,00%	198	-1,00%
<b>C-UN 4</b>	201	0,50%	194	-3,00%
<b>C-UN 5</b>	199	-0,50%	198	-1,00%
<b>C-UN 6</b>	202	1,00%	199	-0,50%
<b>C-UN 7</b>	205	2,50%	202	1,00%
<b>Ab1</b>	199	-0,50%	197	-1,50%
<b>Ab2</b>	203	1,50%	201	0,50%
<b>Ab3</b>	200	0,00%	198	-1,00%
<b>Ab4</b>	203	1,50%	201	0,50%
<b>Ab5</b>	199	-0,50%	197	-1,50%

Respecto a las paredes y tabiques exteriores, la norma **NTC 4205-1** establece que las paredes y tabiques exteriores deben tener un espesor de 16mm. A todas luces, se evidencia en la Tabla 4-19, que los espesores de las paredes y tabiques exteriores no cumple con los espesores mínimos establecidos para mampostería estructural. En la norma **NTC 4205-2** vigente no se exige un espesor mínimo de paredes y tabiques, sin embargo, en su versión anterior indicaba que para mampostería no estructural se debía contar con un espesor mínimo de pared de 10mm y un espesor de tabique de 6mm, medidas que no todas las paredes de las unidades seleccionadas cumplen. Es importante resaltar, que en todas las unidades de mampostería se observó que los tabiques exteriores, tienen un mayor espesor que las paredes.

Tabla 4-19. Espesor de paredes y tabiques exteriores de unidades de mampostería

<b>Espécimen</b>	<b>Pared 1 (mm)</b>	<b>Pared 2 (mm)</b>	<b>Tabique Exterior 1 (mm)</b>	<b>Tabique Exterior 2 (mm)</b>
<b>C-UN 1</b>	11,0	9,5	13,9	11,6
<b>C-UN 2</b>	11,6	11,4	14,5	12,4
<b>C-UN 3</b>	10,0	9,9	13,7	10,7
<b>C-UN 4</b>	10,7	9,4	10,2	13,5
<b>C-UN 5</b>	10,4	9,5	12,9	11,1
<b>Ab1</b>	9,5	9,7	12,3	14,4
<b>Ab2</b>	11,8	10,5	12,1	11,6
<b>Ab3</b>	10,0	10,3	10,8	13,9
<b>Ab4</b>	11,1	10,5	12,1	13,0
<b>Ab5</b>	10,2	10,2	10,6	11,4

Con relación a los tabiques interiores, la **NTC 4205-1** indica que deben tener un espesor mínimo de 12,5mm, pero como se puede apreciar en la Tabla 4-20, los espesores mínimos de los tabiques interiores se encuentran en un rango entre 7 y 8mm.

Tabla 4-20. Espesores mínimos tabiques interiores- Unidades de mampostería.

<b>Espécimen</b>	<b>Tabique min (mm)</b>
<b>C-UN 1</b>	7,04
<b>C-UN 2</b>	7,99
<b>C-UN 3</b>	7,09
<b>C-UN 4</b>	7,52
<b>C-UN 5</b>	7,4
<b>Ab1</b>	8,03
<b>Ab2</b>	8,04
<b>Ab3</b>	7,5
<b>Ab4</b>	7,38
<b>Ab5</b>	7,05



### 4.1.3.2 Porcentaje de absorción de agua por inmersión 24 horas

El porcentaje de absorción de agua por inmersión 24 horas ( $\% A_u$ ) de cada espécimen se calculó aplicando la Ecuación 4-13.

$$\text{Ecuación 4-13} \quad \% A_u = \frac{(W_{u-sss} - W_{u-s}) * 100}{W_{u-s}}$$

A partir de las mediciones realizadas durante el ensayo se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4-21.

Tabla 4-21. Resultados porcentaje de absorción de agua- Unidades de Mampostería.

Espécimen	Peso inicial	Peso Seco $W_{u-s}$	Peso saturado superficialmente seco $W_{u-sss}$	% de Absorción $\% A_u$
	kg	kg	kg	%
<b>Ab1</b>	4,876	4,870	5,402	10,9
<b>Ab2</b>	5,048	5,034	5,792	15,1
<b>Ab3</b>	4,736	4,728	5,256	11,2
<b>Ab4</b>	5,030	5,016	5,762	14,9
<b>Ab5</b>	4,846	4,838	5,356	10,7
<b>Promedio % de Absorción</b>				12,5
<b>C.V. %</b>				17,7%

De este modo, el promedio de absorción de las cinco unidades corresponde a 12,5%, el cual se encuentra por debajo de los límites máximos relacionados en la Tabla 4-22, tanto para mampostería estructural (**NTC 4205-1**) como para mampostería no estructural (**NTC 4205-2**). El porcentaje de absorción que presentan las unidades de manera individual se encuentran entre un 10,7% y un 15,1% cumpliendo con lo especificado tanto en la norma **NTC 4205-2**, como lo establecido **NTC 4205-1** (Tabla 4-22).

Tabla 4-22. Límites máximos de % absorción de las unidades de mampostería

Tipo de Unidad	Norma de referencia	Promedio 5 unidades (%A promedio)	Valores Individuales (%A)
<b>PH- Estructural</b>	NTC 4205-1	13	16
<b>PH- No estructural</b>	NTC 4205-2	17	20

### 4.1.3.3 Resistencia mecánica a la compresión

La resistencia mecánica a la compresión ( $f'_{cu}$ ) fue calculada dividiendo la carga máxima de ruptura ( $C_{max}$ ) entre el área neta de la superficie ( $Au_n$ ), como se muestra en la Ecuación 4-14.

$$\text{Ecuación 4-14} \quad f'_{cu} = \frac{C_{max}}{Au_n}$$

Las unidades de mampostería presentan una resistencia mecánica a la compresión ( $f'_{cu}$ ) entre 2.06MPa y 4.27MPa, como se puede apreciar en la Tabla 4-23; el valor promedio de la resistencia a la compresión de las 7 unidades corresponde a 3.0MPa, con una desviación estándar de 0,87MPa. Las unidades de mampostería que presentan los menores valores de resistencia a la compresión corresponden a las unidades C-UN2 y C-UN7, que como se puede observar en la Figura 4-2, presentaban una coloración más clara, en comparación con las otras unidades ensayadas.

Tabla 4-23. Resistencia mecánica a la compresión- Unidades de Mampostería.

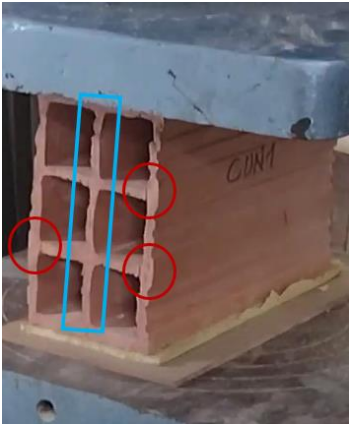



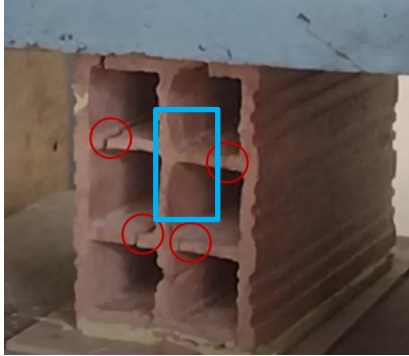
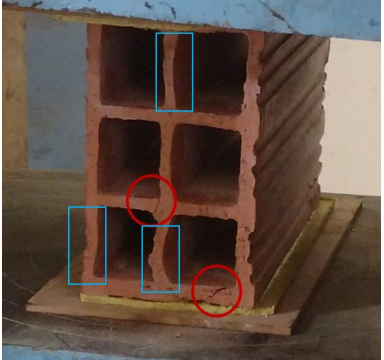
Espécimen	Ancho Prom. $b_{u-prom}$ (mm)	Longitud Prom. $l_{u-prom}$ (mm)	Área neta $Au_n$ (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima $C_{max}$ (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)
<b>C-UN 1</b>	120,0	299,3	35916	153,2	4,27
<b>C-UN 2</b>	122,1	298,7	36471	75,1	2,06
<b>C-UN 3</b>	118,5	298,5	35372	91,2	2,58
<b>C-UN 4</b>	120,2	303,3	36457	84,7	2,32
<b>C-UN 5</b>	120,3	303,5	36511	141,2	3,87
<b>C-UN 6</b>	120,2	304,2	36565	121,5	3,32
<b>C-UN 7</b>	121,8	302,5	36845	82	2,23
<b>Promedio Resistencia a la Compresión</b>				<b>MPa</b>	2,95
<b>C.V.</b>				<b>%</b>	29,6

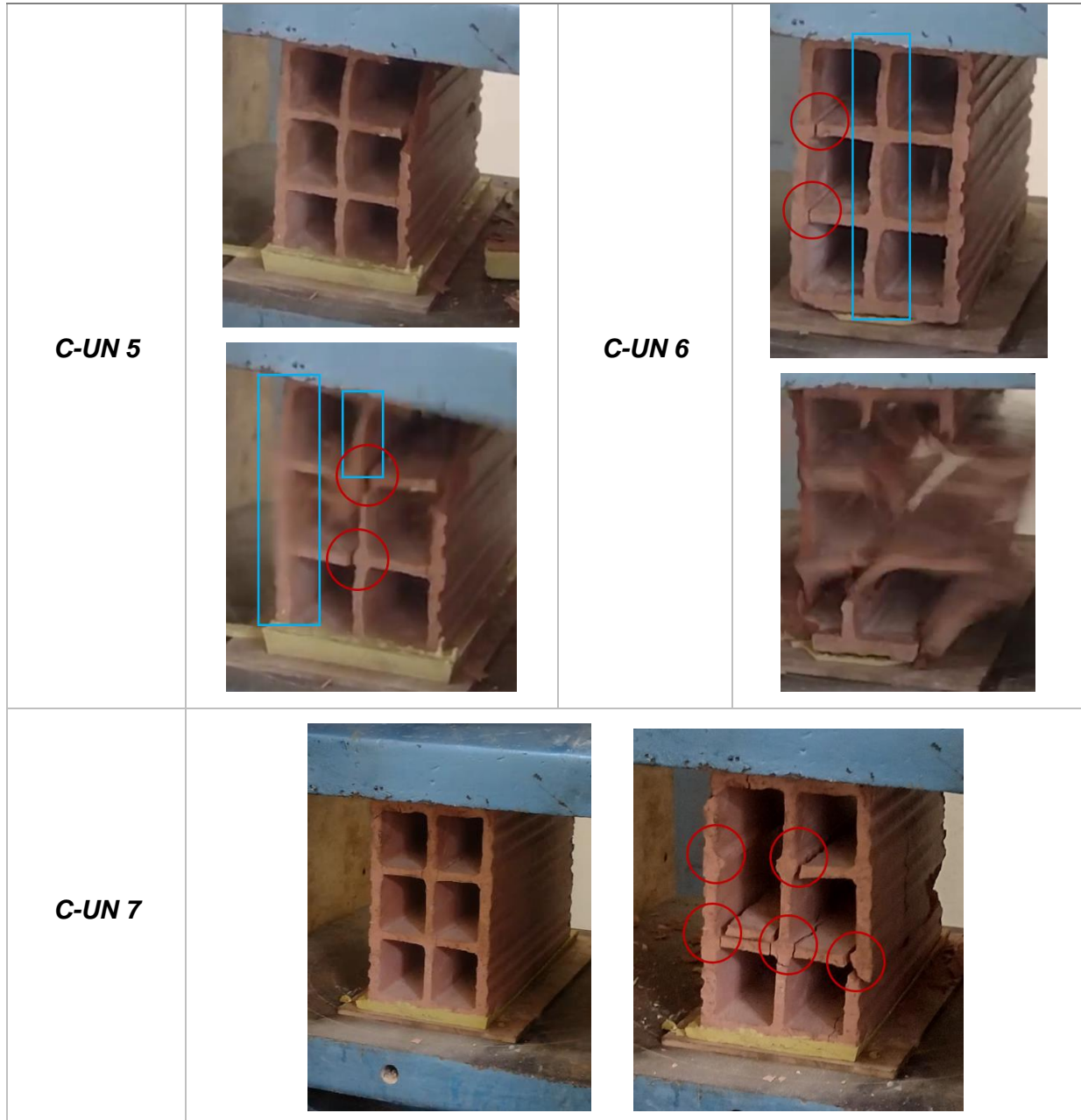
Figura 4-2. Unidades de mampostería sujetas a ensayo a compresión



En la Tabla 4-24 se presenta el registro fotográfico de cada uno de los elementos previo a la falla y al momento de la falla, se puede apreciar que inicialmente los tabiques horizontales empezaron a presentar fisuras en las uniones (Señaladas en color rojo) con las paredes y con los tabiques internos verticales, esto debido al pandeo presentando por estos últimos (Señaladas en color azul). El colapso total del elemento se presenta cuando una de las paredes o el tabique interno vertical falla debido al pandeo presentado.

Tabla 4-24. Registro fotográfico ensayo a compresión unidades de mampostería.

Especimen	Registro fotográfico	Especimen	Registro fotográfico
<p><b>C-UN 1</b></p>		<p><b>C-UN 2</b></p>	
			
<p><b>C-UN 3</b></p>		<p><b>C-UN 4</b></p>	



Frente a los lineamientos normativos respecto a la resistencia mecánica a la compresión que deben cumplir las unidades de mampostería (Relacionados en la Tabla 4-25), se puede apreciar que estas unidades no cumplen con los requisitos establecidos en la **NTC 4205-1**, dado que las unidades C-UN2, C-UN3, C-UN4 y C-UN7 presentan valores individuales de resistencia por debajo de 2,6MPa y el promedio de las unidades se encuentra por debajo de 3,8MPa; sin embargo al evaluar la resistencia a la compresión de las unidades frente a la **NTC**

**4205-2**, se puede observar que todas los bloques presentan una resistencia a la compresión por encima del valor mínimo y su promedio se encuentra en el límite establecido.

*Tabla 4-25. Resistencia Mínima a compresión de unidades de mampostería*

<b>Tipo de Unidad</b>	<b>Norma de referencia</b>	<b>Promedio 5 unidades (MPa)</b>	<b>Valores Individuales (MPa)</b>
<b>PH- Estructural</b>	NTC 4205-1	5	3,5
<b>PH- Estructural *0,75</b>	NTC 4205-1	3,8	2,6
<b>PH- No estructural</b>	NTC 4205-2	3	2

Bajo las mismas premisas presentadas respecto al uso de la arena de peña adquirida para el desarrollo de este trabajo final, se emplean estas unidades de mampostería, teniendo en cuenta que este trabajo final se ha proyectado para el reforzamiento de vivienda de bajo costo, por lo cual, los muros de mampostería existentes en este tipo de edificaciones no han sido construidos bajo el cumplimiento de las normas existentes y el plantear el peor escenario posible, conociendo las debilidades de los materiales base para los muros permite evaluar si con el sistema planteado se mejoran la resistencia a cortante del muro de mampostería.

Del mismo modo, es importante resaltar que, durante la compra de las unidades de mampostería, los depósitos no permiten discriminar los elementos que se compran, algunos de ellos presentan fisuras en las paredes o tenían bordes rotos. Los depósitos venden la totalidad del lote sin discriminar aquellos que evidencia presentan algún tipo de desperfecto.

## **4.1.4 Fibras de fique**

### **4.1.4.1 Caracterización Física**

Las mallas ligeras tienen una separación entre hiladas de 6,5mm a 3,5mm tanto en el sentido X como en el sentido Y, mientras que en las mallas densas tienen separaciones entre hiladas de 4,6mm a 1,5mm. Como se puede observar en la Tabla 4-26, las mallas ligeras en el sentido X tienen una separación promedio de 4,66mm y en el sentido Y tienen una separación de 4,53mm; con un diámetro de las hiladas en sentido X de 1,05mm y en el sentido Y de 0.95mm. Este tipo de malla cuenta con separaciones y diámetros de las hiladas similares en ambos sentidos.

Tabla 4-26. Separación y diámetro de hiladas Malla ligera.

LIGERA	Sy (mm)	Sx (mm)	$\phi_{fy}$ (mm)	$\phi_{fx}$ (mm)
L-1	5.036	4.336	0.995	0.906
L-2	4.671	4.889	1.001	0.926
L-3	4.514	4.809	0.947	0.932
L-4	4.435	4.001	1.124	0.971
L-5	4.632	4.632	1.195	1.024
<b>Promedio</b>	4.66	4.53	1.05	0.95
<b>C.V %</b>	5%	8%	10%	5%

Mientras las mallas densas en el sentido X tienen una separación promedio de 3,45mm y en el sentido Y tienen una separación de 2,50mm (Tabla 4-27). El diámetro de las hiladas en sentido X es de 2,21mm y en el sentido Y es 2.27mm. En este tipo de malla se aprecia que la separación entre hiladas en el sentido X es mayor que en el sentido Y, pero los diámetros de las hiladas son similares en ambos sentidos.

Tabla 4-27. Separación y diámetro de hiladas Malla densa.

Densa	Sy (mm)	Sx (mm)	$\phi_{fy}$ (mm)	$\phi_{fx}$ (mm)
D-1	3.522	2.674	2.264	2.306
D-2	3.232	2.221	2.270	2.362
D-3	3.465	2.532	2.051	2.159
D-4	3.578	2.418	2.178	2.287
D-5	3.433	2.631	2.284	2.220
<b>Promedio</b>	3.45	2.50	2.21	2.27
<b>C.V %</b>	4%	7%	4%	3%

Por otro lado, las mallas ligeras tienen en promedio 1.9 hiladas por cm en el sentido X y en el sentido Y (Tabla 4-28), confirmando que las mallas ligeras tienen separaciones entre hiladas similares en ambos sentidos. Pero las mallas densas tienen en promedio 2.3 hiladas por cm en el sentido X y tienen 1.7 hiladas en el sentido Y (

Tabla 4-29), confirmando que las mallas densas tienen diferente separación entre hiladas entre el sentido X y sentido Y.

Tabla 4-28. Cantidad de hiladas e hiladas por unidad de longitud en sentido X y Y mallas ligeras.

LIGERA	Cantidad hiladas X	Hiladas/cm X	Cantidad hiladas Y	Hiladas/cm Y
L-1	20	2	17	1.7
L-2	20	2	20	2
L-3	17	1.7	20	2
L-4	21	2.1	20	2
L-5	17	1.7	19	1.9
<b>Promedio</b>	19	1.9	19.2	1.9

<b>C.V %</b>	10%	10%	7%	7%
--------------	-----	-----	----	----

Tabla 4-29. Cantidad de hiladas e hiladas por unidad de longitud en sentido X y Y mallas densas.

<b>Densa</b>	<b>Cantidad hiladas X</b>	<b>Hiladas/cm X</b>	<b>Cantidad hiladas Y</b>	<b>Hiladas/cm Y</b>
<b>D-1</b>	24	2.4	17	1.7
<b>D-2</b>	23	2.3	17	1.7
<b>D-3</b>	23	2.3	17	1.7
<b>D-4</b>	23	2.3	17	1.7
<b>D-5</b>	24	2.4	17	1.7
<b>Promedio</b>	23.4	2.34	17	1.7
<b>C.V %</b>	2%	2%	0%	0%

Las mallas ligeras tienen una relación peso/área de  $134 \pm 7,9 \text{ g/m}^2$  con un coeficiente de variación de 5,9%, mientras que las mallas densas tienen una relación peso/área de  $397 \pm 28 \text{ g/m}^2$  con un coeficiente de variación de 7,1% como se puede apreciar en la Tabla 4-30.

Tabla 4-30. Resultados relación peso/área para malla ligera y densa.

<b>Muestra</b>	<b>Lfx prom. (mm)</b>	<b>Lfy prom. (mm)</b>	<b>A<sub>fique</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>W<sub>fique</sub> (g)</b>	<b>W<sub>fique</sub>/A<sub>fique</sub> (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>CV.%</b>
<b>L1</b>	132	125	0.016	2.0	122	134	7.91	5.9%
<b>L2</b>	132	131	0.017	2.3	133			
<b>L3</b>	124	122	0.015	2.0	132			
<b>L4</b>	120	117	0.014	2.0	142			
<b>L5</b>	117	122	0.014	2.0	140			
<b>D1</b>	128	125	0.016	6.9	430	397	28.00	7.1%
<b>D2</b>	128	121	0.016	6.1	393			
<b>D3</b>	128	130	0.017	6.4	385			
<b>D4</b>	133	119	0.016	5.7	359			
<b>D5</b>	118	119	0.014	5.9	418			

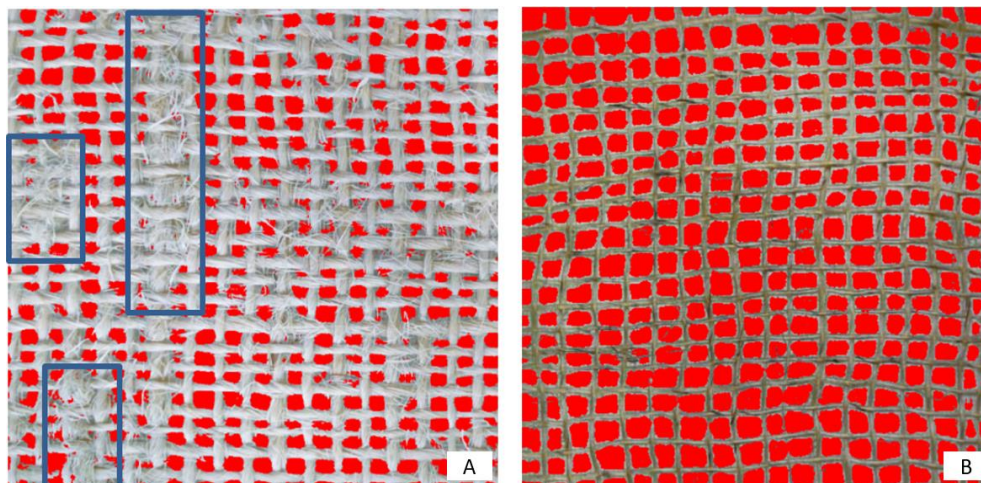
En la Tabla 4-31 se relacionan los valores promedio que registran las características físicas que presentan las mallas de fique. De los valores presentados se puede observar que la separación entre hiladas de las mallas ligeras en el sentido Y es mayor en un 35% de las separaciones de las mallas densas, mientras en el sentido X es mayor en un 82%. Respecto a los diámetros de las hiladas encontramos que las mallas ligeras tienen un diámetro de hilada menor en un 52% a 58% respecto a las hiladas de mallas densas.

Tabla 4-31. Comparación características físicas mallas ligera y densa.

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ligera</b>	<b>Densa</b>
<b>Sy</b>	<b>mm</b>	4,66	3,45
$\phi_{fy}$	<b>mm</b>	1,05	2,21
<b>Hiladas/ longitud Y</b>	<b>Hiladas/cm</b>	1,92	1,70
<b>Sx</b>	<b>mm</b>	4,53	2,50
$\phi_{fx}$	<b>mm</b>	0,95	2,27
<b>Hiladas/ longitud X</b>	<b>Hiladas/cm</b>	1,9	2,34
<b>% de vacíos</b>	<b>%</b>	50,99%	23,14%
$W_{fique}/A_{fique}$	<b>g/m2</b>	134	397

Por otro lado, se observa que el porcentaje de vacíos de la malla ligera es mayor que el doble respecto al porcentaje de vacíos que presenta la malla de fibra densa. En particular esta característica va a afectar la adherencia entre el muro mampostería, la malla de fibra y el mortero de recubrimiento. En la Figura 4-3, se señalan los espacios de vacíos para la muestra de malla de fibra densa D-3 y para la muestra de malla de fibra ligera L-1, lo que hace evidente que al tener una menor cantidad de vacíos con separaciones entre hiladas reducidas en las mallas densas se va a dificultar la conexión entre el mortero de recubrimiento de la primera y la segunda capa y la malla de fique va a generar una barrera que durante la aplicación de la carga va a inducir el desprendimiento del reforzamiento, comportamiento que se va a ver con mayor detalle en el análisis de resultados de los muros reforzados. Cabe anotar, que en la malla densa se presentan nudos en las hiladas que restringe totalmente el paso del mortero de la segunda capa y las fibras que conforman las hiladas presentan hilos sueltos que invaden los espacios vacíos.

Figura 4-3. Espacios vacíos en las mallas de fibra. a). Muestra malla densa D-3, b). Muestra de malla ligera L-1.





En contraste, la malla ligera cuenta con una mayor área de vacíos y una separación entre hiladas mayores se presume va a permitir la conexión entre el mortero de recubrimiento de la primera y la segunda capa, garantizando una adecuada interacción entre los materiales que conforman el reforzamiento.

Por último, la malla ligera tiene un 66% menos de peso por unidad de área en comparación a la malla densa, esto debido a que las hiladas que conforman la malla densa tienen un mayor diámetro y por lo tanto cada hilada está conformada por un mayor número de fibras de fique.

#### **4.1.4.2 Caracterización Mecánica**

Las mediciones realizadas de los diámetros de las hiladas de cada una de las probetas y el cálculo de las áreas se presentan en la memoria de cálculos anexa a este documento y la tabla resumen de las propiedades geométricas de las probetas se puede observar en el anexo 3.

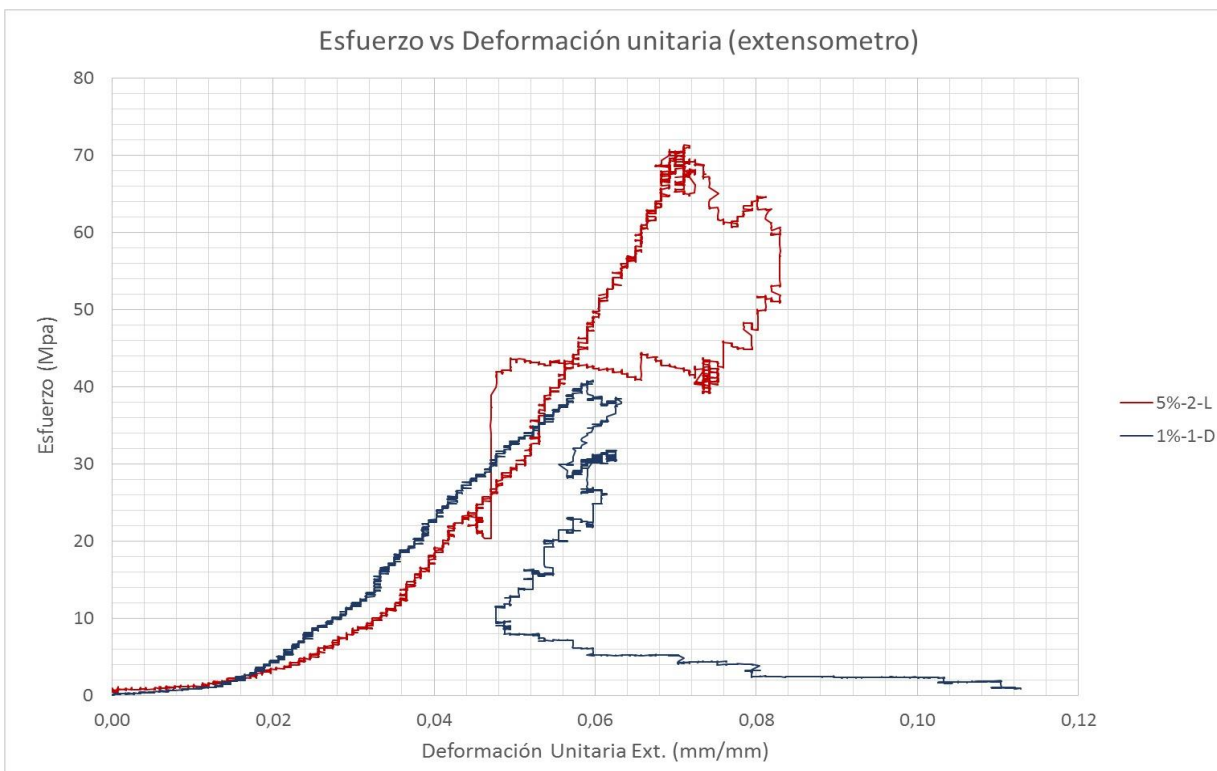
La Tabla 4-32 presenta los promedios de la fuerza de ruptura, la elongación aparente a la fuerza de ruptura, calculados a partir del desplazamiento registrado en el cabezal y la elongación calculada a partir del desplazamiento registrado en el extensómetro para cada conjunto de probetas. Se puede observar que se genera un incremento en la elongación conforme aumenta la concentración del tratamiento. En las mallas densas se genera un incremento del 77% en la elongación aparente (cabezal) y un incremento del 60% en la elongación (extensómetro) entre las mallas sin tratamiento y las mallas con un tratamiento al 7% w/w de NaOH. En las mallas ligeras se genera un incremento del 94% en la elongación aparente (cabezal) y un incremento del 138% en la elongación (extensómetro) entre las mallas sin tratamiento y las mallas con un tratamiento al 7% w/w de NaOH. En la elongación calculada con el extensómetro se registra un valor atípico para las probetas de malla ligera tratadas al 5% w/w, donde se registra un menor valor a la tendencia que presentan las elongaciones aparentes medidas con el cabezal.

Tabla 4-32. Resultados ensayos a tensión muestras de malla de fique Densa y Ligera

Probeta	Fuerza de ruptura (N)	Elongación aparente extensómetro (%)	Elongación aparente cabezal (%)	Variación elongación aparente cabezal vs ext.
0%-D	683	6,29%	8,26%	-24%
1%-D	503	6,39%	8,91%	-28%
3%-D	497	7,32%	10,05%	-27%
5%-D	456	8,74%	12,72%	-31%
7%-D	453	10,11%	14,69%	-31%
0%-L	523	5,91%	8,08%	-27%
1%-L	306	10,68%	9,38%	9%
3%-L	303	12,22%	12,47%	-2%
5%-L	289	9,22%	13,15%	-30%
7%-L	217	14,10%	15,66%	-10%

El 66% de las probetas presentan una diferencia promedio entre las deformaciones del cabezal y las deformaciones del extensómetro del 28%, con un coeficiente de variación (CV%) del 20%. Esta diferencia se atribuye al deslizamiento que pueden sufrir las probetas de las mordazas, que incrementan el desplazamiento que registra el cabezal en comparación con el extensómetro. Cabe resaltar que a partir de las curvas de esfuerzo vs deformación unitaria del extensómetro se observaba que, al sobrepasar el rango elástico, en las probetas 5%-2-L y 1%-1-D, los extensómetros registraban retrocesos en las deformaciones a pesar de incrementar la carga como se puede apreciar en la Figura 4-4. Además, se puede apreciar que en la Figura 4-4, se presentan pequeños incrementos y caídas en las deformaciones que registran los extensómetros, estas oscilaciones en la deformación y carga que resisten las probetas se generan debido a que no todas las fibras fallan al mismo tiempo, por el contrario, las fibras fallan de manera individual. En las deformaciones registradas por los extensómetros se marcan más las oscilaciones debido a que los brazos del extensómetro se encuentran conectados directamente sobre las hiladas de fibra, mientras que la lectura de la deformación del cabezal registra la deformación de la probeta.

Figura 4-4. Retrocesos en las deformaciones registradas en el extensómetro.

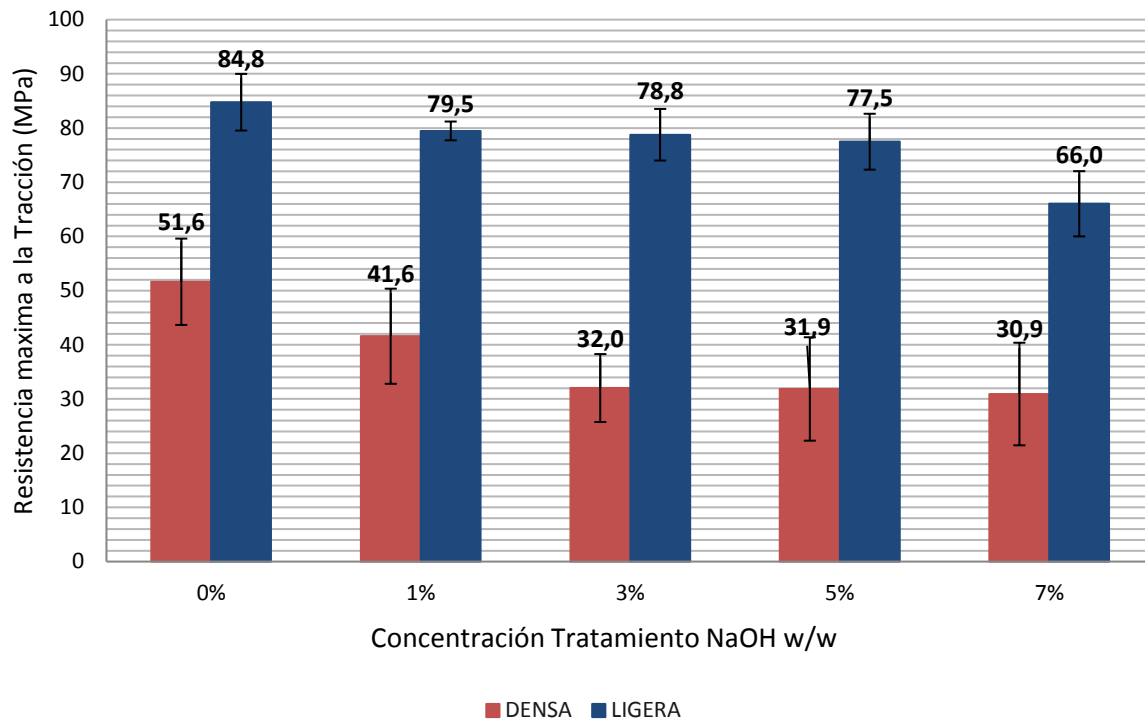


En la Figura 4-5 se aprecia que conforme aumenta la concentración del tratamiento de NaOH w/w disminuye la resistencia a tensión de las mallas densas y ligeras. Las mallas ligeras presentan una reducción del 78% de la resistencia a la tracción entre las mallas no tratadas y las mallas con un tratamiento del 7% w/w de NaOH, mientras que las mallas densas presentan una reducción del 60% de la resistencia a la tracción entre las mallas no tratadas y las mallas con un tratamiento del 7% de NaOH w/w. Esta pérdida de resistencia se puede atribuir a la degradación que sufren la hemicelulosa y lignina durante el tratamiento con NaOH (Moreno Jaraba, 2012), dado que estos biopolímeros contribuyen a fortalecer la pared celular de las fibras y proporcionan soporte a la estructura principal, de manera adicional como se mencionó previamente una concentración excesiva en el tratamiento de las fibras puede reducir de manera excesiva la lignina lo que afecta la resistencia de las fibras (Sullcahuamán et al., 2007).

Cabe resaltar que en la Figura 4-5 se representan las barras de error de los resultados promedios obtenidos para cada tipo de malla y concentración del tratamiento con hidróxido de sodio, a partir de las cuales, se puede apreciar que en las mallas ligeras se traslapan las barras de error en los resultados del esfuerzo máximo a tracción entre las muestras tratadas

al 1%, 3% y 5%, reflejando que no hay significancia estadística en la variación registrada en el esfuerzo máximo a tracción; lo mismo sucede en las mallas densas con las muestras tratadas al 3%, 5% y 7%.

Figura 4-5. Gráfica de Resistencia máxima a la tensión vs Concentración Tratamiento NaOH w/w

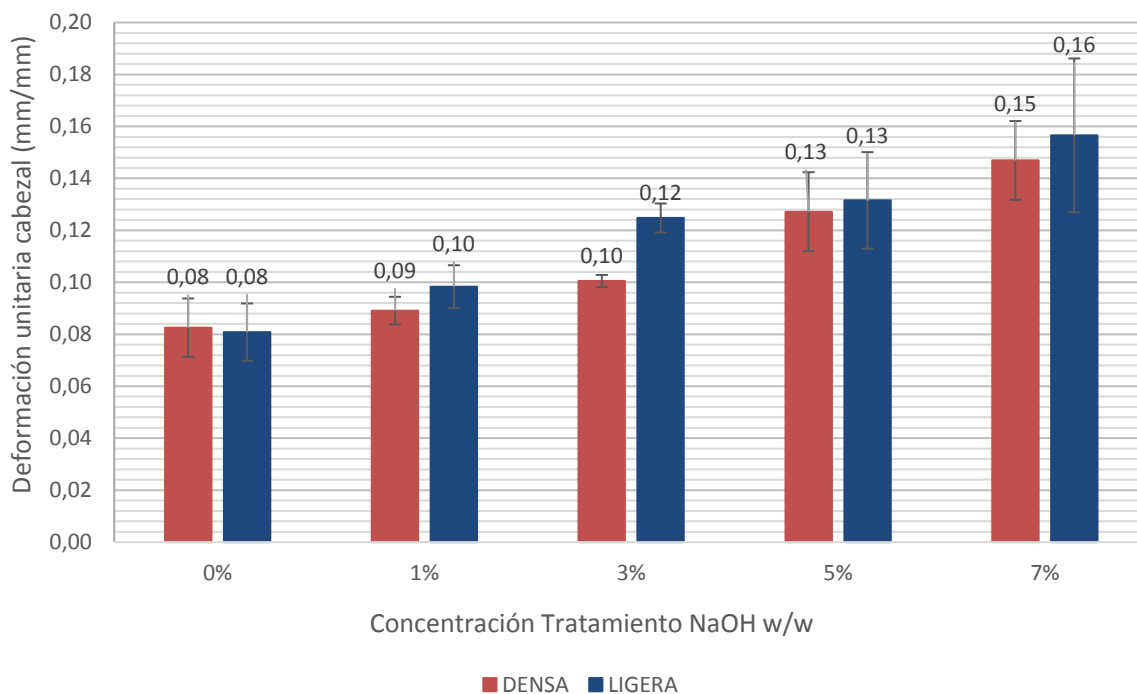


Los resultados de los esfuerzos máximos a tracción reflejan que las mallas ligeras resisten más que las mallas densas, donde la variación en la resistencia de las fibras se puede atribuir a diversos factores como se mencionó en la Tabla 2-7, los cuales se generan en las diferentes etapas de producción, cosecha, extracción y suministro de las fibras, pero dado que no hay una trazabilidad en el proceso de obtención de los costales adquiridos para el reforzamiento de los muros, considero pertinente realizar una investigación más exhaustiva que pueda establecer las causas por las cuales se presenta esta variación, dado que no hace parte del alcance de este trabajo final.

En la Figura 4-6 se relaciona la deformación unitaria obtenida a partir del desplazamiento del cabezal para las mallas densas y ligeras a diferentes concentraciones de tratamiento con NaOH, en ella se puede apreciar que conforme aumenta la concentración del tratamiento con NaOH se registra una mayor deformación unitaria en el material. Las mallas densas sin ningún

tipo de tratamiento presentan una deformación unitaria para la carga máxima de 0,08mm/mm, mientras que con un tratamiento de NaOH al 7% registra una deformación unitaria de 0,15mm/mm, generando un incremento en la deformación del 78%. Las mallas ligeras sin ningún tipo de tratamiento presentan una deformación unitaria de 0,08mm/mm, pero con un tratamiento de NaOH al 7% registran una deformación unitaria de 0,16mm/mm, generando un incremento en la deformación del 94%. Este aumento en la deformación unitaria se puede atribuir a la disminución en la concentración de hemicelulosa lo que genera una reducción en la rigidez de la región interfibrilar, por lo que las fibrillas se reacomodan en la dirección de los esfuerzos de tensión y por lo cual al estar libres tienden a presentar mayor capacidad de deformación, al igual se puede atribuir a la disminución en la concentración de lignina que produce que la región central que une a las células sea más plástica, como se indica en el marco teórico del documento.

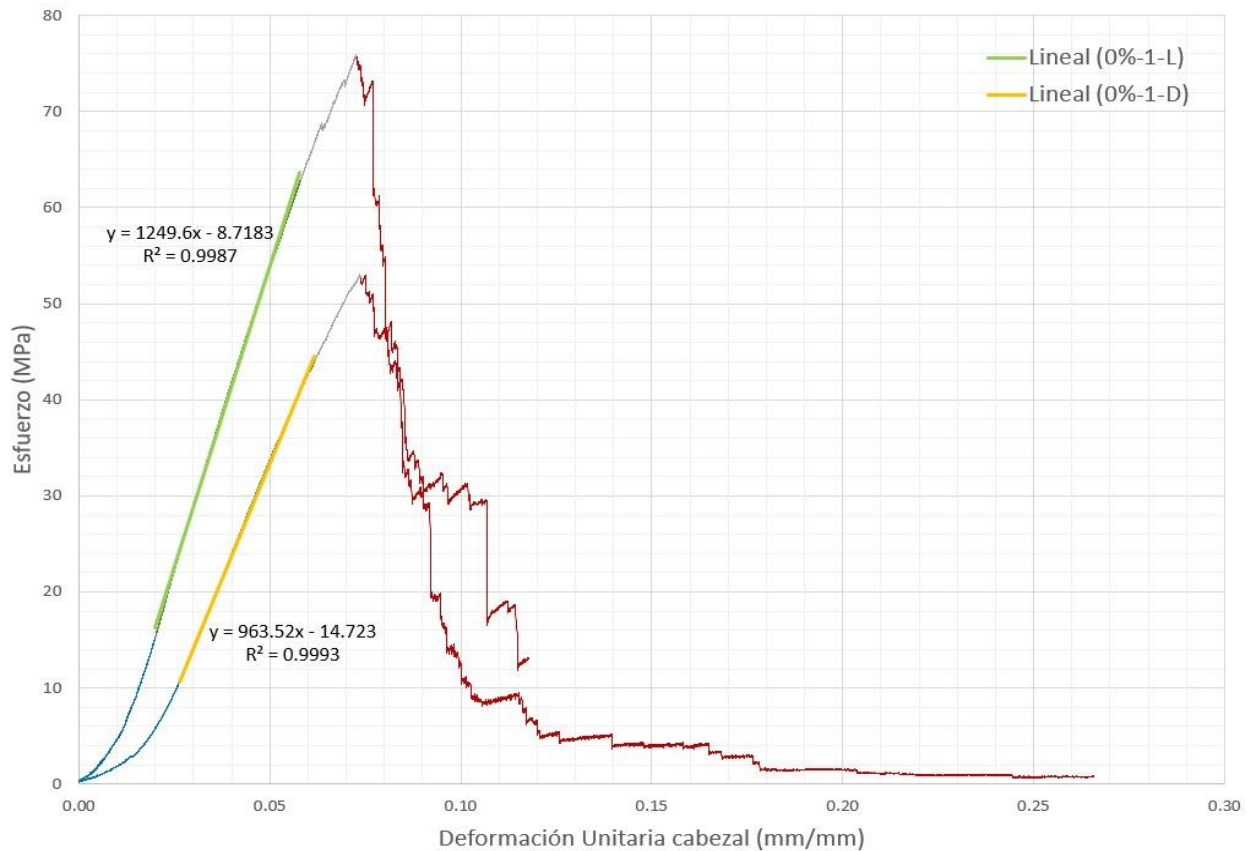
Figura 4-6. Gráfica de deformación unitaria del cabezal vs Concentración Tratamiento NaOH w/w



En las Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11 se presentan las curvas de esfuerzo – deformación unitaria medida a partir del desplazamiento del cabezal, donde se pueden diferenciar cuatro franjas en el comportamiento mecánico de las mallas de fique. En la primera franja (Azul), las gráficas siguen una tendencia horizontal con una baja pendiente, esto se debe a que inicialmente las fibras que componen las hiladas no se encuentran

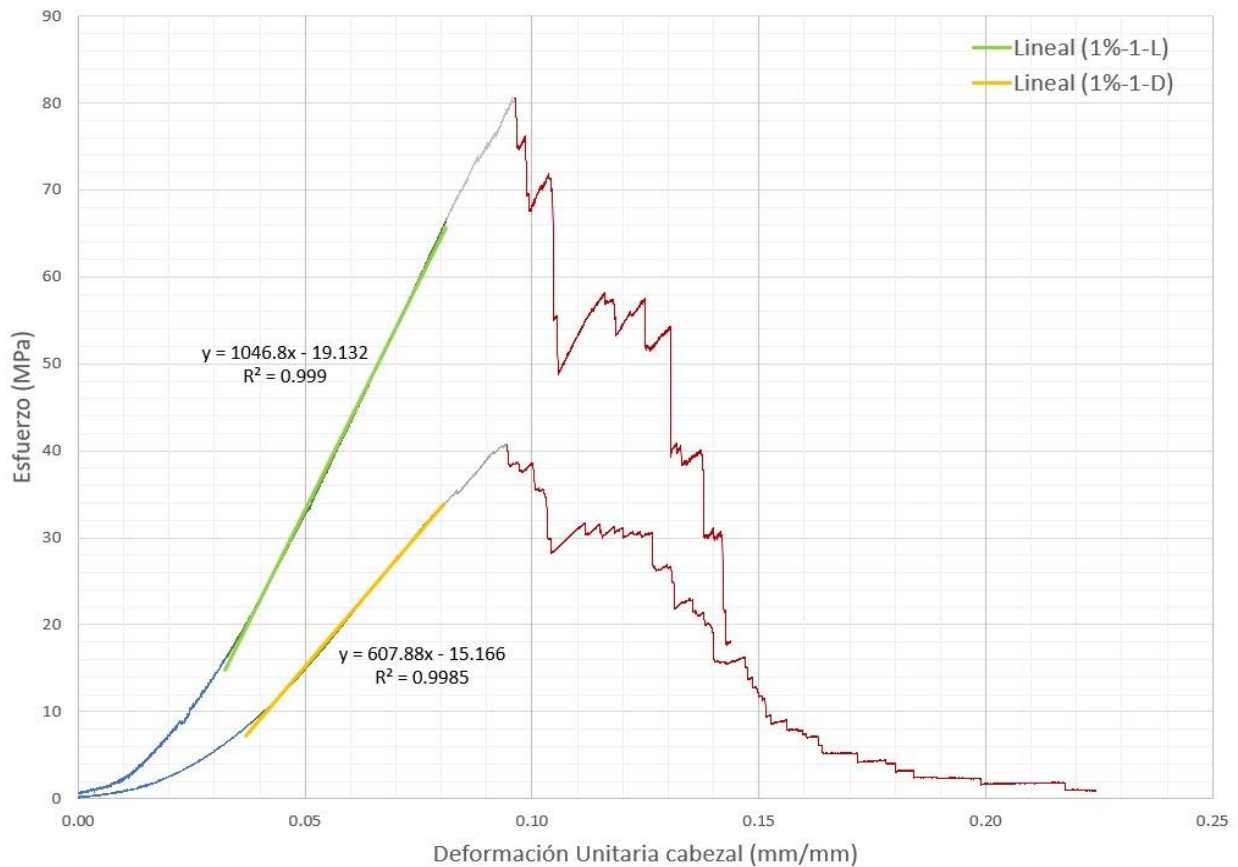
totalmente templadas o alineadas, por lo cual al ser sometidas a cargas reducidas estas tienden a tener una mayor deformación hasta que se encuentran totalmente estiradas y comienzan a resistir la carga de tensión aplicada, un comportamiento similar al reportado en el trabajo realizado por Miranda Rodríguez (2007). Esta deformación inicial es mayor en las fibras con tratamientos del 7% w/w de NaOH tanto para la malla ligera como la malla densa, dado que durante el tratamiento la fibras tienden a encogerse y enrollarse.

Figura 4-7. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 0%-1-D y 0%-1-L



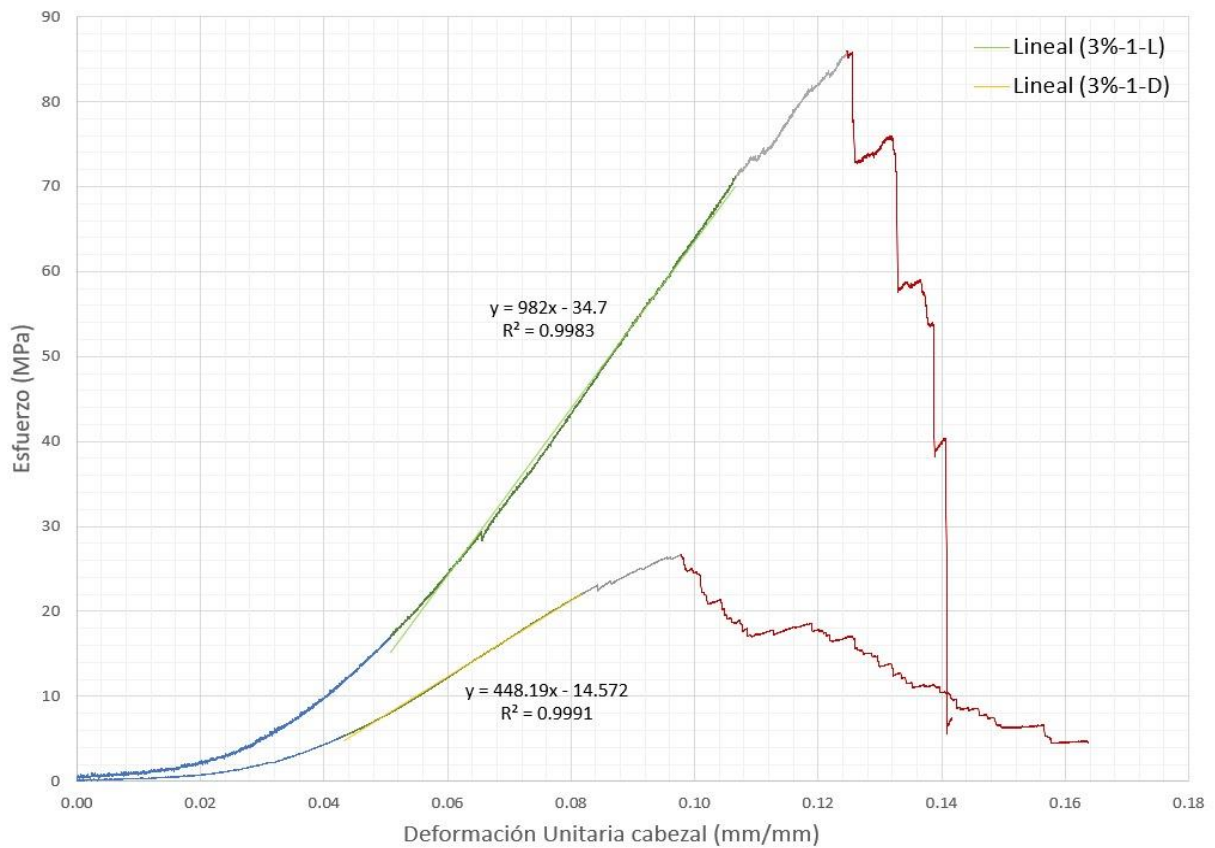
En la segunda franja (Verde) se presenta una tendencia lineal marcando la región elástica del material, la cual se encuentra aproximadamente entre el 20% y 82% del esfuerzo máximo registrado, al realizar la regresión lineal de la línea de tendencia el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es mayor a 0,99.

Figura 4-8. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 1%-1-D y 1%-1-L



En la tercera franja (gris) se presenta aproximadamente entre 82% y el 100% del esfuerzo máximo en el cual tiende a generarse curvatura en la gráfica marcando la zona transición en donde se pierde la linealidad de la curva y la carga máxima; en algunos casos se presentan caídas parciales en la resistencia de la probeta antes de alcanzar la resistencia máxima, estas caídas se presentan por la ruptura de algunas fibras que componen las hiladas.

Figura 4-9. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 3%-1-D y 3%-1-L



La cuarta franja (rojo) inicia después de alcanzar la resistencia máxima en donde se evidencia una caída de resistencia escalonada, conforme se genera una falla progresiva de las fibras que conforman las hiladas de la probeta. Se puede apreciar que se generan recuperaciones parciales de la capacidad de carga sin alcanzar la carga máxima, hasta que más fibras alcanzan la falla y se presenta una nueva disminución en la resistencia. Así conforme aumenta la cantidad de fibras que presentan ruptura, se genera una disminución progresiva de la resistencia.



Figura 4-10. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 5%-1-D y 5%-1-L

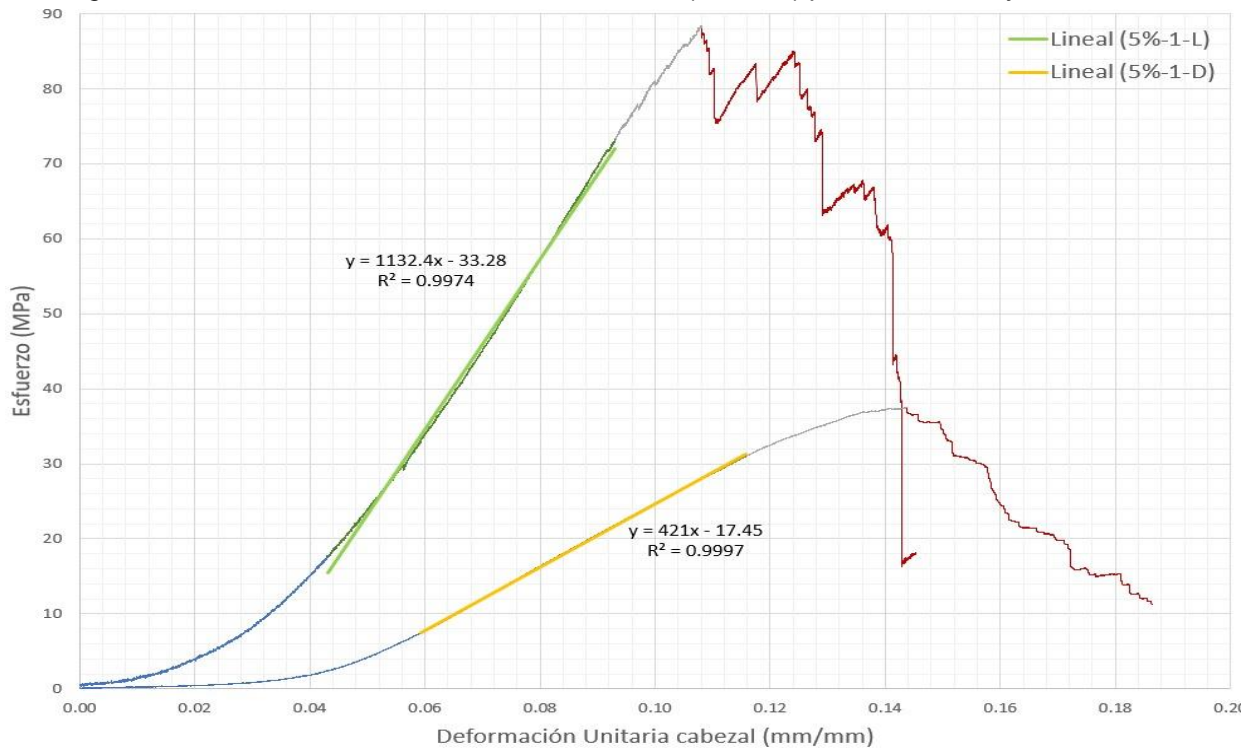
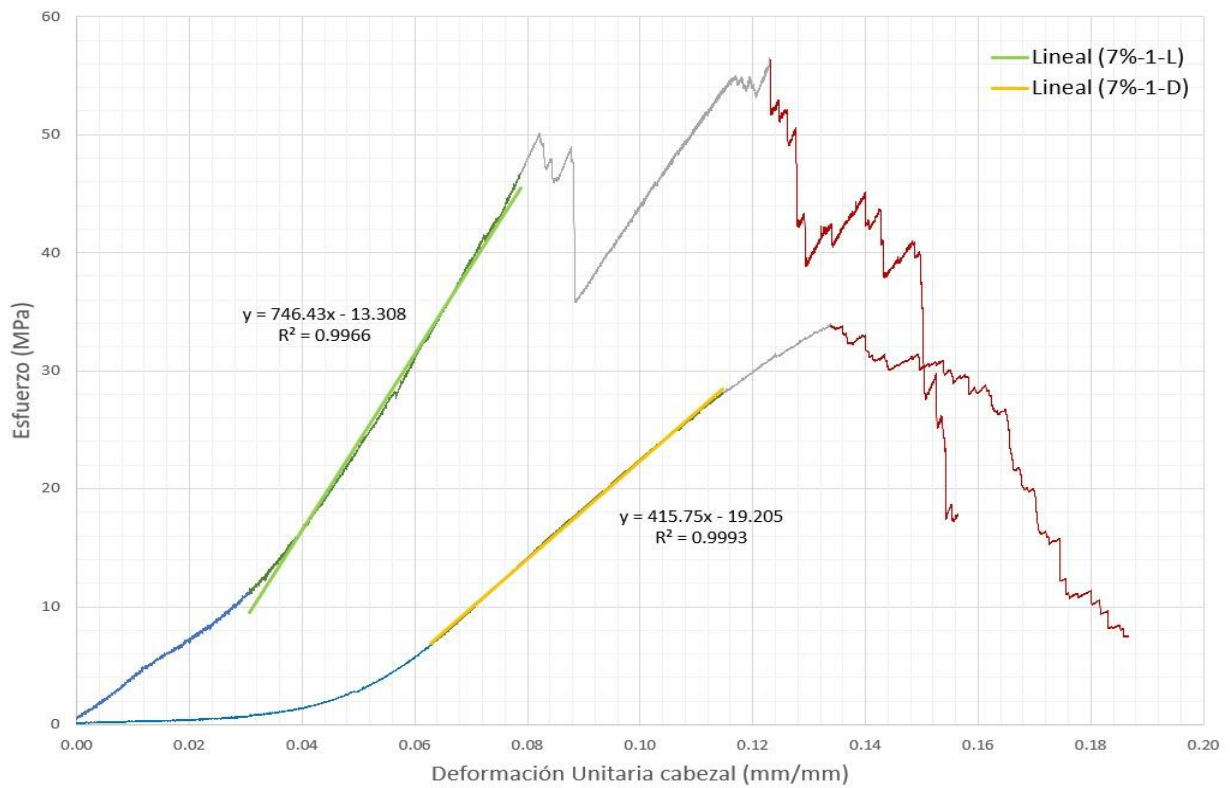
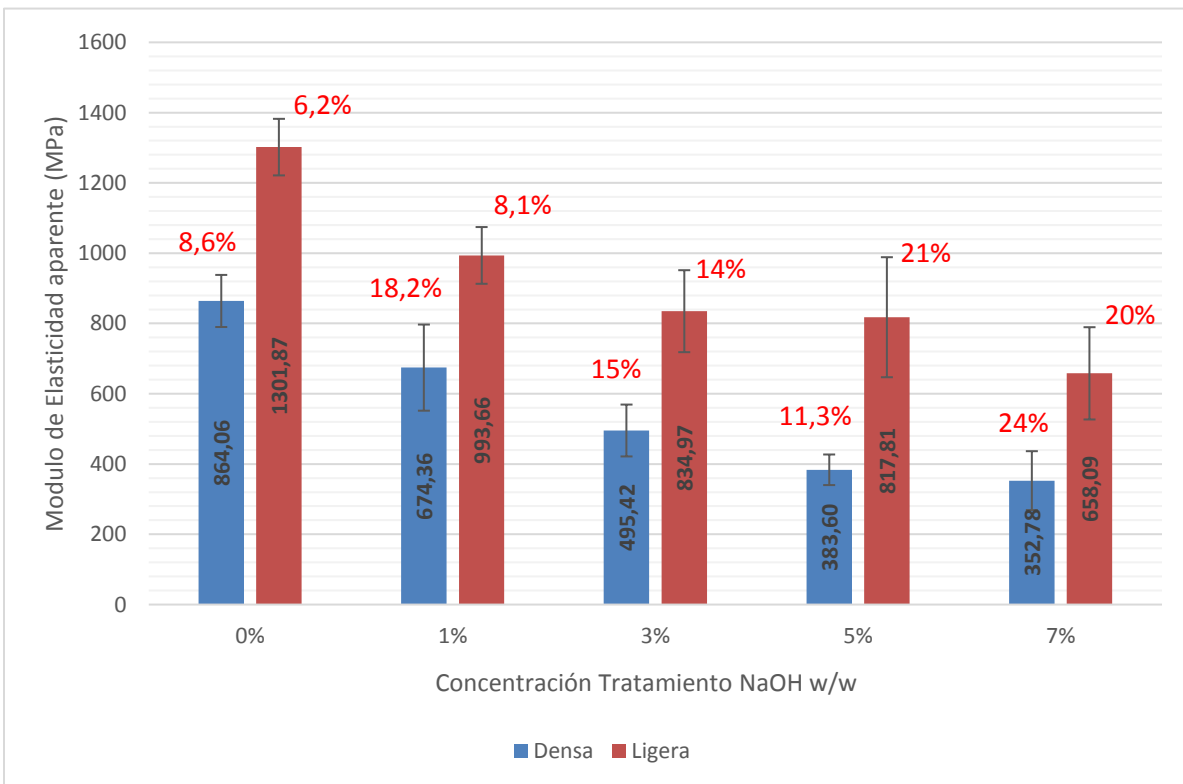


Figura 4-11. Curva esfuerzo vs deformación unitaria (Cabezal) probeta 7%-1-D y 7%-1-L



En la Figura 4-12 se presentan los módulos de elasticidad aparentes de las probetas calculados a partir de los desplazamientos registrados por el cabezal. Las probetas de las mallas sin tratamiento tienen una mayor rigidez a la que presentan las probetas de las mallas que han sido sometidas a un tratamiento alcalino, generando una reducción en el módulo de elasticidad entre las mallas sin tratamiento y las mallas con un tratamiento del 7% NaOH w/w del 51% en las mallas ligeras y del 41% en las mallas densas. El coeficiente de variación (De color rojo) en cada conjunto de muestras no supera el 30% por lo cual, se puede indicar que los promedios de los módulos de elasticidad aparentes son representativos del conjunto de datos de cada muestra.

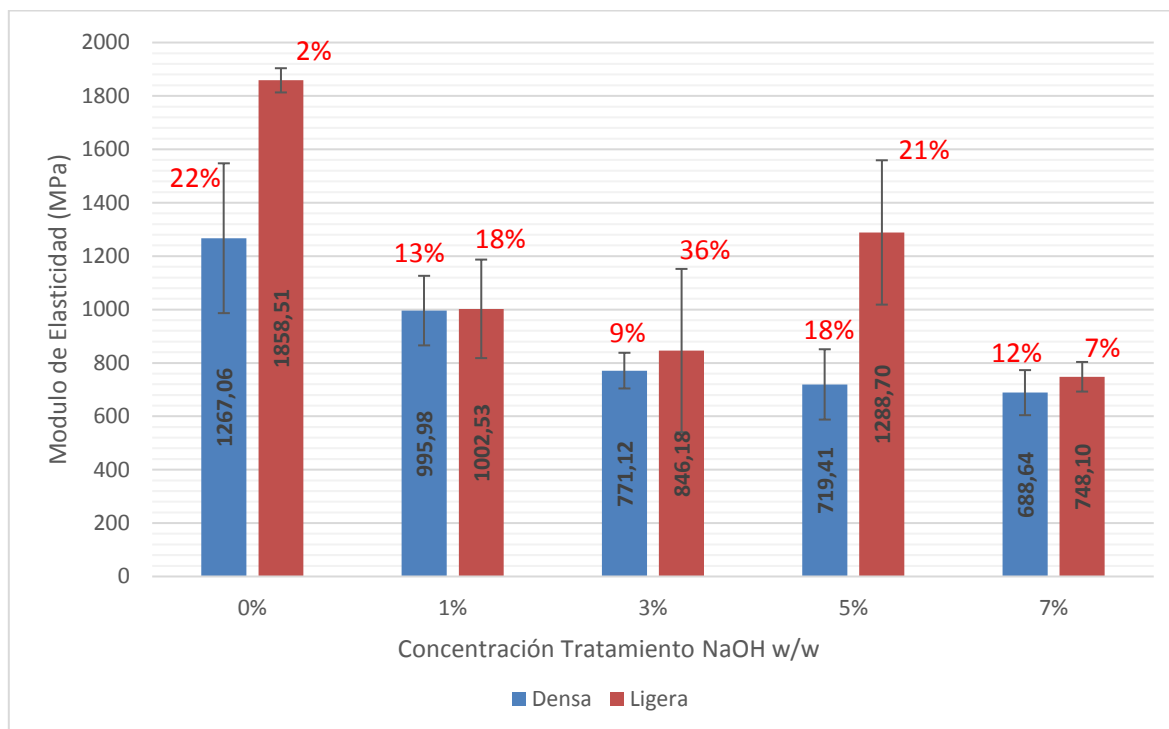
Figura 4-12. Módulo de elasticidad aparente vs Concentración tratamiento NaOH w/w (Cabezal)



Ahora bien, los módulos de elasticidad de las probetas de malla ligera calculados a partir de los desplazamientos registrados por el extensómetro registran un resultado atípico que corresponde al módulo de elasticidad promedio obtenido para las muestras tratadas al 5% w/w de NaOH, dado que se obtuvo un mayor módulo de elasticidad en comparación con los módulos obtenidos para las muestras tratadas al 1% y 3% w/w de NaOH (Figura 4-13), lo cual refleja que se generaron errores en medición de los desplazamientos registrados por el

extensómetro en estas probetas, dado que este comportamiento atípico no se presenta en los desplazamientos registrados por el cabezal. De igual modo se registra un coeficiente de variación mayor al 30% en los resultados obtenidos para las probetas de las mallas ligeras tratadas al 3% w/w de NaOH. Bajo este panorama considero que en futuras investigaciones se debe considerar evaluar el uso de extensómetros de video sin contacto u otras alternativas para sujetar los brazos del extensómetro para la medición de las deformaciones en este tipo de material.

Figura 4-13 Módulo de elasticidad vs Concentración tratamiento NaOH w/w (Extensómetro)



En la Tabla 4-33 se presenta el registro fotográfico de las fallas generadas en las muestras de malla de fique sin tratamiento y tratadas a diferentes concentraciones de NaOH. La falla en la mayoría de las hiladas que conformaban las probetas se genera en el tercio medio de la longitud libre entre lengüetas, sin embargo, no todas las hiladas que conforman la probeta fallan en la misma localización, esto se debe a que el diámetro de la hilada no es constante y pueden generarse segmentos al interior de la hilada con una menor capacidad de carga donde se va a iniciar y generar la falla. Cabe resaltar que, durante el ensayo, se puede escuchar como las fibras van fallando de manera individual conforme cada una alcanza su capacidad máxima de carga (Se anexan a este documento los videos del desarrollo del ensayo a tensión de cada una de las probetas).

Se evidenció que el uso de lengüetas evitó que se generara deslizamiento y/o desgarre en las probetas. Siguiendo el criterio de la norma **ASTM D5035** no se descarta ninguno de los resultados obtenidos de esfuerzos máximos a tensión en las muestras dado que la ruptura en las probetas no se presentó dentro de los 5mm aledaños al borde de las mordazas, ni se presentaron resultados por debajo del 50% del promedio de las resistencias dentro de un mismo conjunto de muestras.

Tabla 4-33. Falla a tensión de probetas de malla de fique

% NaOH (w/w)	<i>Malla Ligera</i>	<i>Malla Densa</i>
0%		
1%		
3%		



A partir de los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de las mallas de fique a diferentes concentraciones de tratamiento con NaOH, la información obtenida de la recopilación bibliográfica respecto al tratamiento de fibras de fique con NaOH y en particular por las condiciones de seguridad requeridas durante el tratamiento de las mallas de fique para el reforzamiento de los muros de mampostería, se establece emplear para el tratamiento de las mallas de fique una concentración del 3% w/w de NaOH. Frente a esta última consideración, es importante señalar que el volumen de mallas de fique requerido para el reforzamiento de los muros de mampostería es mucho mayor que el volumen de malla empleado durante esta caracterización, por lo cual se requiere emplear un volumen mayor de solución, lo que a su vez se traduce en el uso de una mayor cantidad de NaOH, que en concentraciones del 5% y 7% w/w durante el tratamiento de las muestras de prueba produjo gases y calor en la reacción.

### 4.1.5 Mortero de pega y de recubrimiento

La fluidez del mortero de pega, las mezclas de prueba y el mortero de recubrimiento fue calculada a partir de la relación entre el promedio de las 4 lecturas denominado ( $A_f$ ) y el diámetro interno de la base del molde ( $D_{int}$ ) aplicando la Ecuación 4-15.

$$\text{Ecuación 4-15} \quad \%fluidez = \left( \frac{A_f}{D_{int}} \right) * 100$$

Donde el diámetro de la base del molde corresponde a 102mm.

Mientras que la resistencia a la compresión del mortero ( $f_{cm}$ ) se calcula a partir de la relación entre la carga máxima ( $P_{max}$ ) y el área de la superficie de los cubos de ensayo ( $A_{rc}$ ), como se puede observar en la Ecuación 4-16.

$$\text{Ecuación 4-16} \quad f_{cm} = \frac{P}{A_{rc}}$$

#### 4.1.5.1 Mortero de pega

En la Tabla 4-34 se relacionan los resultados de fluidez y el promedio de resistencia a la compresión de las muestras del mortero de pega empleado durante la construcción de muros para el ensayo de tracción diagonal. De los resultados obtenidos se puede apreciar que tienen un promedio de resistencia a la compresión de 6.29 MPa y una fluidez de 118.14%, El valor de fluidez se encuentra dentro del rango para un mortero plástico, pero el valor de resistencia a la compresión está por debajo del valor mínimo establecido por la norma NSR-10 título D, para un mortero tipo N.

Tabla 4-34. Resultados de fluidez y resistencia a la compresión de mortero de pega.

<b>Muestra</b>	<b>Fluidez (%)</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>
<b>MP-1</b>	134%	5.69
<b>MP-2</b>	100%	7.49
<b>MP-3</b>	120%	5.70
<b>Promedio</b>	118%	6.29
<b>C.V. (%)</b>	14,39%	16,44%

Este deficiente comportamiento mecánico del mortero de pega se ve atribuido a la alta relación A/C, la cual puede ser generada por el alto contenido de finos en la arena de peña empleada, dado que los finos van a absorber una mayor cantidad de agua. Como resultado de este valor de resistencia se evidencia la necesidad de reducir la relación cemento: arena, para el mortero empleado para el recubrimiento, dado que como expresa Salamanca Correa (1985), conforme la mezcla de mortero sea más rica en cemento, se genera un aumento en su resistencia a la compresión, donde dicho incremento será de forma exponencial. A partir de este resultado se espera que el modo de falla predominante en los muros de mampostería sin ningún tipo de refuerzo sea por deslizamiento por cortante generándose un agrietamiento escalonado en el elemento.

#### 4.1.5.2 Mortero de recubrimiento

##### 4.1.5.2.1 Mezclas de prueba

Mediante los ensayos de fluidez se estableció la relación agua/cemento que permitía obtener una mezcla en el rango plástico para cada una de las dosificaciones evaluadas:

Tabla 4-35. Resultados de ensayos de fluidez en mezclas de prueba

<b>Relación Cemento: Arena</b>	<b>Relación Agua/Cemento</b>	<b>Fluidez</b>
1:2	0,60	71%
	0,70	112%
1:2,5	0,60	85%
	0,75	107%
	0,80	116%
1:3	0,80	93%
	0,90	109%

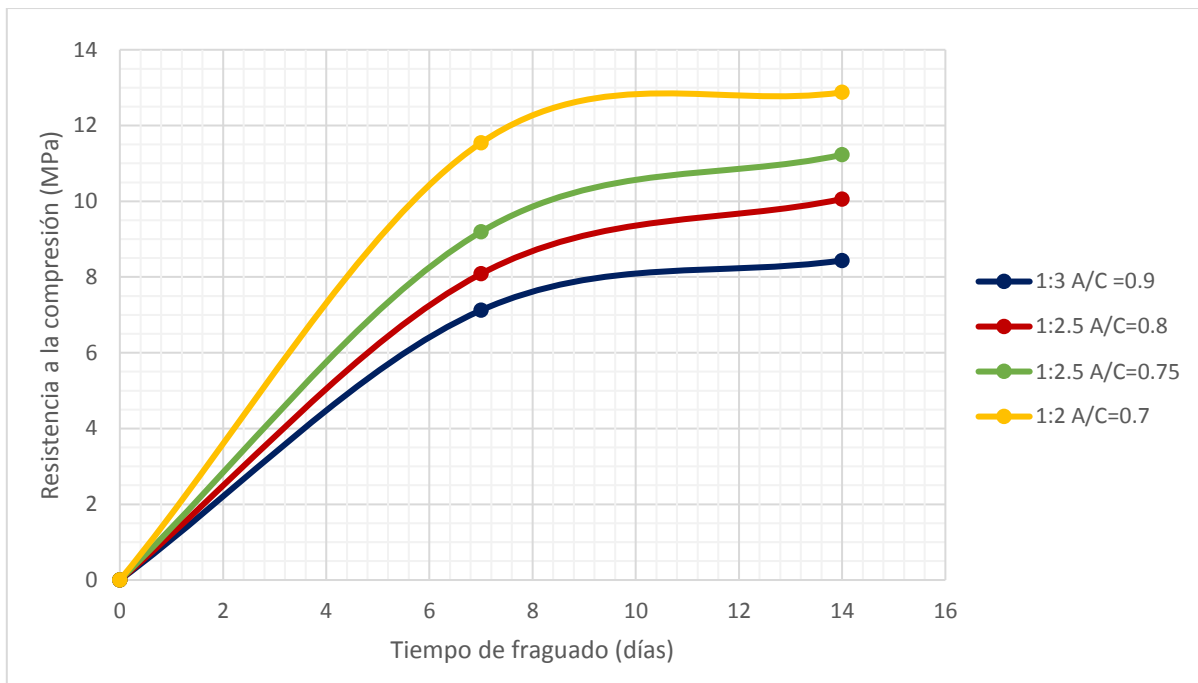
En la Tabla 4-36, se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días y 14 días, de las dosificaciones que fueron establecidas a partir de los ensayos de fluidez, en ella se puede observar que solamente dos dosificaciones de mezcla habían alcanzado el 70% de la resistencia a la compresión esperada a los 7 días y estas mismas mezclas habían alcanzado el 90% de la resistencia esperada a los 14 días.

Tabla 4-36. Resultados de resistencia a la compresión de mezclas de prueba a los 7 días y 14 días

Resistencia a la compresión (MPa)				
Mezcla mortero	7 días	% resistencia esperada	14 días	% resistencia esperada
1:3 A/C =0.9	7,12	57%	8,44	68%
1:2.5 A/C=0.8	8,08	65%	10,06	80%
1:2.5 A/C=0.75	9,19	74%	11,23	90%
1:2 A/C=0.7	11,54	92%	12,88	103%

Como se puede apreciar en la Figura 4-14, el incremento de la resistencia a la compresión presenta una tendencia logarítmica, por lo que se proyecta que solamente las mezclas con dosificaciones 1:2.5 A/C=0,75 y 1:2 A/C=0.7 alcancen la resistencia a la compresión requerida de 12,5MPa.

Figura 4-14. Grafica de resistencia a la compresión vs tiempo de fraguado



Ahora bien, la mezcla con una relación 1:2, va a generar mayor calor de hidratación y aumentará el riesgo de contracción y por ende de presentar fisuración durante el tiempo de fraguado, además incrementa el costo del reforzamiento del muro dado que es necesario incrementar la cantidad de cemento adicionado a la mezcla, por esta razón la dosificación



seleccionada para el mortero de recubrimiento fue una relación cemento-arena de 1:2.5 con una relación A/C de 0,75.

#### 4.1.5.2.2 Recubrimiento muros de ensayo

En la Tabla 4-37 se presentan los resultados de fluidez y resistencia a la compresión de las muestras del mortero empleado para el recubrimiento de los muros de ensayo. La resistencia a compresión promedio de las muestras se encuentra por encima del valor mínimo requerido por la norma para los morteros de recubrimiento y la fluidez se encuentra dentro del rango de un mortero plástico.

Tabla 4-37. Resultados de fluidez y resistencia a la compresión de mortero de recubrimiento

<b>Muestras mortero de recubrimiento</b>	<b>Fluidez</b>	<b>Resistencia Compresión (MPa)</b>
MR-1	122%	13,77
MR-2	112%	14,48
MR-3	112%	14,68
MR-4	136%	12,14
<b>Promedio</b>	<b>115%</b>	<b>14,31</b>
<b>C.V. (%)</b>	<b>9,91%</b>	<b>8,06%</b>

## 4.2 Muros a tracción diagonal

A partir de los datos recopilados durante la medición de las celdas se obtuvo el área total de vacíos ( $AT_V$ ) que presenta la sección del muro sobre la línea de acción de la carga aplicando la Ecuación 4-17, Ecuación 4-18 y Ecuación 4-19.

$$\text{Ecuación 4-17} \quad A_{Vc1} = a_{Cprom1} * h_{Cprom1}; A_{Vc2} = a_{Cprom2} * h_{Cprom2}$$

$$\text{Ecuación 4-18} \quad AT_{Vc1} = 10 * A_{Vc1}; AT_{Vc2} = 10 * A_{Vc2}$$

$$\text{Ecuación 4-19} \quad AT_V = AT_{Vc1} + AT_{Vc2}$$

Donde,  $A_{Vc1}$  corresponde al área promedio de una celda de la columna 1,  $A_{Vc2}$  corresponde al área promedio de una celda de la columna 2,  $AT_{Vc1}$  es el área total de vacíos en la columna 1 y  $AT_{Vc2}$  es el área total de vacíos en la columna 2. Las mediciones y cálculos realizados para determinar el área total de vacíos de cada muro se pueden observar en el archivo de cálculo anexo a este documento.

Con las dimensiones promedio del muro ( $h_{mt Prom}$ ,  $b_{mt Prom}$ ,  $l_{mt Prom}$ ) y el área total de vacíos ( $AT_V$ ) se calculó el porcentaje de área bruta que es sólida ( $n$ ) y el área neta de los especímenes ( $An_{mt}$ ), aplicando la Ecuación 4-20 y Ecuación 4-21.

$$\text{Ecuación 4-20} \quad n = 1 - \frac{AT_V}{h_{mt Prom} * b_{mt Prom}}$$

$$\text{Ecuación 4-21} \quad An_{mt} = \left( \frac{l_{mt Prom} * h_{mt Prom}}{2} \right) * b_{mt Prom} * n$$

El área neta ( $An_{mt}$ ) corresponde al área de la sección del muro sobre la cual se encuentra la línea de acción de la carga a compresión aplicada durante el ensayo de tracción diagonal. En la Tabla 4-38 se presentan la altura ( $h_{mt Prom}$ ), longitud ( $l_{mt Prom}$ ), espesor ( $b_{mt Prom}$ ) promedio, área total de vacíos ( $AT_V$ ), el porcentaje del área bruta y el área neta ( $An_{mt}$ ) de cada uno de los especímenes de prueba.

Tabla 4-38. Caracterización física de los muros de prueba a tracción diagonal

<b>Especímen</b>	<b><math>h_{mt Prom}</math> (mm)</b>	<b><math>b_{mt Prom}</math> (mm)</b>	<b><math>AT_V</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>n</math></b>	<b><math>l_{mt Prom}</math> (mm)</b>	<b><math>An_{mt}</math> (mm<sup>2</sup>)</b>
<b>Mt-MP-1</b>	1098	120	50595	0,61	1091	80456
<b>Mt-MP-2</b>	1088	121	51211	0,61	1088	80951
<b>Mt-MP-3</b>	1091	121	51096	0,61	1096	81544
<b>Mt-MP-4</b>	1085	121	50659	0,61	1094	80452
<b>Mt-R1L-1</b>	1093	146	48817	0,69	1096	110770
<b>Mt-R1L-2</b>	1089	152	50740	0,69	1086	114121
<b>Mt-R1L-3</b>	1094	132	49338	0,66	1099	95415
<b>Mt-R1L-4</b>	1095	139	49886	0,67	1097	102491
<b>Mt-R1D-1</b>	1089	151	51122	0,69	1091	113186
<b>Mt-R1D-2</b>	1086	145	51370	0,67	1090	106567
<b>Mt-R1D-3</b>	1094	154	49891	0,70	1094	118650
<b>Mt-R1D-4</b>	1088	136	50048	0,66	1089	98410
<b>Mt-R2L-1</b>	1086	151	51406	0,69	1088	113005
<b>Mt-R2L-2</b>	1090	174	51964	0,73	1097	137765
<b>Mt-R2L-3</b>	1092	156	49960	0,71	1086	120443
<b>Mt-R2L-4</b>	1082	152	48256	0,71	1089	116128

Los esfuerzos de corte ( $\tau_i$ ) generados en el muro durante los incrementos de carga se calcularon aplicando la Ecuación 4-22.

Ecuación 4-22

$$\tau_i = \frac{0.707Fi}{An_{mt}}$$

Donde  $Fi$  es la carga aplicada en el muro en un momento determinado durante la ejecución del ensayo. El esfuerzo máximo a corte ( $\tau_{max}$ ) o resistencia a corte se calcula empleando la misma ecuación, pero con la carga máxima ( $F_{max}$ ) soportada por el espécimen. Durante el ensayo se registra la presión en el pistón ( $Pi$ ) por medio de un manómetro por lo cual para calcular la carga ( $Fi$ ) es necesario realizar el siguiente calculo:

Ecuación 4-23

$$Pi = \frac{Fi}{A_{cilindro}}; A_{cilindro} = 2,24" = 1445,158mm^2$$

En la Tabla 4-39 (Datos y resultados por espécimen se presentan el archivo de cálculo anexo a este documento), se presentan las cargas máximas, resistencia a corte de cada muro, resistencia promedio a corte del lote e incremento de la resistencia de los muros reforzados en comparación con los muros sin ningún reforzamiento (Mt-MP). Se puede observar que, los muros reforzados externamente con malla de fique y mortero presentan una mayor resistencia a corte que los muros que no cuentan reforzamiento; con un incremento del 22% en la resistencia promedio a corte en los muros Mt-R1D, un incremento del 33% en la resistencia promedio a corte en los muros Mt-R1L y un incremento del 39% de la resistencia a corte en los muros reforzados por ambas caras con malla ligera (Mt-R2L).

Además, se relacionan los %C.V. de cada conjunto de especímenes ensayados, los cuales se encuentran por debajo del 30% por lo cual se puede establecer que el promedio del esfuerzo máximo a corte calculado para cada conjunto es representativo de los esfuerzos máximos a corte de los muros que conforman el lote.

Tabla 4-39. Resultados ensayos de tracción diagonal en muros

<b>Espécimen</b>	<b>Carga máxima (kN)</b>	<b>Esfuerzo Max de corte (MPa)</b>	<b>Prom. Esfuerzo Max de corte (MPa)</b>	<b>%C.V.</b>	<b>%Incremento vs patrón</b>
<b>Mt-MP-1</b>	15.9	0.140	0.151	12%	0%
<b>Mt-MP-2</b>					
<b>Mt-MP-3</b>	16.1	0.140			
<b>Mt-MP-4</b>	19.5	0.172			
<b>Mt-R1D-1</b>	29.0	0.181	0.184	8%	22%
<b>Mt-R1D-2</b>	29.9	0.198			
<b>Mt-R1D-3</b>	32.2	0.192			
<b>Mt-R1D-4</b>	22.9	0.165			
<b>Mt-R1L-1</b>	32.9	0.210	0.201	14%	33%
<b>Mt-R1L-2</b>	27.9	0.173			
<b>Mt-R1L-3</b>	24.9	0.185			
<b>Mt-R1L-4</b>	34.1	0.235			
<b>Mt-R2L-1</b>	40.9	0.256	0.209	19%	39%
<b>Mt-R2L-2</b>	43.8	0.225			
<b>Mt-R2L-3</b>	29.3	0.172			
<b>Mt-R2L-4</b>	29.9	0.182			

Al comparar los resultados obtenidos del esfuerzo máximo a corte para la mampostería no reforzada con los reportados por Hernández Carvajal (2022) y López et al. (2012) se puede apreciar que la resistencia a corte obtenida en los muros de mampostería no reforzados en esta investigación se encuentran en el mismo orden de magnitud y en particular los resultados obtenidos son similares a los reportados por Hernández Carvajal (2022) con una variación del 4%, que se puede atribuir a la variación que presenta la resistencia a la compresión obtenida en los morteros de pega (Tabla 4-40). Respecto a los resultados reportados por López et al. (2012) se puede apreciar que la resistencia a corte es mayor a la resistencia obtenida durante esta investigación, sin embargo a partir de los resultados de la caracterización de los materiales realizadas por el autor y en esta investigación, se puede observar que la resistencia a compresión de las unidades de mampostería es mayor a la obtenida en las unidades empleadas para la construcción de estos muros de mampostería, al igual que la resistencia a la compresión de los morteros de pega; una situación similar se presenta con los resultados reportados por Sandoval Ortiz (2022), donde la resistencia del mortero de pega es mayor en un 142% a la resistencia del mortero de pega empleado en la construcción de los muros de esta investigación.

Tabla 4-40. Comparación resistencia a corte de muros de mampostería sin reforzamiento

<b>Unidades de mampostería (Resistencia)</b>	<b>Mortero de pega (Resistencia)</b>	<b>Promedio Esfuerzo Max de corte (MPa)</b>	<b>Autores</b>
Bloque No. 5 (1,79MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,71MPa)	0,157	(Hernández Carvajal, 2022)
Bloque No. 5 (5MPa)	Mortero de pega 1:3 (9MPa)	0,294	(López et al., 2012)
Bloque No. 5 (2,28MPa)	Mortero de pega 1:3 (15,22MPa)	0,85	(Sandoval Ortiz, 2022)
Bloque No. 5 (3MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,29MPa)	0,151	Resultados de esta investigación.

En la Tabla 4-41 se realiza una comparación entre la resistencia a corte obtenida para los muros **Mt-R1D** y **Mt-R1L** contra los resultados obtenidos en la investigación de López et al. (2012) y Shabdin et al. (2018). Los muros reforzados con malla de fique densa Mt-R1D alcanzan el 24,15% de la resistencia a corte (0,762MPa) de un muro reforzado con sistema convencional (López et al., 2012), mientras que los muros reforzados con malla de fique ligera Mt-R1L alcanzan el 26,38%, es importante señalar que a partir de la caracterización de los materiales se puede apreciar que en los muros de mampostería fabricados por López et al. (2012), las unidades de mampostería, mortero de pega y el mortero de recubrimiento tenían una mayor resistencia que las resistencia reportada en los materiales empleados en la fabricación de los muros de esta investigación. Por otro lado, al comparar la resistencia a corte de los muros **Mt-R1D** y **Mt-R1L** con los reportados por Shabdin et al. (2018), estos valores de resistencia son menores, dado que en la investigación de Shabdin et al. (2018) se emplean ladrillos con una mayor resistencia a la compresión que los bloques de mampostería, al igual que la resistencia del mortero de recubrimiento que es mayor en un 175%, lo que genera una diferencia significativa en la resistencia a corte de los muros de mampostería.

Tabla 4-41. Comparación de resistencia a corte muros de mampostería reforzados por una cara

<b>Unidades de mampostería (Resistencia)</b>	<b>Mortero de pega (Resistencia)</b>	<b>Tipo de refuerzo</b>	<b>Promedio Esfuerzo Max de corte (MPa)</b>	<b>Autores</b>
Bloque No. 5 (5MPa)	Mortero de pega 1:3 (9MPa)	Malla electrosoldada $\varnothing=5\text{mm}$ separación 15x15cm con mortero de recubrimiento (20MPa)	0,762	(López et al., 2012)
Ladrillo (17MPa)	Mortero de pega 1:5 (8,8MPa)	Textiles AR-Glass y mortero de recubrimiento (39,4MPa) e:15mm	0,737	(Shabdin et al., 2018)
Ladrillo (17MPa)	Mortero de pega 1:5 (8,8MPa)	Textiles AR-Glass y mortero de recubrimiento (39,4MPa) e:25mm	1,142	(Shabdin et al., 2018)
Bloque No. 5 (3MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,29MPa)	Mortero de recubrimiento 1:2.5 (14,31MPa) y malla de fique densa.	0,184	Resultados de esta investigación.
Bloque No. 5 (3MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,29MPa)	Mortero de recubrimiento 1:2.5 (14,31MPa) y malla de fique ligera.	0,201	Resultados de esta investigación

En la Tabla 4-42 se realiza una comparación entre la resistencia a corte obtenida para los muros **Mt-R2L** contra los resultados obtenidos en la investigación de Hernández Carvajal (2022) reforzando mampostería con bandas de polipropileno y de Sandoval Ortiz (2022) reforzando mampostería con el sistema convencional con malla electrosoldada y mortero de recubrimiento. Los muros reforzados con malla de fique ligera Mt-R2L alcanzan el 11% de la resistencia a corte de un muro reforzado con sistema convencional con malla y conectores simples (1.91MPa), sin embargo se debe tener en cuenta que los espesores y la resistencia del mortero de recubrimiento son mayores a los empleados en la construcción de los especímenes de esta investigación, a nivel de la resistencia del mortero de recubrimiento los especímenes de Sandoval Ortiz (2022) tienen una resistencia a compresión mayor en un 89%.

Al comparar los resultados de los especímenes Mt-R2L contra los resultados obtenidos al reforzar los muros únicamente con bandas de polipropileno se puede apreciar que se obtiene una mayor resistencia a corte en un 31%, pero una menor resistencia al comparar con la resistencia a corte obtenida en los muros reforzados con bandas de polipropileno y mortero de recubrimiento en un 25%.

Tabla 4-42. Comparación de resistencia a corte muros de mampostería reforzados por ambas caras

<b>Unidades de mampostería (Resistencia)</b>	<b>Mortero de pega (Resistencia)</b>	<b>Tipo de refuerzo</b>	<b>Promedio Esfuerzo Max de corte (MPa)</b>	<b>Autores</b>
Bloque No. 5 (1,79MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,71MPa)	Bandas polipropileno (PP)	0,160	(Hernández Carvajal, 2022)
Bloque No. 5 (1,79MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,71MPa)	Bandas polipropileno (PP) y mortero de recubrimiento 1:3 (6,71MPa)	0,278	(Hernández Carvajal, 2022)
Ladrillo (17MPa)	Mortero de pega 1:5 (8,8MPa)	Textiles AR-Glass y mortero de recubrimiento (39,4MPa) e:15mm	2,33	(Shabdin et al., 2018)
Ladrillo (17MPa)	Mortero de pega 1:5 (8,8MPa)	Textiles AR-Glass y mortero de recubrimiento (39,4MPa) e:25mm	2,10	(Shabdin et al., 2018)
Bloque No. 5 (2,28MPa)	Mortero de pega 1:5 (15,22Mpa)	Mortero de recubrimiento 1:2 (27MPa) e: 5cm.	1,10	(Sandoval Ortiz, 2022)
Bloque No. 5 (2,28MPa)	Mortero de pega 1:5 (15,22Mpa)	Malla simple (grafiles 4mm separación 15x15cm), conector simple. Mortero de recubrimiento 1:2 (27MPa) e: 5cm.	1,91	(Sandoval Ortiz, 2022)
Bloque No. 5 (2,28MPa)	Mortero de pega 1:5 (15,22Mpa)	Malla doble (grafiles 4mm separación 15x15cm), conector simple. Mortero de recubrimiento 1:2 (27MPa) e: 5cm.	1,91	(Sandoval Ortiz, 2022)
Bloque No. 5 (2,28MPa)	Mortero de pega 1:5 (15,22Mpa)	Malla doble (grafiles 4mm separación 15x15cm), conector doble. Mortero de recubrimiento 1:2 (27MPa) e: 5cm.	1,99	(Sandoval Ortiz, 2022)
Bloque No. 5 (2,28MPa)	Mortero de pega 1:5 (15,22Mpa)	Malla simple (grafiles 4mm separación 15x15cm), conector simple y fibras metálicas. Mortero de recubrimiento 1:2 (27MPa) e: 5cm	1,72	(Sandoval Ortiz, 2022)
Bloque No. 5 (3MPa)	Mortero de pega 1:3 (6,29MPa)	Mortero de recubrimiento 1:2.5 (14,31MPa) y malla de fique ligera. <b>(Mt-R2L)</b>	0,209	Resultados de esta investigación

Por otro lado, la deformación unitaria debida al esfuerzo de corte ( $\gamma$ ) se calculó a partir del promedio de la deformación unitaria calculada en la cara frontal ( $\gamma_F$ ) y la cara dorsal ( $\gamma_D$ ) del muro de mampostería. Donde las deformaciones unitarias se calcularon a partir del acortamiento en la dirección paralela a la carga ( $\Delta x_F$  o  $\Delta x_D$ ), el alargamiento en la dirección perpendicular a la carga ( $\Delta y_F$  o  $\Delta y_D$ ) y la longitud inicial calibrada ( $L_{dy}$ ), aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 4-24} \quad \gamma_F = \left( \frac{\Delta x_F + \Delta y_F}{L_{dy}} \right)$$

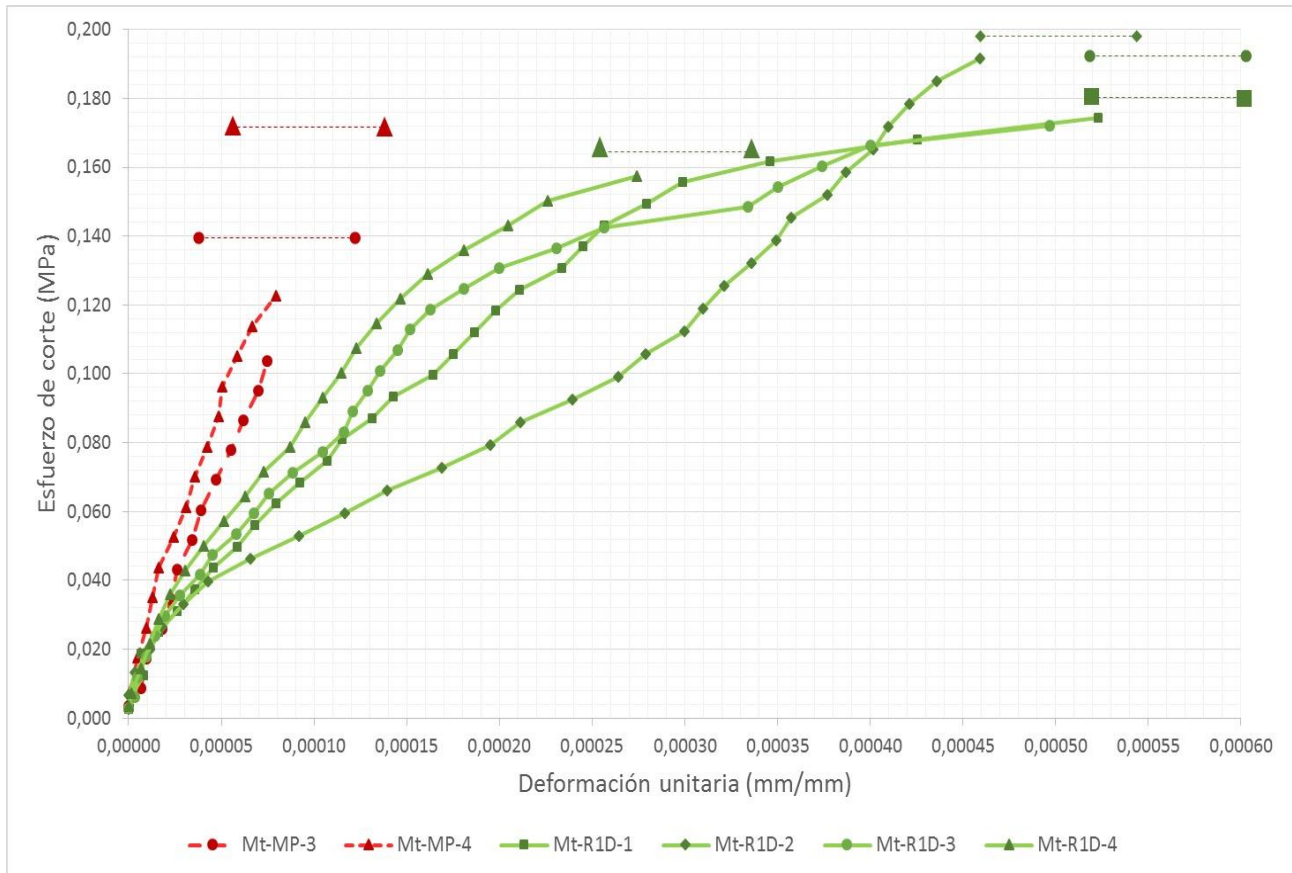
$$\text{Ecuación 4-25} \quad \gamma_D = \left( \frac{\Delta x_D + \Delta y_D}{L_{dy}} \right)$$

$$\text{Ecuación 4-26} \quad \gamma = \left( \frac{\gamma_F + \gamma_D}{2} \right)$$

En la Figura 4-15 se puede apreciar que los muros Mt-MP presentan un comportamiento más rígido en comparación con los muros Mt-R1D, que presentan una mayor capacidad de deformación con una mayor resistencia a cortante. Debido a que no es posible realizar la medición de los desplazamientos hasta el momento de la falla, las líneas horizontales que se grafican en las curvas representan el esfuerzo máximo a corte que resisten cada uno de los especímenes. Para comparar las deformaciones unitarias presentadas en los especímenes al mismo nivel de esfuerzo se realizó una regresión lineal para calcular la deformación unitaria a un esfuerzo de corte de 0.104MPa, en la cual los muros Mt-MP presentan una deformación promedio de 0.000066mm/mm, mientras que los muros Mt-R1D presentan una deformación promedio de 0.00018mm/mm, así el incremento en la deformación fue del 166%.

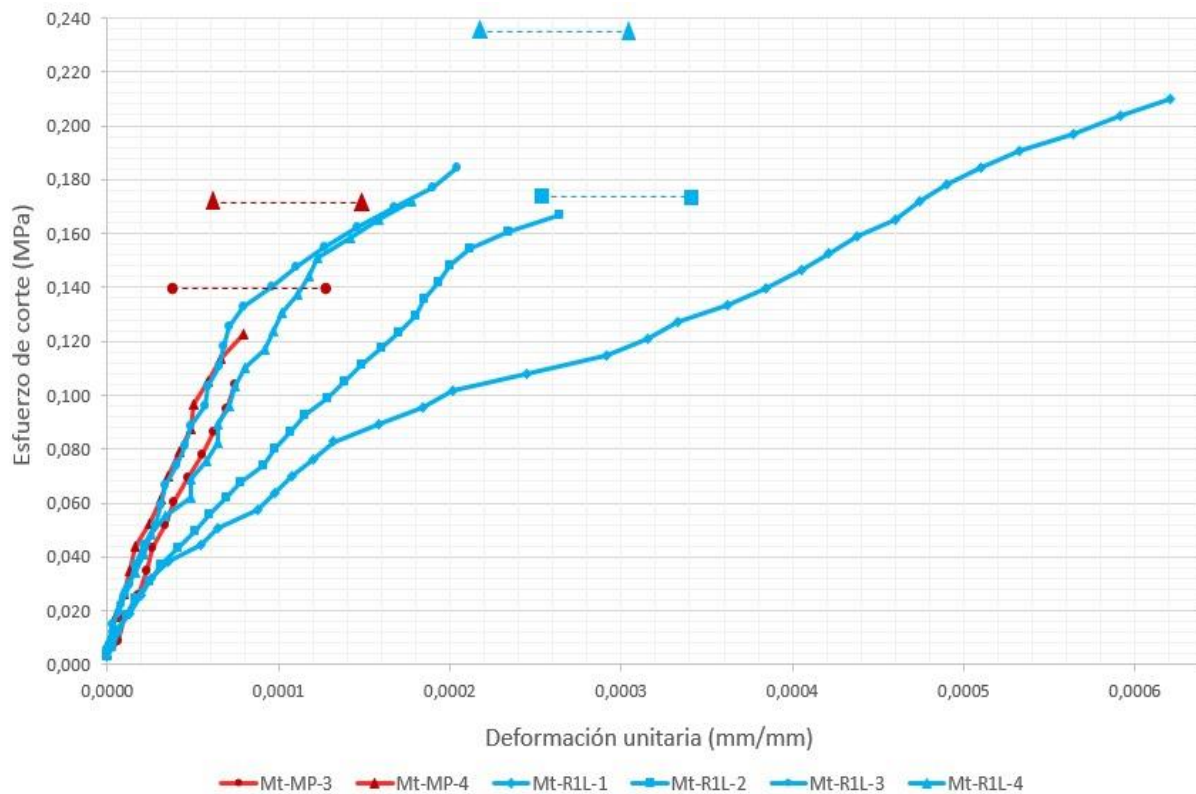


Figura 4-15. Curvas de esfuerzo vs deformación muros Mt-MP y Mt-R1D



El comportamiento de los muros Mt-MP presenta una tendencia lineal hasta el momento de la falla en la cual se genera un colapso del elemento, mientras los muros Mt-R1L inicialmente presentan una tendencia lineal hasta alcanzar el límite del rango elástico y posterior a ello un incremento en el rango plástico donde se incrementa la deformación unitaria conforme aumenta el esfuerzo hasta alcanzar la falla, sin que se genere una falla súbita en el elemento (Figura 4-16). Al comparar las deformaciones al mismo nivel de esfuerzo (104MPa) se observa que los muros Mt-MP presentan una deformación promedio de 0.000066mm/mm, mientras que los muros Mt-R1L presentan una deformación promedio de 0.00012mm/mm, así el incremento en la deformación fue del 84%.

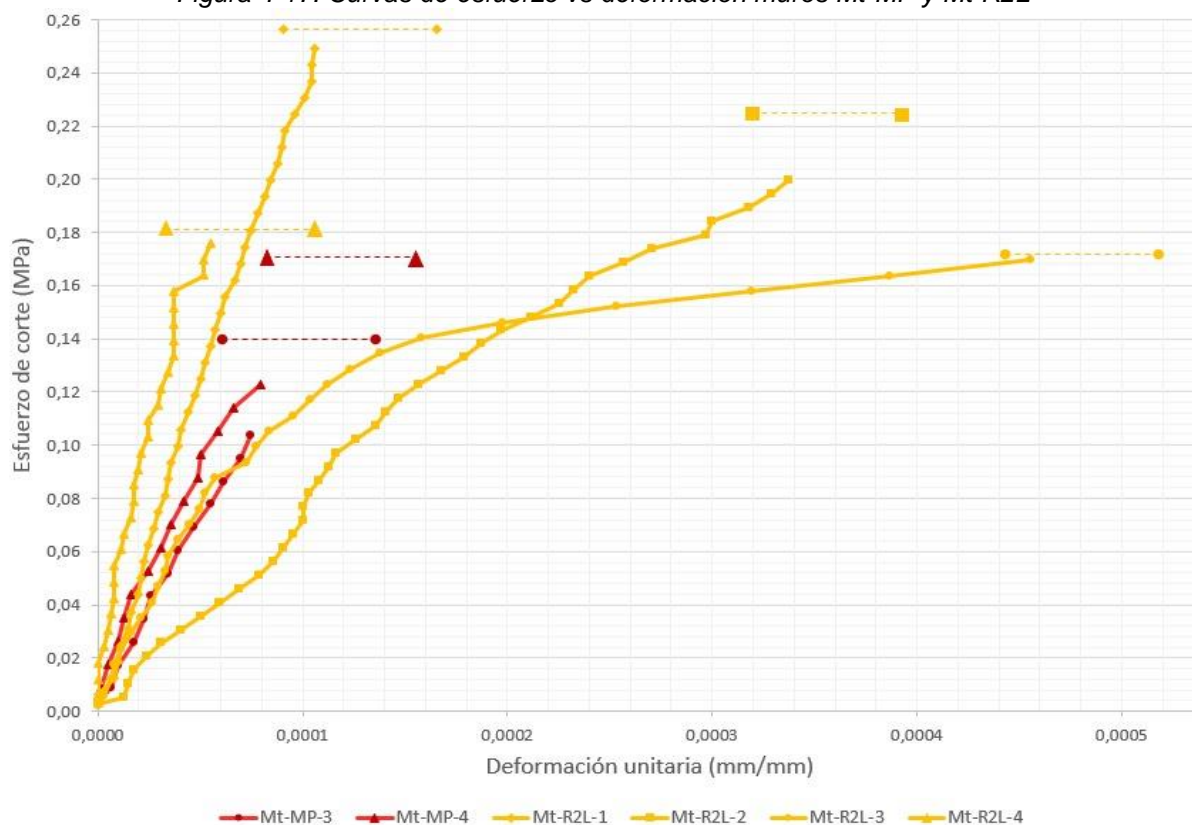
Figura 4-16. Curvas de esfuerzo vs deformación muros Mt-MP y Mt-R1L



En los muros Mt-R2L se evidencia dos tipos de comportamiento (Figura 4-17), en los muros Mt-R2D-1 y Mt-R2D-4 se generó un aumento en la rigidez a corte de la mampostería en comparación con los muros Mt-MP mientras en los muros Mt-R2L-2 y Mt-R2L-3 se genera una mayor capacidad de deformación, esto se debe a que el espesor de los muros Mt-R2L-1 y Mt-R2L-4 garantizaban que el elemento se encontrara totalmente soportado en los apoyos, mientras que los muros Mt-R2L-2 y Mt-R2L-3 al tener un espesor mayor al espesor del apoyo, por lo que una de las caras quedaba excéntrica a la aplicación de la carga.

El promedio de la deformación unitaria a 104MPa de los muros Mt-R2D-1 y Mt-R2D-4 es 0.000032mm/mm lo cual representa una reducción del 51% en comparación con la deformación unitaria presentada en los muros Mt-MP al mismo nivel de esfuerzo, mientras que el promedio de deformación de los muros Mt-R2L-2 y Mt-R2L-3 corresponde a 0.000106mm/mm con un incremento del 60% respecto a la deformación en los muros Mt-MP.

Figura 4-17. Curvas de esfuerzo vs deformación muros Mt-MP y Mt-R2L



Por último, el módulo de rigidez a cortante se calculó como la relación entre el esfuerzo de corte ( $S_s$ ) y la deformación unitaria ( $\gamma$ ), como se puede observar en la Ecuación 4-27.

Ecuación 4-27 
$$G = \frac{S_s}{\gamma}$$

Este módulo de rigidez fue calculado dentro del rango en que las curvas de esfuerzo de corte y deformación unitaria presentaban una tendencia lineal con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mayor a 0.98. En la Tabla 4-43 se presentan los módulos de rigidez a cortante de los muros de mampostería y el promedio por lote, en donde se puede apreciar que los muros reforzados por una sola cara presentan una menor rigidez en comparación con los muros sin reforzamiento mientras los muros reforzados por ambas caras presentan una mayor rigidez. Es importante señalar que el módulo de rigidez a cortante del muro Mt-R1L-1 es muy bajo en comparación a los resultados obtenidos en los otros especímenes, esto debido a que las deformaciones registradas en la cara pañetada fueron mayores dado que los pañetes se fisuraron al momento del montaje, por esta razón para el cálculo del promedio de este tipo de configuración se rechazó este resultado.

Tabla 4-43. Módulo de rigidez a cortante de muros de mampostería

<b>Espécimen</b>	<b>Módulo de rigidez (MPa)</b>	<b>Promedio (MPa)</b>	<b>%C.V.</b>
<b>Mt-MP-3</b>	1346.2	1508.9	15,24%
<b>Mt-MP-4</b>	1671.5		
<b>Mt-R1D-1</b>	470.82	531,6	27,11%
<b>Mt-R1D-2</b>	362.49		
<b>Mt-R1D-3</b>	603.99		
<b>Mt-R1D-4</b>	688.99		
<b>Mt-R1L-1</b>	282.58	1368,15	24,45%
<b>Mt-R1L-2</b>	645.2		
<b>Mt-R1L-3</b>	1604.7		
<b>Mt-R1L-4</b>	1131.6		
<b>Mt-R2L-1</b>	2404.6	2178,97	27,63%
<b>Mt-R2L-2</b>	774.07		
<b>Mt-R2L-3</b>	1496.6		
<b>Mt-R2L-4</b>	2635.7		

#### 4.2.1 Modos de falla

La falla en los muros de mampostería no reforzada (Mt-MP) fue principalmente por deslizamiento por cortante como se observa en la Figura 4-18, donde las fisuras se extendieron a lo largo de las juntas que conforman la diagonal del muro, pero además las unidades de mampostería que conformaban las primeras hiladas se deslizaron debido a la falta de adherencia entre el mortero de pega y las unidades de mampostería. La falla que presentaron estos muros fue una falla frágil y súbita, en la cual, los muros pierden su integridad y se genera el colapso del elemento.

Figura 4-18. Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-MP



Cabe resaltar, que el muro Mt-MP-2 falló durante el traslado y montaje en la máquina de ensayo, donde la primera hilada se desprendió del resto del muro, debido a la unión débil presentada en la interfaz mortero-unidad. En la Figura 4-19 se puede observar que el mortero de pega que se encontraba en la base se desprendió de la primera hilada, lo mismo se presentó en la junta que unía la primera y la segunda hilada del muro. Si analizamos la carga que se estaba aplicando durante el traslado del muro fue una combinación de carga lateral y tensión en la junta y aunque no fue posible realizar el ensayo por tensión diagonal es evidente que el muro presentaría una muy baja resistencia a esfuerzos de corte.

*Figura 4-19. Falla por desprendimiento de mortero de pega en muro Mt-MP-2*



Todos los muros reforzados por una cara con malla densa (Mt-R1D) presentaron el mismo modo de falla por deslizamiento por cortante en las juntas o fricción-cortante como se puede observar en la Figura 4-20, donde las grietas presentan una distribución escalonada a través de las juntas verticales y horizontales que conforman la diagonal del muro. El muro Mt-R1D-3, además presentó falla por aplastamiento en el apoyo superior, se observa como la unidad de mampostería que se encontraba en el apoyo superior falló debido a la carga a compresión aplicada.

Figura 4-20. Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-R1D



Cabe resaltar que en todos los muros Mt-R1D se presentó una separación de la capa de reforzamiento del muro de mampostería, como se puede observar en la

Figura 4-21; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; sin embargo, ninguno de los muros presentó una falla súbita, por el contrario, se mantuvo su integridad y no se generó el colapso del elemento a diferencia de los muros Mt-MP. La capa de reforzamiento no se desprendió totalmente del muro, ni se deslizó, debido a los conectores que mantenían unida la malla de fique a las juntas del muro. Además, se observa en la

Figura 4-21 que la malla densa se comporta como una barrera, que evita la conexión entre el mortero de la primera y la segunda capa, dado que los espacios vacíos entre hiladas son tan reducidos que no permiten el paso de la mezcla, por lo cual el conjunto del muro de mampostería no reforzado y la capa de reforzamiento externo no se comporta como un

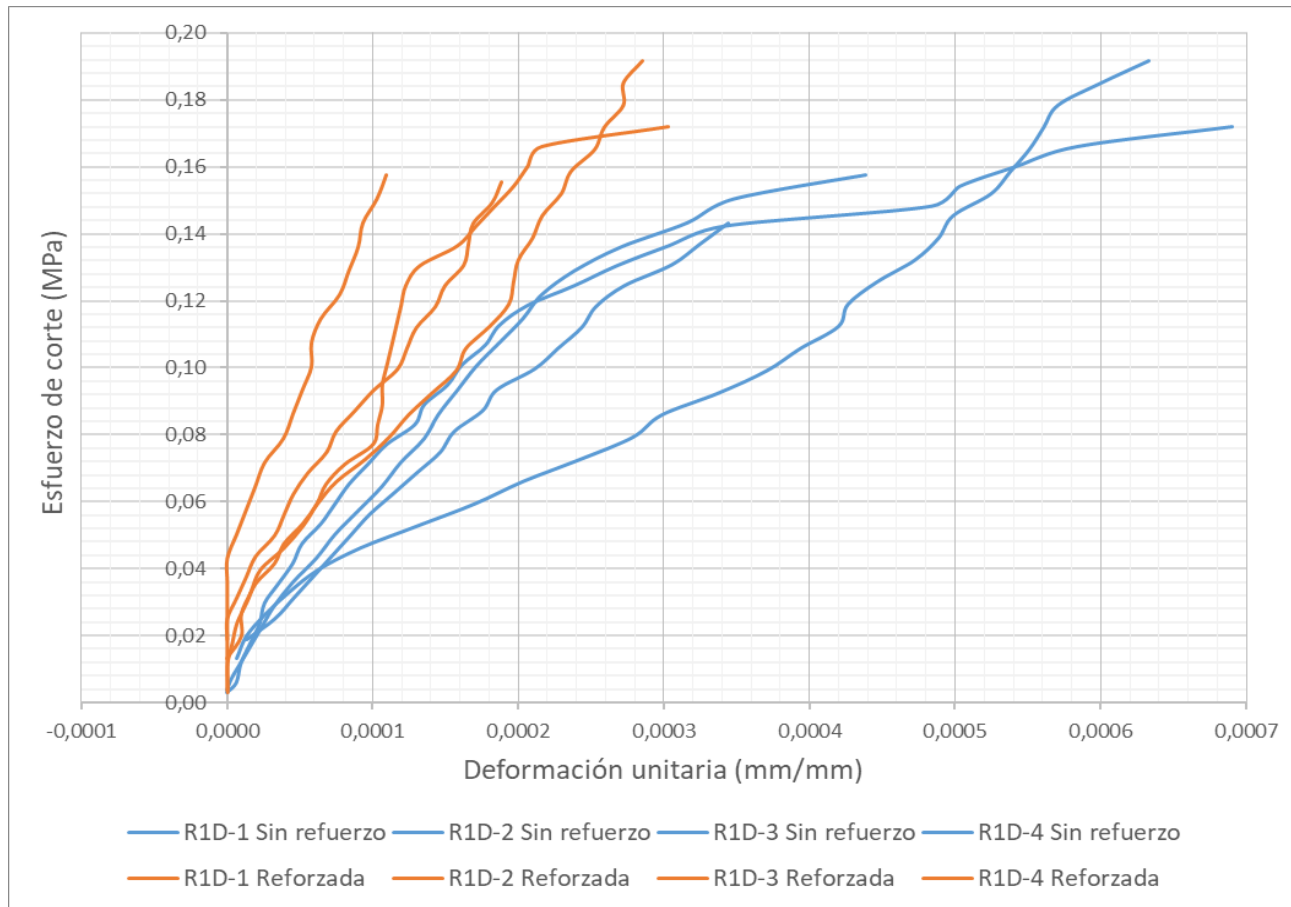
material compuesto y esto genera que no se restrinja totalmente el deslizamiento por corte en las juntas, dando como resultado este tipo de falla en los muros.

Figura 4-21. Desprendimiento de la capa de refuerzo en los muros Mt-R1D



Ahora bien, a partir de las deformaciones registradas en los comparadores de caratula instalados en la cara reforzada y en la cara sin reforzar, se puede comprobar que la cara que no estaba reforzada presentó mayores deformaciones que las presentadas en la cara reforzada, como se puede evidenciar en la Figura 4-22. Este comportamiento se genera debido a la asimetría que presenta el muro al estar reforzado solamente en una de sus caras, por lo que la cara reforzada aumenta su rigidez y la cara sin reforzar empieza a deformarse con bajos niveles de carga, mientras la cara reforzada no presenta ningún tipo de deformación; este comportamiento coincide con lo reportado por Yardim y Lalaj (2016).

Figura 4-22. Curvas esfuerzo vs deformación de caras reforzadas y sin reforzamiento Mt-R1D



Los muros reforzados por una cara con malla ligera Mt-R1L, presentaron principalmente falla por aplastamiento en el apoyo superior o inferior como se evidencia en la Figura 4-23. El refuerzo con malla de fique y mortero evitó la falla por deslizamiento por cortante, funcionando como un tirante que aportó a la baja resistencia a tracción que presentaba la interfaz entre el mortero de pega y las unidades de mampostería. Sin embargo, debido a la baja resistencia a la compresión que presentan las unidades de mampostería, al aumentar la carga a compresión a la cual está sometido el elemento, se genera la falla por aplastamiento. Este comportamiento fue descrito por Meriggi et al. (2021), que indicaron que la eficacia de los textiles se encuentra restringida por la baja resistencia que pueden presentar los materiales que conforman el muro.



Figura 4-23. Registro fotográfico falla por aplastamiento en los apoyos Mt-R1L



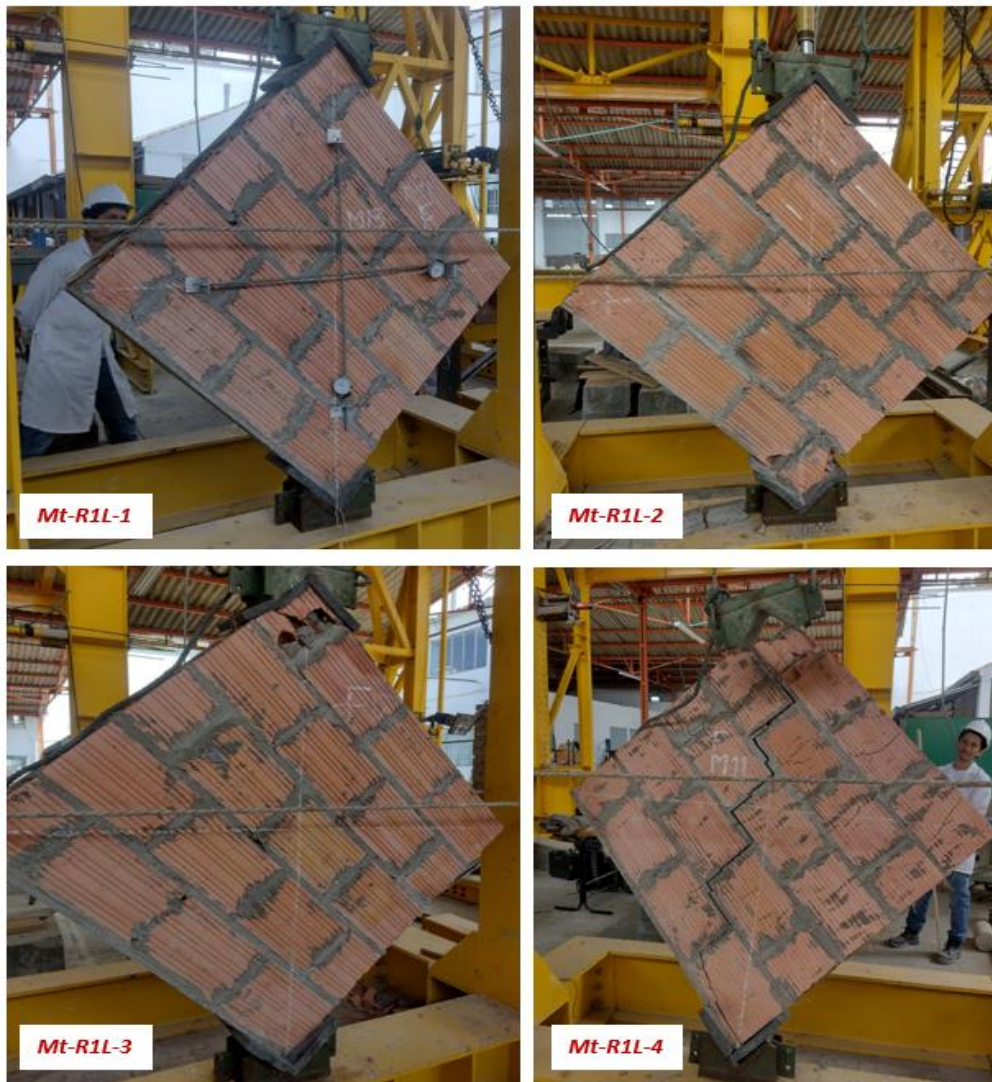
El muro Mt-R1L-4 fue el único de este lote, que presentó una falla por deslizamiento por cortante, donde se generaron grietas no solo en la cara sin reforzamiento, sino en el mortero de recubrimiento como se evidencia en la Figura 4-24.

Figura 4-24. Falla por deslizamiento por cortante en muro Mt-R1L-4



Frente al comportamiento que se generó en este muro, es importante señalar que durante el montaje se presentó fisuración en el mortero de recubrimiento, estas fisuras fueron marcadas antes de iniciar con el ensayo con marcador negro como se puede apreciar en el registro fotográfico, y que durante el ensayo estas fisuras tendieron a extenderse, pero al presentarse la falla por deslizamiento por cortante se presentaron múltiples fisuraciones en el recubrimiento, en particular las fisuras presentadas a lo largo de la diagonal sometida a carga. De manera adicional, en particular, este muro del lote presentó la mayor resistencia a corte en comparación con los otros especímenes que fueron reforzados con el mismo tipo de malla y por una sola cara.

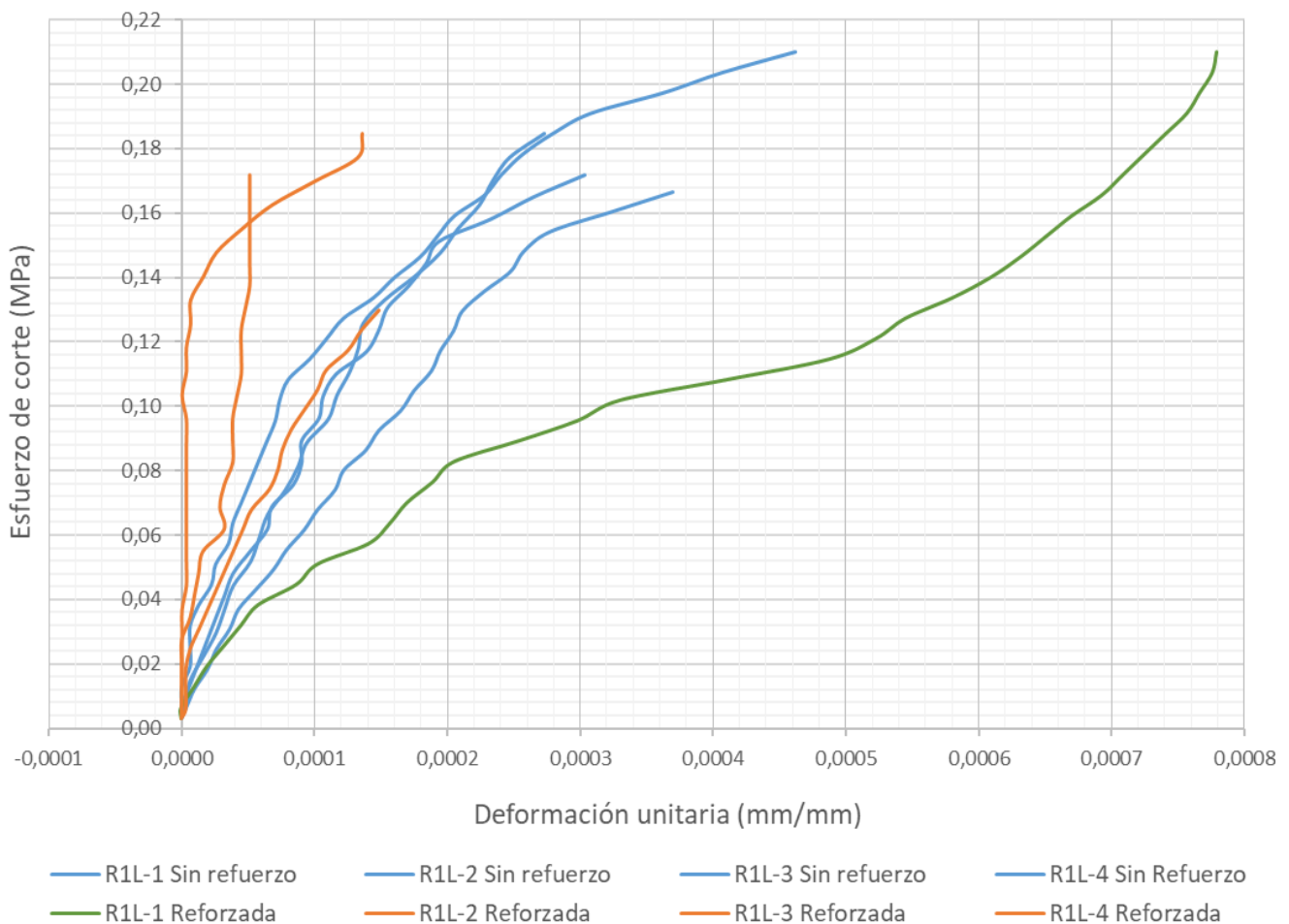
*Figura 4-25. Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-R1L*



Como se puede apreciar en la Figura 4-25, al momento de la falla, los muros mantuvieron su integridad y no se colapsaron a diferencia de los muros sin ningún tipo de reforzamiento (Mt-MP). Aunque si es evidente que se inducen esfuerzos fuera del plano, lo que genera el riesgo de un posible volcamiento al momento de presentarse la falla en los apoyos.

Como se puede apreciar en la Figura 4-26, en la mayoría de los muros Mt-R1L la cara no reforzada presentó una mayor deformación que la cara reforzada, la cual inicialmente bajo cargas reducidas de compresión no registró ningún tipo de deformación, comportamiento igual al que presentaron los muros Mt-R1D.

Figura 4-26. Curvas esfuerzo vs deformación de caras reforzadas y sin reforzamiento Mt-R1L



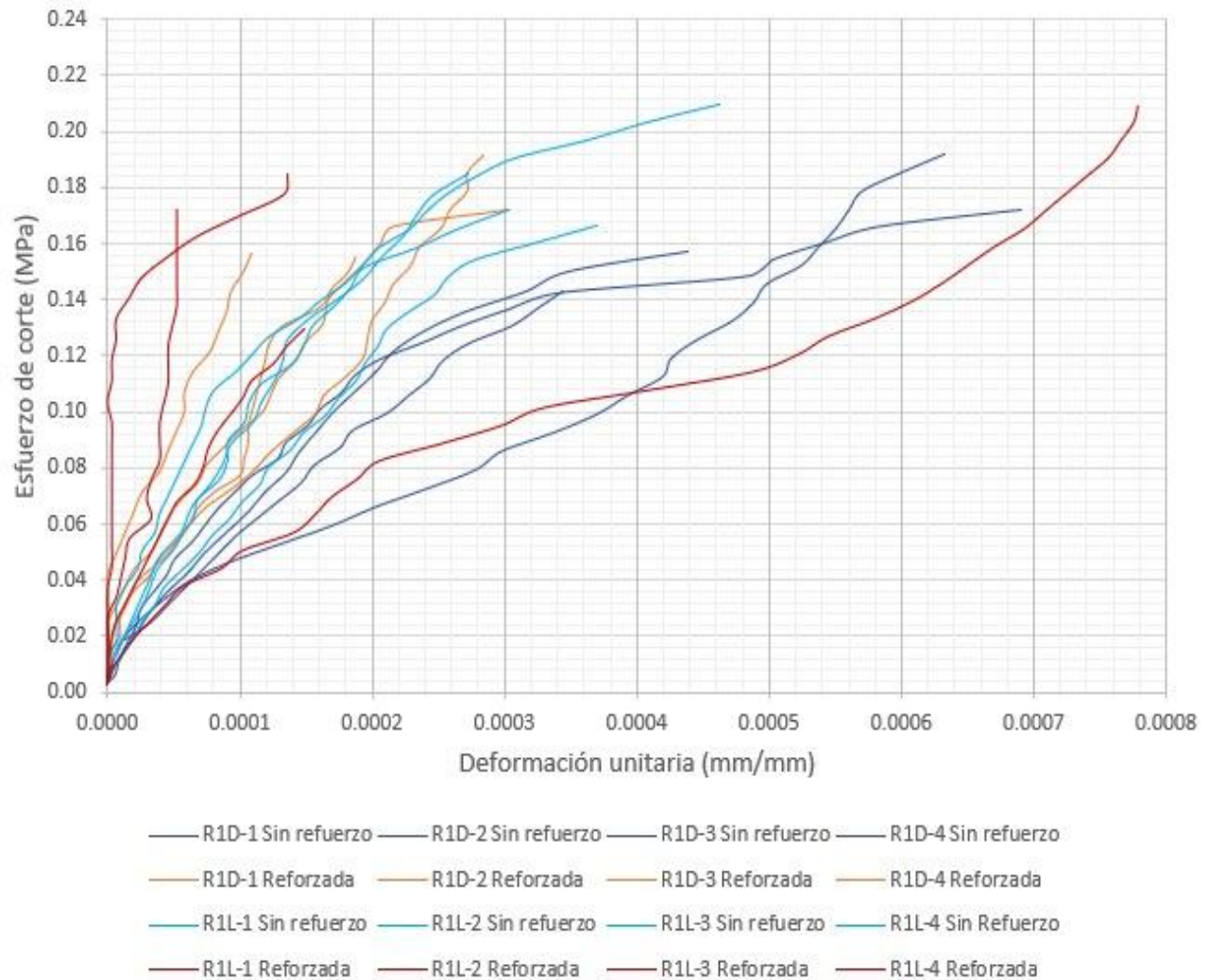
Sin embargo, la cara reforzada del muro R1L-1 presentó una mayor deformación que la cara no reforzada, este comportamiento se generó debido a que el recubrimiento durante el proceso de montaje en la máquina de ensayo presentó fisuración como la que se observa en la Figura 4-27, así que durante la aplicación de la carga esta fue más propensa a seguir con el proceso de fisuración y por lo tanto presentar una mayor deformación en la cara reforzada.

*Figura 4-27. Fisuración en el recubrimiento del muro Mt-R1L-1*



Al comparar el comportamiento de los muros Mt-R1D y los muros Mt-R1L mediante las curvas de esfuerzo de corte vs deformación unitaria como se observa en la Figura 4-28, se puede observar que las caras no reforzadas de los muros Mt-R1L presentan una menor deformación que las caras no reforzadas de los muros Mt-R1D, este comportamiento está relacionado con la falta de adherencia que se presentó en la alternativa de reforzamiento con malla densa, en comparación con el sistema de reforzamiento con malla ligera. En los muros Mt-R1L, el reforzamiento actuó como un tirante, aportando a la resistencia a tracción y limitando la deformación del muro.

Figura 4-28. Curvas esfuerzo vs deformación de caras reforzadas y sin reforzamiento Mt-R1L y Mt-R1D



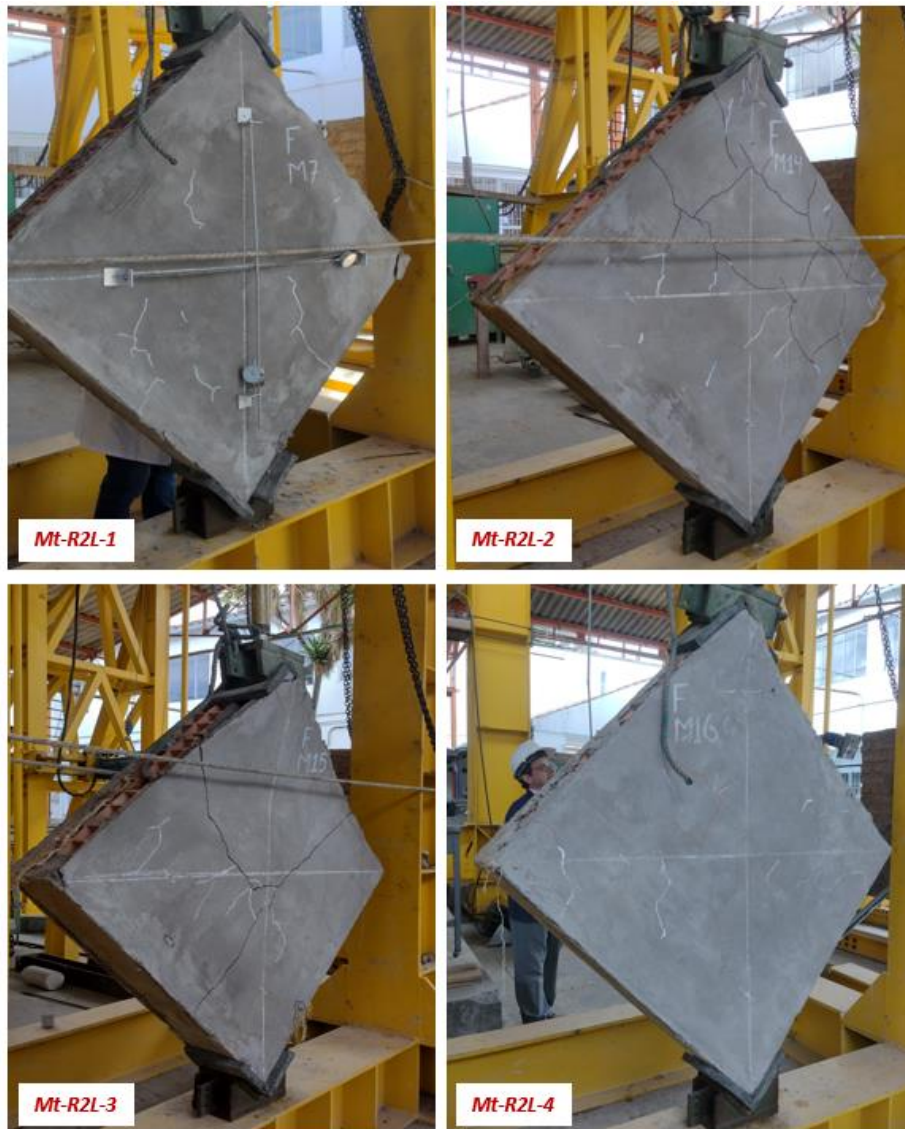
Por último, la falla generada en los muros de prueba Mt-R2L fue por aplastamiento en los apoyos inferior o superior, como se puede apreciar en la Figura 4-29, el reforzamiento en los apoyos tendió a pandearse, mientras la mampostería se desintegró totalmente al interior de la esquina del apoyo.

Figura 4-29. Registro fotográfico falla por aplastamiento en los apoyos Mt-R2L



Al igual que en los muros Mt-R1D y Mt-R1L, estos muros reforzados por ambas caras con malla ligera (Mt-R2L) mantuvieron su integridad y no colapsaron al momento de generarse la falla, como se registra en la Figura 4-30.

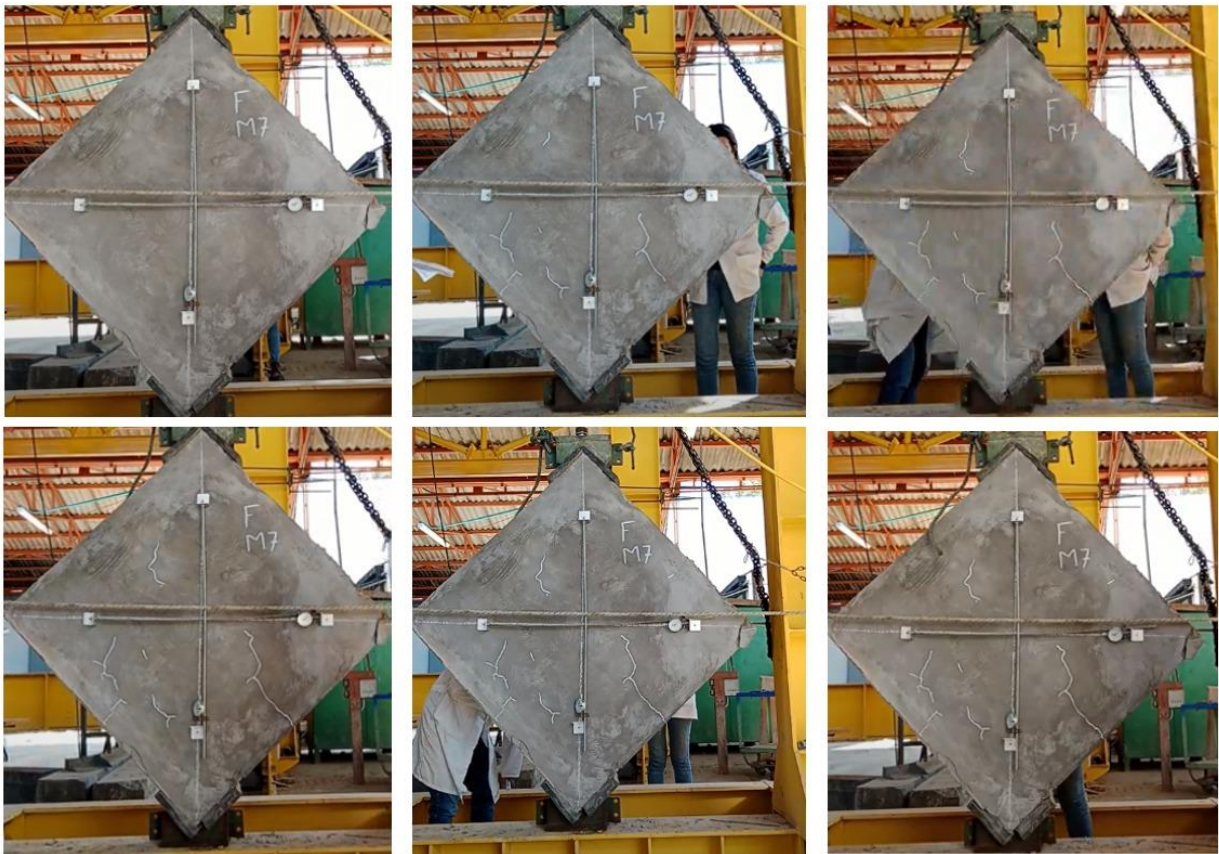
*Figura 4-30 Registro fotográfico durante la falla de los muros Mt-R2L*



Durante el desarrollo del ensayo, se pudo apreciar cómo se fueron generando fisuras en los recubrimientos y conforme aumentaba la carga se escuchaba que al interior del elemento la mampostería se fisuraba sin que el elemento se colapsara de manera súbita (Figura 4-31). Al igual que el aplastamiento en el apoyo inferior fue generándose de manera progresiva

conforme se incrementaba la carga a la cual estaba sometido el elemento, no de manera esporádica.

*Figura 4-31. Registro fotográfico de las fisuras y fallas generadas en el muro Mt-R2L durante el ensayo.*



Durante el retiro de los muros de la máquina de ensayo y al extraer las unidades de mampostería y el recubrimiento, se pudo apreciar que los conectores instalados para sujetar la malla de fique al muro habían estado sometidos a esfuerzos cortantes durante la aplicación de la carga, esto debido a que chazos y tornillos tendieron a doblarse como se puede observar en la Figura 4-32. Esta falla fue generada en los conectores de todos los muros con reforzamiento (Mt-R1D, Mt-R1L y Mt-R2L) y prueba que no solamente evitó un desprendimiento total del recubrimiento en los muros (Mt-R1D), sino que permitió la transferencia de esfuerzos entre el reforzamiento y las unidades de mampostería, funcionando como conectores de cortante.



Figura 4-32. Falla por cortante generada en los conectores

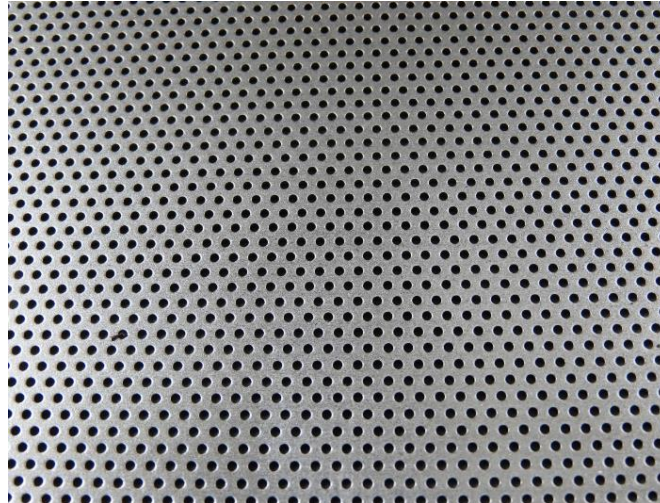


Sin embargo, debido a que la cara superior de las tapas metálicas es una superficie lisa, no se generó adherencia entre la tapa y el mortero de recubrimiento (Figura 4-33), por esta razón se recomienda reemplazar este complemento por laminas metálicas microperforadas (Figura 4-34) que no limiten la conexión entre el mortero de recubrimiento de la primera capa y la segunda capa, pero que fijen la malla de fique al muro de mampostería.

Figura 4-33.Registro fotográfico de tapas metálicas de conectores.

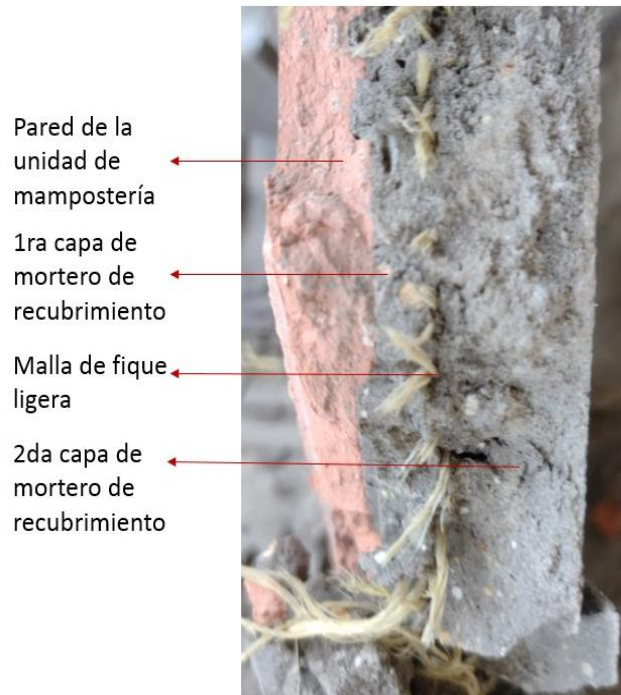


Figura 4-34. Lámina metálica microperforadas complemento conexión mortero-malla de fique. Fuente: [www.anjeosymallas.com.co](http://www.anjeosymallas.com.co)



En las zonas donde no se encontraban las tapas metálicas de los conectores se generó una adecuada adherencia entre los diferentes materiales (mampostería, 1ra capa de mortero de recubrimiento, malla de fique ligera y 2da capa de mortero de recubrimiento) como se puede observar en la Figura 4-35.

Figura 4-35. Muestra de material compuesto conformado con malla ligera.



## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

A partir de los resultados obtenidos mediante la caracterización física de las mallas de fique, se identificó que la malla ligera tiene una mayor separación entre hiladas con menores diámetros mientras que la malla densa cuenta con menores separaciones entre hiladas con mayores diámetros, ocasionando que el porcentaje de vacíos en la malla ligera sea mayor. Esta característica en las mallas ligeras permite la adherencia entre el mortero de recubrimiento de la primera y la segunda capa del reforzamiento, garantizado que se genere una adecuada interacción entre el muro de mampostería y el sistema de reforzamiento externo, conformando un material compuesto. Caso contrario al efecto generado con la malla densa, que al tener un bajo porcentaje de vacíos limita y genera una barrera para mortero de recubrimiento de la segunda capa, por esta razón durante los ensayos de tracción diagonal, en los muros reforzados con este tipo de malla se separó el reforzamiento del muro de mampostería.

El reforzamiento de los muros de mampostería mediante mortero de recubrimiento con malla de fique (Fique TRM) permite incrementar su resistencia a cortante. En los muros reforzados con malla densa por una sola cara se generó un incremento en el esfuerzo máximo de corte del 22%, en los muros reforzados con malla ligera por una sola cara se generó un incremento del 33% y en los muros reforzados con malla ligera por ambas caras se generó un incremento del 39% respecto a la resistencia a corte de los muros sin reforzamiento. Frente a la capacidad de deformación de los muros, se evidenció que los muros reforzados por una sola cara con malla ligera y malla densa presentan una mayor capacidad de deformación con un menor módulo de rigidez en comparación con los muros sin reforzamiento. En el caso, de los muros reforzados por ambas caras con malla ligera se presenta un incremento en el módulo de rigidez, presentando una menor deformación, pero la falla que presentan estos muros es prolongada, generando la aparición de fisuras en los pañetes conforme aumenta la carga a la que son sometidos.

Respecto a los modos de falla, los muros de mampostería no reforzados presentan una falla por deslizamiento por cortante, generando fisuras escalonadas en las juntas del mortero de pega, donde la falla fue súbita y generó el colapso del elemento. Esta falla es atribuida a la baja adherencia entre el mortero de pega y las unidades de mampostería, lo que ocasionó una unión débil en la interfaz de los materiales.

Por otro lado, los muros reforzados externamente con mortero de recubrimiento y malla de fique (Fique TRM) presentan una falla prolongada y gradual en donde se conserva la integridad del muro. En el caso, de los muros reforzados por una cara con malla densa se presenta una falla por deslizamiento por cortante en las juntas, ya que, al separarse el reforzamiento del muro, disminuye la contribución del reforzamiento en la resistencia del muro a los esfuerzos de tensión y no restringe el desplazamiento en la diagonal ortogonal a la línea de aplicación de la carga en la superficie no reforzada.

Ahora bien, en los muros reforzados con malla ligera por una o ambas caras se presenta principalmente una falla por aplastamiento en los apoyos. En estos casos, al garantizar una adecuada adherencia entre el reforzamiento y el muro de mampostería, el reforzamiento funciona como un tirante, que mejora la baja resistencia a la tensión que presentaba la interfaz entre el mortero de pega y las unidades de mampostería, sin embargo, al aumentar la carga a compresión en la diagonal se presenta la falla en el material con menor resistencia que en este caso corresponde a las unidades de mampostería.

En los muros de mampostería que se encuentran reforzados por una sola cara se generan mayores deformaciones en la cara no reforzada en comparación con las deformaciones registradas en las caras reforzadas, esto debido a la asimetría generada en el muro por el reforzamiento. Estas diferencias en las deformaciones entre la cara reforzada y la cara no reforzada son mayores en los muros que se refuerzan con malla densa, dado que, este reforzamiento no limita las deformaciones que se ocasionan por los esfuerzos de tensión.

Frente al uso de conectores de cortante, mediante chazos y tornillos se evidenció que los conectores implementados durante estos ensayos presentaron fallas por corte, dado que estos tendieron a doblarse o presentar cizallamiento. Estos conectores evitaron el desprendimiento total del recubrimiento en los muros reforzados con malla densa y garantizaron la transferencia de esfuerzos entre el reforzamiento y el muro mampostería.

Al comparar los resultados del esfuerzo de corte de los muros de mampostería reforzados con mortero y malla de fique con los resultados reportados en otras investigaciones acerca de muros de mampostería reforzados con la técnica convencional se pudo determinar que los muros reforzados con malla densa por una cara Mt-R1D alcanzan el 24,15% y los muros reforzados con malla ligera por una cara Mt-R1L alcanzan el 26,38% de la resistencia a corte de un muro reforzado con la técnica convencional por una sola cara, acorde a la resistencia a corte reportada por López et al. (2012). Por otro lado, los muros reforzados con malla de fique ligera por ambas caras Mt-R2L alcanzan el 11% de la resistencia a corte de un muro reforzado con sistema convencional con malla y conectores simples (1.91MPa), resistencia que fue reportada por Sandoval Ortiz (2022). Es importante señalar que existen diferencias en la resistencia de los materiales empleados en la construcción de los muros de estos autores contra la resistencia de los materiales empleados para la construcción de los muros en esta investigación, en el caso de los materiales de López et al. (2012), las unidades de mampostería, el mortero de pega y el mortero de recubrimiento tenían una mayor resistencia a la compresión a la obtenida en la caracterización de los materiales empleados en esta investigación; del mismo modo, la resistencia a la compresión del mortero de pega y mortero de recubrimiento de los muros de Sandoval Ortiz (2022) era mayor a la obtenida para el mortero de pega y mortero de recubrimiento en estos muros.

Por último, mediante la caracterización mecánica de las mallas de fique, se comprobó que el tratamiento con hidróxido de sodio afecta la resistencia de las mallas, así conforme aumenta la concentración del tratamiento se genera una mayor reducción en la resistencia a la tracción. Y un efecto opuesto se genera respecto a la elongación generada en las mallas, dado que conforme aumenta la concentración del tratamiento de hidróxido de sodio aumenta su capacidad de deformación.

## 5.2 Recomendaciones

Considero que una de las recomendaciones más importantes que se debe tener al momento de realizar tratamientos con hidróxido de sodio a las fibras naturales, es la seguridad. Es fundamental, el uso de botas, guantes, gafas de seguridad, máscara de gases y un impermeable de cuerpo completo. El hidróxido de sodio en contacto con la piel puede generar quemaduras.

Del mismo modo, concentraciones del 5% y 7% durante las mezclas producen gases y la reacción es exotérmica, en particular al 7% el perceptible que genera gran cantidad de calor.

Considero que se debe estudiar otro tipo de tratamientos para generar compatibilidad entre la matriz cementicia y las fibras naturales, dado que, al momento de reforzar muros, la cantidad de fibra tratada requiere un volumen significativo de solución para su inmersión por lo que también requerirá una cantidad significativa de NaOH. Del mismo modo, teniendo en cuenta que la fibra posterior al tratamiento debe lavarse con abundante agua, el consumo de agua es significativo y por lo tanto puede generar afectaciones ambientales.

En futuras investigaciones se recomienda evaluar alternativas para anclar los refuerzos a la base y a la viga superior esto con el fin evitar que los esfuerzos fuera del plano generen el volcamiento del muro reforzado; frente a la colocación de la malla de fique se debe plantear que envuelvan el muro, conectando el refuerzo en ambas caras, tomando como guía el anexo 1 del título E.080 "Refuerzo de geomalla en edificaciones de adobe" y se debe acreditar su capacidad sismorresistente en ensayos cíclicos a escala natural, de manera que se pueda profundizar en esta metodología de reforzamiento tomando como base el conocimiento y experiencias que han sido incorporadas en normatividades de otros países.

Por otro lado, acorde a la revisión literaria realizada durante el desarrollo de esta investigación, para efectos de diseño se debe revisar que el reforzamiento de muros al interior de la edificación no produzca que los muros no reforzados alcancen su estado límite de servicio o de falla de manera anticipada, que puedan generar un comportamiento desfavorable e inestable en la estructura, esto debido a que se modifica la rigidez de los elementos que han sido reforzados y se debe garantizar un trabajo conjunto entre los elementos.

# Bibliografía

- Abdullah, A., Jamaludin, S. B., Anwar, M. I., Noor, M. M., & Hussin, K. (2011). Assessment of Physical and Mechanical Properties of Cement Panel Influenced by Treated and Untreated Coconut Fiber Addition. *Physics Procedia*, 22, 263–269. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2011.11.042>
- Acevedo de la Espriella, M. A., De, A., & Espriella, L. A. (2021). *Tratamientos químicos superficiales para el uso de fibras naturales en la construcción: concretos y morteros*.
- Acuña Mejía, D. J. (2007). *Refinamiento y funcionalización de fibras naturales en el desarrollo de un material compuesto de matriz PVC reforzado con fibras lignocelulósicas*. Universidad de los Andes.
- Akil, H. M., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S., Ishak, Z. A. M., & Abu Bakar, A. (2011). Kenaf fiber reinforced composites: A review. In *Materials and Design* (Vol. 32, Issues 8–9, pp. 4107–4121). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.008>
- Alcocer, S. M. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. *Memoria Del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.
- Anfalit. (2002). *Diagnóstico de la industria ladrillera nacional*.
- Arluna, P. G. (2021, September 30). *Fibras textiles - Parte 2 - Características y propiedades*. <https://www.santistaworkwear.com.ar/fibras-textiles-parte-2-caracteristicas-y-propiedades/>.
- Artesanías de Colombia, & Fundación para la orientación familiar. (2014). *Caracterización del Fique (Furcraea andina)*.
- Barbosa Galeano, C. G., & Mayorga Rojas, J. S. (2015). *Caracterización mecánica del concreto reforzado con fibras de fique modificando la matriz cementicia con aditivo a base de humo de sílice*. Universidad Piloto de Colombia.
- Barranzuela Lescano, J. (2014). *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región Piura*. Universidad de Piura.
- Bernat, E., Gil, L., Roca, P., & Escrig, C. (2013). Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. *Construction and Building Materials*, 44, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.006>
- Bonett Díaz Ricardo León. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Universidad Politécnica de Cataluña .

- Bui, T. L., Si Larbi, A., Reboul, N., & Ferrier, E. (2015). Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC. *Composite Structures*, 132, 923–932. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.057>
- Burbano Narváez, E., & Núñez Núñez, D. A. (2017). *Influencia del tratamiento químico de la fibra de fique en las propiedades mecánicas de un material compuesto*. Universidad ECCI .
- Camargo López, M. D. (2022). *Caracterización morfológica de la fibra de fique para uso en obras de bioingeniería*. Universidad Santo Tomás Seccional Tunja .
- Carrillo Trujillo, C. E. (2008). *Comparación de la respuesta sísmica incorporando y desacoplando la mampostería y técnicas de reforzamiento*. Escuela Politécnica del Ejército.
- Castro, C., Palencia, A., Gutiérrez, I., Vargas, G., & Gañán, P. (2007). Determination of optimal alkaline treatment conditions for fique fiber bundles as reinforcement of composites materials. . *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 30(2), 136–142.
- Castro Molano, L. del P., Guzmán Luna, C., & Escalante Hernández, H. (2012). Influence of Particle Size and Temperature on Methane Production From Fique's Bagasse. *ITECKNE*, Vol. 9 No. 2, 72–77.
- Chokshi, S., Parmar, V., Gohil, P., & Chaudhary, V. (2022). Chemical Composition and Mechanical Properties of Natural Fibers. In *Journal of Natural Fibers* (Vol. 19, Issue 10, pp. 3942–3953). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848738>
- Coburn, A., & Spence, R. (2002). *Earthquake Protection* (Vol. 2). John Wiley & Sons, LTD .
- Coudert, L. (2020). *Influencia del tratamiento superficial de las fibras de fique en las propiedades mecánicas del compuesto fibra-matriz cementante [Materiales sostenibles para la construcción civil ]*. Universidad Nacional de Colombia.
- Cubides Torres, D. D. P., Molano Amaya, E. J., Becerra Becerra, J. E., & Bernal Villate, A. F. (2018). Caracterización mineralógica y físico mecánica de los agregados pétreos de las canteras de Santa Lucia, Pie Blanco y Mina San Vicente, usados como materiales de construcción. *L'esprit Ingénieux*, 9, 45–68.
- Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010>
- Duque, D. (2011). *Optimización de los subproductos del Fique*.



- Echeverri E, R. D., Franco M, L. M., & González V, M. R. (2015). *Fique en Colombia*. Fondo Editorial ITM.
- García Carrión, D. F. (2020). *Evaluación de comportamiento mecánico del sistema de construcción de muros en concreto aligerado con poliestireno expandido, implementando muretes*. Universidad de la Salle.
- Giraldo Galvis, J. A., & Mendez Nivia, D. M. (2006). *Evaluación de vulnerabilidad sísmica de viviendas de mampostería en estratos uno y dos según tipificación de la estructura*. [Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental]. Universidad de los Andes.
- Gomes, A., Matsuo, T., Goda, K., & Ohgi, J. (2007). Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(8), 1811–1820.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.04.010>
- Gomez, T. S., Navacerrada, M. A., Díaz, C., & Fernández-Morales, P. (2020). Fique fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. *Applied Acoustics*, 164.  
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107240>
- Hernández Carvajal, Y. C. (2022). *Viabilidad del uso de bandas de PP en el reforzamiento de muros en mampostería no reforzada* [Maestría en construcción ]. Universidad Nacional de Colombia .
- Imbachi Huaca, H., García Angulo, E. G., & Medina Moreno, J. F. (2007). *Implementación de las cales hidráulica y aérea para la realización de morteros de alta resistencia* [Universidad de la Salle]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil/252](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/252)
- Karthi, N., Kumaresan, K., Sathish, S., Gokulkumar, S., Prabhu, L., & Vigneshkumar, N. (2019). An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2828–2834.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>
- Kesikidou, F., & Stefanidou, M. (2019). Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering*, 25, 100786. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100786>
- Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 340). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>
- López, S., Quiroga, P. N., & Torres, N. (2012). *Evaluación del comportamiento de muros de mampostería no reforzada recubierta con morteros reforzados*. [www.asaae.org.br](http://www.asaae.org.br)
- Mancera León, V. (2022). *Revisión teórica del estudio comparativo en bloques de arcilla y cáñamo industrial como alternativa de construcción sostenible*.

- Meriggi, P., De Santis, S., Fares, S., & de Felice, G. (2021). Design of the shear strengthening of masonry walls with fabric reinforced cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122452>
- Ministerio de vivienda construcción y saneamiento. (2017). Refuerzo de geomalla en edificaciones de adobe. In *E-80 Diseño y Construcción con tierra reforzada*.
- Miranda Rodríguez, A. C. (2007). *Proyecto de Grado Materiales Compuestos Estructurales Reforzados con Fique*. Universidad de los Andes.
- Molano Camargo, M. C., & Torres Castellanos, N. (2017). *Prácticas de Laboratorio de Materiales para Obras de ingeniería Civil* (Primera).
- Moreno Jaraba, D. I. (n.d.). *Efecto del tratamiento alcalino y explosión de vapor alcalino sobre las propiedades de la fibra de cumare y su interface con una matriz de PLA*.
- Muñoz Vélez, M. F., Hidalgo Salazar, M. A., & Mina Hernandez, J. H. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2).
- Mwaikambo, L. Y., & Ansell, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(12), 2222–2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460>
- Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.02.014>
- Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Karlos, K., & Papathanasiou, M. (2007). Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Mater Struct*, 40, 1081–1097.
- Pérez Mejía, J. A. (1974). *El fique: Su taxonomía, cultivo y tecnología* (Segunda Edición).
- Pinzón Galvis, S. (2013). *Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique: Vol. XVI* (Issue 61). [www.veoverde.com/2009/07/fi](http://www.veoverde.com/2009/07/fi)
- Ramesh, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H. (2017). Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 79, pp. 558–584). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>
- Rendón, A., & Neyra, L. (2020). *Fibras naturales*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/fibras-naturales>.
- Robusté, E. (1969). *Técnica y práctica de la industria ladrillera* (Vol. 5).
- Rodríguez Almaraya, R., & Pérez García, M. (2000). *Las fibras, clasificación y definición*.

- Rojas, J., Bedoya, M., & Ciro, Y. (2015). Current Trends in the Production of Cellulose Nanoparticles and Nanocomposites for Biomedical Applications. *Cellulose-Fundamental Aspects and Current Trends*.
- Romina Gámez Quiñónez, D., Ricardo, J., Arámbulo, F., Adrián, J., & Valdivieso, R. (2011). Elaboración y Uso de bloques de hormigón y bloques de arcilla en mampostería. Escuela Superior Politécnica de Litoral. Guayaquil, Ecuador.
- Salamanca Correa, R. (1985). Dosificación de morteros. *Ingeniería e Investigación*, 3(2), 17–23.
- Salamanca Correa, R. (2001). *La tecnología de los morteros*.
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta).
- Sandoval Ortiz, O. J. (2022). *Determinación de las características mecánicas de muretes de mampostería simple reforzados con malla de acero y conectores transversales sometidos a carga axial y tensión diagonal*.
- Sathiparan, N. (2015). Mesh type seismic retrofitting for masonry structures: Critical issues and possible strategies. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(9), 1136–1154. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1005160>
- Shabdin, M., Zargarán, M., & Attari, N. K. A. (2018). Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 164, 704–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234>
- Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Mampostería, Pub. L. No. 454, Gaceta Oficial de Ciudad de México (2020).
- Stamboulis, A., Baillie, C. A., Garkhail, S. K., Van Melick, H. G. H., & Peijs, T. (2000). Environmental durability of flax fibres and their composites based on polypropylene matrix. *Applied Composite Materials*, 7(5–6), 273–294. <https://doi.org/10.1023/A:1026581922221>
- Sullcahuamán, J., Fuentes Rojas, C. A., Ramos, M., Pastor Revoredo, A. V., Castro Mandujano, O. N., & Zavaleta Cortijo, J. S. (2007). *Materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal químicamente modificadas*.
- Takeuchi, C. P. (2010). *Comportamiento de la mampostería estructural*. Unidad de Publicaciones, Facultad de Ingeniería .
- Velásquez Restrepo, S. M., Pelaéz Arroyave, G. J., & Giraldo Vásquez, D. H. (n.d.). *Use of vegetable fibers in polymer matrix composites: a review with a view to their application in designing new products*.
- Villareal, L. (2004). *Uso de lodo y papel para la fabricación de ladrillos y tabla roca*. Universidad de Las Américas.

Yardim, Y., & Lalaj, O. (2016). Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing. *Construction and Building Materials*, 102, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.095>

## **Anexo 1: Dimensiones unidades de mampostería.**

A continuación, se relacionan las tablas de las dimensiones de las unidades de mampostería:

<b>C-UN1</b>	<b>Ancho <math>b_u</math> (mm)</b>	<b>longitud <math>l_u</math> (mm)</b>	<b>Altura <math>h_u</math> (mm)</b>
<b>1</b>	119	300	198
<b>2</b>	119	298	197
<b>3</b>	121	299	199
<b>4</b>	121	300	200
<b>Promedio</b>	<b>120,0</b>	<b>299,3</b>	<b>198,7</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,07</b>	<b>1,00</b>	<b>1,30</b>
<b>Max</b>	<b>121</b>	<b>300</b>	<b>200</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>
<b>Min</b>	<b>119</b>	<b>298</b>	<b>197</b>
<b>Variación %</b>	<b>-0,83%</b>	<b>-0,67%</b>	<b>-1,50%</b>

<b>C-UN2</b>	<b>Ancho <math>b_u</math> (mm)</b>	<b>longitud <math>l_u</math> (mm)</b>	<b>Altura <math>h_u</math> (mm)</b>
<b>1</b>	121	300	204
<b>2</b>	124	302	202
<b>3</b>	123	297	203
<b>4</b>	122	297	205
<b>Promedio</b>	<b>122,1</b>	<b>298,7</b>	<b>203,5</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,24</b>	<b>2,46</b>	<b>1,30</b>
<b>Max</b>	<b>124</b>	<b>302</b>	<b>205</b>
<b>Variación %</b>	<b>2,97%</b>	<b>0,67%</b>	<b>2,50%</b>
<b>Min</b>	<b>121</b>	<b>297</b>	<b>202</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>-1,00%</b>	<b>1,00%</b>

C-UN3	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	118	298	198
2	117	297	198
3	120	300	200
4	119	299	200
<b>Promedio</b>	<b>118,5</b>	<b>298,5</b>	<b>199,1</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,22</b>	<b>1,20</b>	<b>0,96</b>
<b>Max</b>	<b>120</b>	<b>300</b>	<b>200</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>
<b>Min</b>	<b>117</b>	<b>297</b>	<b>198</b>
<b>Variación %</b>	<b>-2,50%</b>	<b>-1,00%</b>	<b>-1,00%</b>

C-UN4	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	120	301	194
2	119	302	197
3	121	305	200
4	121	306	201
<b>Promedio</b>	<b>120,2</b>	<b>303,3</b>	<b>198,0</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,18</b>	<b>2,47</b>	<b>2,96</b>
<b>Max</b>	<b>121</b>	<b>306</b>	<b>201</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>2,00%</b>	<b>0,50%</b>
<b>Min</b>	<b>119</b>	<b>301</b>	<b>194</b>
<b>Variación %</b>	<b>-0,83%</b>	<b>0,33%</b>	<b>-3,00%</b>

C-UN5	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	119	306	198
2	119	305	198
3	121	302	199
4	122	302	199
<b>Promedio</b>	<b>120,3</b>	<b>303,5</b>	<b>198,6</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,13</b>	<b>2,22</b>	<b>0,73</b>
<b>Max</b>	<b>122</b>	<b>306</b>	<b>199</b>
<b>Variación %</b>	<b>1,67%</b>	<b>2,00%</b>	<b>-0,50%</b>
<b>Min</b>	<b>119</b>	<b>302</b>	<b>198</b>
<b>Variación %</b>	<b>-0,83%</b>	<b>0,67%</b>	<b>-1,00%</b>

C-UN6	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	120	303	199
2	119	302	199
3	122	306	202
4	120	306	200
<b>Promedio</b>	<b>120,2</b>	<b>304,2</b>	<b>199,9</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,08</b>	<b>1,96</b>	<b>1,66</b>
<b>Max</b>	<b>122</b>	<b>306</b>	<b>202</b>
<b>Variación %</b>	<b>1,67%</b>	<b>2,00%</b>	<b>1,00%</b>
<b>Min</b>	<b>119</b>	<b>302</b>	<b>199</b>
<b>Variación %</b>	<b>-0,83%</b>	<b>0,67%</b>	<b>-0,50%</b>

C-UN7	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	121	304	202
2	121	302	205
3	122	301	205
4	123	303	204
<b>Promedio</b>	<b>121,8</b>	<b>302,5</b>	<b>204,0</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>0,92</b>	<b>1,19</b>	<b>1,10</b>
<b>Max</b>	<b>123</b>	<b>304</b>	<b>205</b>
<b>Variación %</b>	<b>2,50%</b>	<b>1,33%</b>	<b>2,50%</b>
<b>Min</b>	<b>121</b>	<b>301</b>	<b>202</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>0,33%</b>	<b>1,00%</b>

Ab1	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	119	305	197
2	119	303	197
3	120	303	199
4	121	303	199
<b>Promedio</b>	<b>119,7</b>	<b>303,2</b>	<b>197,9</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,23</b>	<b>1,31</b>	<b>1,10</b>
<b>Max</b>	<b>121</b>	<b>305</b>	<b>199</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>1,67%</b>	<b>-0,50%</b>
<b>Min</b>	<b>119</b>	<b>303</b>	<b>197</b>
<b>Variación %</b>	<b>-0,83%</b>	<b>1,00%</b>	<b>-1,50%</b>

Ab2	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	123	297	201
2	123	298	201
3	123	302	203
4	120	307	203
<b>Promedio</b>	<b>122,4</b>	<b>300,8</b>	<b>202,1</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,64</b>	<b>4,49</b>	<b>0,98</b>
<b>Max</b>	<b>123</b>	<b>307</b>	<b>203</b>
<b>Variación %</b>	<b>2,50%</b>	<b>2,33%</b>	<b>1,50%</b>
<b>Min</b>	<b>120</b>	<b>297</b>	<b>201</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,00%</b>	<b>-1,00%</b>	<b>0,50%</b>

Ab3	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	120	295	199
2	121	296	198
3	117	296	200
4	117	298	199
<b>Promedio</b>	<b>118,9</b>	<b>296,1</b>	<b>198,9</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,87</b>	<b>1,22</b>	<b>0,84</b>
<b>Max</b>	<b>121</b>	<b>298</b>	<b>200</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>-0,67%</b>	<b>0,00%</b>
<b>Min</b>	<b>117</b>	<b>295</b>	<b>198</b>
<b>Variación %</b>	<b>-2,50%</b>	<b>-1,67%</b>	<b>-1,00%</b>

Ab4	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	122	302	202
2	122	301	201
3	121	303	203
4	122	301	202
<b>Promedio</b>	<b>121,7</b>	<b>301,7</b>	<b>201,9</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>0,38</b>	<b>0,75</b>	<b>0,72</b>
<b>Max</b>	<b>122</b>	<b>303</b>	<b>203</b>
<b>Variación %</b>	<b>1,67%</b>	<b>1,00%</b>	<b>1,50%</b>
<b>Min</b>	<b>121</b>	<b>301</b>	<b>201</b>
<b>Variación %</b>	<b>0,83%</b>	<b>0,33%</b>	<b>0,50%</b>



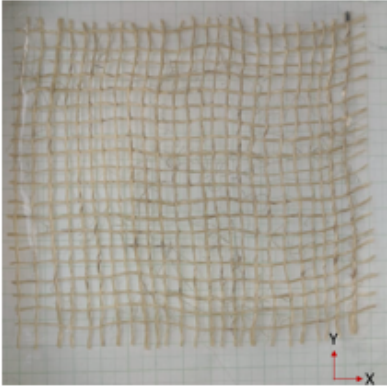

Ab5	Ancho $b_u$ (mm)	longitud $l_u$ (mm)	Altura $h_u$ (mm)
1	121	301	197
2	122	301	198
3	118	302	198
4	119	299	199
<b>Promedio</b>	<b>120,1</b>	<b>300,7</b>	<b>198,0</b>
<b>Des. Estándar</b>	<b>1,74</b>	<b>1,52</b>	<b>0,80</b>
<b>Max</b>	<b>122</b>	<b>302</b>	<b>199</b>
<b>Variación %</b>	<b>1,67%</b>	<b>0,67%</b>	<b>-0,50%</b>
<b>Min</b>	<b>118</b>	<b>299</b>	<b>197</b>
<b>Variación %</b>	<b>-1,67%</b>	<b>-0,33%</b>	<b>-1,50%</b>

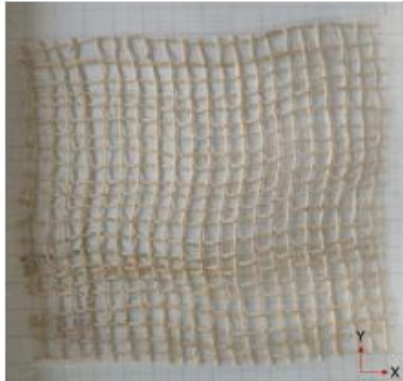
<i>Medida tabiques internos</i>	C-UN 1	C-UN 2	C-UN 3	C-UN 4	C-UN 5
<b>1 (mm)</b>	7,04	8,62	7,09	7,75	8,46
<b>2 (mm)</b>	8,06	7,99	7,73	7,52	8,49
<b>3 (mm)</b>	8,37	9,47	7,15	7,98	7,4
<b>4 (mm)</b>	7,59	8,51	7,62	9,01	7,56
<b>Promedio (mm)</b>	7,77	8,65	7,40	8,07	7,98
<b>Min (mm)</b>	7,04	7,99	7,09	7,52	7,4


<i>Medida tabiques internos</i>	Ab1	Ab2	Ab3	Ab4	Ab5
<b>1 (mm)</b>	9	8,5	7,5	9,45	8,2
<b>2 (mm)</b>	8,03	9,4	7,7	7,38	7,95
<b>3 (mm)</b>	8,2	8,64	7,6	7,92	7,72
<b>4 (mm)</b>	8,03	8,04	9,37	7,71	7,05
<b>Promedio (mm)</b>	8,32	8,65	8,04	8,12	7,73
<b>Min (mm)</b>	8,03	8,04	7,5	7,38	7,05


## Anexo 2: Caracterización física-fique


### Anexo 2.1 Separación y diámetro entre hiladas


L-1	Sy (mm)	Sx (mm)	$\varnothing_{fy}$ (mm)	$\varnothing_{fx}$ (mm)	REGISTRO FOTOGRÁFICO
1	5,420	3,647	1,511	0,857	
2	4,927	4,534	0,854	0,854	
3	5,321	4,731	0,887	0,857	
4	5,518	4,139	1,15	1,216	
5	5,321	4,040	1,25	1,035	
6	4,336	3,942	0,92	0,839	
7	4,633	5,125	0,723	0,739	
8	5,321	4,237	0,953	0,888	
9	4,730	3,943	0,821	0,985	
10	4,830	5,026	0,887	0,788	
<b>Promedio</b>	5,036	4,336	0,995	0,906	
<b>Desviación Estándar</b>	0,398	0,496	0,238	0,139	
L-2	Sy (mm)	Sx (mm)	$\varnothing_{fy}$ (mm)	$\varnothing_{fx}$ (mm)	REGISTRO FOTOGRÁFICO
1	4,730	5,321	1,054	1,084	
2	3,942	4,931	1,383	1,084	
3	5,716	5,128	1,12	0,985	
4	4,730	4,336	0,99	0,739	
5	5,716	4,927	0,94	1,133	
6	4,730	5,124	0,79	0,887	
7	3,350	4,927	0,936	0,985	
8	4,730	4,336	0,887	0,641	
9	3,548	3,548	0,936	0,936	
10	5,518	6,307	0,985	0,788	
<b>Promedio</b>	4,671	4,889	1,001	0,926	
<b>Desviación Estándar</b>	0,847	0,725	0,161	0,162	


<i>L-3</i>	<i>S<sub>y</sub> (mm)</i>	<i>S<sub>x</sub> (mm)</i>	<i>Ø<sub>fy</sub> (mm)</i>	<i>Ø<sub>fx</sub> (mm)</i>	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>
1	4,927	4,730	0,887	1,085	
2	4,928	4,731	0,839	0,739	
3	4,829	4,730	0,790	1,035	
4	3,055	5,421	0,937	0,987	
5	3,942	4,632	0,937	0,790	
6	6,406	4,927	0,739	0,790	
7	3,548	4,730	1,035	0,987	
8	4,731	4,436	1,331	1,183	
9	4,139	4,336	0,985	1,085	
10	4,633	5,421	0,985	0,641	
<b>Promedio</b>	4,514	4,809	0,947	0,932	
<b>Desviación Estándar</b>	0,920	0,362	0,164	0,179	


<i>L-4</i>	<i>S<sub>y</sub> (mm)</i>	<i>S<sub>x</sub> (mm)</i>	<i>Ø<sub>fy</sub> (mm)</i>	<i>Ø<sub>fx</sub> (mm)</i>	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>
1	5,518	4,533	1,134	0,936	
2	5,124	5,518	1,035	0,788	
3	4,533	2,759	1,084	1,084	
4	3,942	4,336	0,987	0,987	
5	3,548	3,153	0,838	0,887	
6	4,533	4,336	1,133	0,987	
7	4,139	2,168	1,085	0,741	
8	4,533	4,533	1,183	1,38	
9	3,745	4,336	1,43	1,184	
10	4,730	4,336	1,331	0,739	
<b>Promedio</b>	4,435	4,001	1,124	0,971	
<b>Desviación Estándar</b>	0,611	0,997	0,167	0,204	


<i>L-5</i>	<i>S<sub>y</sub> (mm)</i>	<i>S<sub>x</sub> (mm)</i>	<i>Ø<sub>fy</sub> (mm)</i>	<i>Ø<sub>fx</sub> (mm)</i>	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>
1	6,504	4,139	1,494	0,934	
2	4,533	4,533	0,934	1,308	
3	4,730	4,533	1,214	0,982	
4	6,507	4,927	1,074	0,842	
5	3,350	5,518	1,027	1,262	
6	5,124	5,124	1,541	0,934	
7	4,730	4,533	1,167	0,982	
8	3,942	4,730	1,121	0,846	
9	4,730	4,730	1,214	1,074	
10	2,168	3,548	1,168	1,074	
<b>Promedio</b>	4,632	4,632	1,195	1,024	
<b>Desviación Estándar</b>	1,312	0,535	0,191	0,159	

<i>D-1</i>	<i>SY (mm)</i>	<i>SX (mm)</i>	$\varnothing_{fy}$ (mm)	$\varnothing_{fx}$ (mm)	<i>REGISTRO FOTOGRÁFICO</i>
1	3,538	2,549	2,263	2,828	
2	3,111	3,111	1,98	2,404	
3	3,397	2,828	2,545	1,838	
4	3,818	3,960	2,83	2,404	
5	3,818	3,256	1,98	2,691	
6	4,669	2,832	1,98	2,263	
7	3,535	2,121	2,121	2,97	
8	3,394	2,263	1,697	2,121	
9	3,111	1,838	2,408	1,556	
10	2,828	1,980	2,842	1,98	
<i>Promedio</i>	3,522	2,674	2,264	2,306	
<i>Desviación Estándar</i>	0,510	0,659	0,385	0,448	

<i>D-2</i>	<i>SY (mm)</i>	<i>SX (mm)</i>	$\varnothing_{fy}$ (mm)	$\varnothing_{fx}$ (mm)	<i>REGISTRO FOTOGRÁFICO</i>
1	4,527	2,476	2,263	2,616	
2	3,182	2,263	2,334	2,545	
3	2,970	2,758	2,192	1,769	
4	3,182	1,981	2,40	1,980	
5	3,111	1,981	2,12	2,334	
6	3,535	2,476	2,545	2,193	
7	2,617	2,052	3,041	2,758	
8	2,616	1,628	2,333	2,052	
9	3,111	2,263	2,192	3,252	
10	3,465	2,333	1,273	2,122	
<i>Promedio</i>	3,232	2,221	2,270	2,362	
<i>Desviación Estándar</i>	0,546	0,321	0,438	0,438	

<i>D-3</i>	<i>SY (mm)</i>	<i>SX (mm)</i>	$\varnothing_{fy}$ (mm)	$\varnothing_{fx}$ (mm)	<i>REGISTRO FOTOGRÁFICO</i>
1	3,819	2,310	2,593	2,263	
2	2,875	2,829	2,123	1,886	
3	3,724	3,348	2,027	2,121	
4	3,488	2,687	2,26	1,933	
5	4,290	1,650	1,98	2,357	
6	3,960	3,206	1,885	2,5	
7	3,252	1,556	1,744	1,508	
8	3,535	1,838	1,839	2,404	
9	2,640	3,064	2,215	2,404	
10	3,064	2,828	1,838	2,215	
<i>Promedio</i>	3,465	2,532	2,051	2,159	
<i>Desviación Estándar</i>	0,512	0,655	0,256	0,306	

<i>D-4</i>	<i>SY (mm)</i>	<i>SX (mm)</i>	$\varnothing_{fy}(mm)$	$\varnothing_{fx}(mm)$	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>
1	4,243	2,875	2,404	2,736	
2	4,526	2,687	1,65	2,404	
3	4,596	2,121	1,698	2,215	
4	3,889	2,451	1,89	2,168	
5	3,112	2,687	2,36	2,263	
6	2,829	1,697	2,64	1,698	
7	3,441	2,781	2,263	2,263	
8	2,215	1,697	2,074	2,546	
9	3,678	2,593	2,357	2,216	
10	3,254	2,593	2,451	2,357	
<b>Promedio</b>	3,578	2,418	2,178	2,287	
<b>Desviación Estándar</b>	0,763	0,431	0,336	0,271	

<i>D-5</i>	<i>SY (mm)</i>	<i>SX (mm)</i>	$\varnothing_{fy}(mm)$	$\varnothing_{fx}(mm)$	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>
1	3,818	2,723	1,874	3,04	
2	3,441	2,157	2,722	1,909	
3	4,054	2,157	2,087	1,697	
4	2,934	1,874	1,98	2,440	
5	3,712	2,723	2,86	2,333	
6	2,687	3,111	2,086	2,758	
7	3,818	3,889	2,015	2,192	
8	3,394	2,086	2,581	1,485	
9	3,394	2,793	2,369	2,369	
10	3,076	2,793	2,263	1,98	
<b>Promedio</b>	3,433	2,631	2,284	2,220	
<b>Desviación Estándar</b>	0,434	0,596	0,339	0,473	

**Anexo 2.2 Longitudes en el sentido X y sentido Y**

<b>Muestra</b>	<b>Lfx1</b>	<b>Lfx2</b>	<b>Lfx3</b>	<b>Lfxprom</b>	<b>Lfy1</b>	<b>Lfy2</b>	<b>Lfy3</b>	<b>Lfyprom</b>
<b>D1</b>	128	129	129	128	125	126	124	125
<b>D2</b>	127	129	128	128	121	121	121	121
<b>D3</b>	129	129	127	128	128	131	130	130
<b>D4</b>	133	132	134	133	119	121	118	119
<b>D5</b>	115	121	119	118	119	119	120	119

<b>Muestra</b>	<b>Lfx1</b>	<b>Lfx2</b>	<b>Lfx3</b>	<b>Lfxprom</b>	<b>Lfy1</b>	<b>Lfy2</b>	<b>Lfy3</b>	<b>Lfyprom</b>
<b>L1</b>	130	132	133	132	127	124	123	125
<b>L2</b>	132	130	134	132	130	129	134	131
<b>L3</b>	123	126	123	124	119	123	124	122
<b>L4</b>	120	122	119	120	118	117	116	117
<b>L5</b>	117	117	117	117	123	122	121	122

## Anexo 3: Caracterización mecánica- fique

Probeta	No. Hiladas	Área (m2)	Longitud calibración (mm)
0%-1-D	5	1.2E-05	99.33
0%-2-D	5	1.3E-05	98.90
0%-3-D	5	1.5E-05	102.33
1%-1-D	4	1.4E-05	103.33
1%-2-D	4	1.0E-05	99.33
1%-3-D	4	1.2E-05	101.00
3%-1-D	4	1.5E-05	101.67
3%-2-D	4	1.6E-05	101.33
3%-3-D	4	1.5E-05	104.33
5%-1-D	5	2.0E-05	104.40
5%-2-D	4	1.4E-05	103.13
5%-3-D	4	1.8E-05	102.23
7%-1-D	4	1.2E-05	104.63
7%-2-D	4	1.5E-05	103.67
7%-3-D	4	1.8E-05	101.17
0%-1-L	5	6.7E-06	101.00
0%-2-L	5	6.3E-06	98.58
0%-3-L	5	5.5E-06	99.47
1%-1-L	5	3.8E-06	105.70
1%-2-L	5	4.3E-06	103.37
1%-3-L	5	3.4E-06	107.93
3%-1-L	5	3.5E-06	107.63
3%-2-L	5	4.4E-06	107.33
3%-3-L	5	3.8E-06	102.47
5%-1-L	5	3.9E-06	99.79
5%-2-L	5	4.1E-06	102.33
5%-3-L	5	3.1E-06	101.00
7%-1-L	5	4.2E-06	101.27
7%-2-L	5	2.7E-06	101.30
7%-3-L	5	3.2E-06	105.10

Probeta	No. Hiladas	Fuerza de Ruptura (N)	Desplazamiento Extensómetro (mm)	Desplazamiento Cabezal (mm)
0%-1-D	5	644,22	2,40	7,32
0%-2-D	5	719,38	3,96	9,41
0%-3-D	5	686,09	3,08	8,07
1%-1-D	4	582,03	2,98	9,76
1%-2-D	4	444,38	3,86	8,33
1%-3-D	4	483,91	2,74	8,99
3%-1-D	4	408,75	3,53	9,95
3%-2-D	4	545,47	3,57	10,35
3%-3-D	4	537,97	3,88	10,60
5%-1-D	5	759,22	5,15	15,00
5%-2-D	4	427,03	3,83	11,73
5%-3-D	4	484,84	4,13	12,69
7%-1-D	4	420,31	4,61	13,99
7%-2-D	4	510,00	5,47	14,88
7%-3-D	4	429,38	5,08	16,54
0%-1-L	5	510,63	2,57	7,33
0%-2-L	5	575,47	3,29	9,20
0%-3-L	5	481,41	3,01	7,62
1%-1-L	5	309,84	5,02	10,17
1%-2-L	5	373,13	5,20	11,10
1%-3-L	5	236,25	5,80	9,85
3%-1-L	5	297,03	5,87	13,42
3%-2-L	5	332,19	7,69	13,99
3%-3-L	5	280,78	4,77	12,21
5%-1-L	5	347,50	5,59	10,78
5%-2-L	5	292,97	3,55	12,16
5%-3-L	5	226,25	4,69	14,57
7%-1-L	5	235,63	5,59	12,46
7%-2-L	5	201,88	9,35	16,99
7%-3-L	5	214,22	6,20	18,81



## Anexo 4: Dimensiones muros de tracción diagonal

Especimen	Altura muros de tracción diagonal (mm)			
	<i>hmt 1</i>	<i>hmt 2</i>	<i>hmt 3</i>	<i>htm Prom</i>
<i>Mt-MP-1</i>	1103	1102	1090	1098
<i>Mt-MP-2</i>	1085	1090	1088	1088
<i>Mt-MP-3</i>	1093	1086	1093	1091
<i>Mt-MP-4</i>	1082	1082	1090	1085
<i>Mt-R1L-1</i>	1093	1093	1092	1093
<i>Mt-R1L-2</i>	1094	1091	1081	1089
<i>Mt-R1L-3</i>	1082	1094	1105	1094
<i>Mt-R1L-4</i>	1100	1098	1088	1095
<i>Mt-R1D-1</i>	1086	1089	1092	1089
<i>Mt-R1D-2</i>	1083	1086	1090	1086
<i>Mt-R1D-3</i>	1087	1092	1103	1094
<i>Mt-R1D-4</i>	1080	1085	1098	1088
<i>Mt-R2L-1</i>	1084	1086	1087	1086
<i>Mt-R2L-2</i>	1085	1096	1090	1090
<i>Mt-R2L-3</i>	1089	1092	1096	1092
<i>Mt-R2L-4</i>	1075	1087	1085	1082

Especimen	Longitud de muros a tracción diagonal (mm)			
	<i>lmt1</i>	<i>lmt2</i>	<i>lmt3</i>	<i>lmt Prom</i>
<i>Mt-MP-1</i>	1092	1090	1091	1091
<i>Mt-MP-2</i>	1086	1086	1093	1088
<i>Mt-MP-3</i>	1095	1101	1093	1096
<i>Mt-MP-4</i>	1095	1089	1097	1094
<i>Mt-R1L-1</i>	1092	1095	1100	1096
<i>Mt-R1L-2</i>	1090	1086	1083	1086
<i>Mt-R1L-3</i>	1099	1098	1099	1099
<i>Mt-R1L-4</i>	1102	1102	1087	1097
<i>Mt-R1D-1</i>	1091	1090	1091	1091
<i>Mt-R1D-2</i>	1091	1089	1090	1090
<i>Mt-R1D-3</i>	1097	1093	1092	1094
<i>Mt-R1D-4</i>	1091	1085	1090	1089
<i>Mt-R2L-1</i>	1085	1089	1091	1088
<i>Mt-R2L-2</i>	1094	1096	1100	1097
<i>Mt-R2L-3</i>	1085	1086	1086	1086
<i>Mt-R2L-4</i>	1090	1093	1084	1089

<i>Espécimen</i>	<i>Espesor muros a tracción diagonal (mm)</i>			
	<i>bmt1</i>	<i>bmt2</i>	<i>bmt3</i>	<i>bmt Prom</i>
<i>Mt-MP-1</i>	120	119	120	120
<i>Mt-MP-2</i>	122	120	123	121
<i>Mt-MP-3</i>	122	122	121	121
<i>Mt-MP-4</i>	120	122	119	121
<i>Mt-R1L-1</i>	148	146	144	146
<i>Mt-R1L-2</i>	154	148	152	152
<i>Mt-R1L-3</i>	130	132	134	132
<i>Mt-R1L-4</i>	142	135	141	139
<i>Mt-R1D-1</i>	148	147	157	151
<i>Mt-R1D-2</i>	144	148	144	145
<i>Mt-R1D-3</i>	148	150	164	154
<i>Mt-R1D-4</i>	137	137	136	136
<i>Mt-R2L-1</i>	152	152	150	151
<i>Mt-R2L-2</i>	171	174	175	174
<i>Mt-R2L-3</i>	146	154	168	156
<i>Mt-R2L-4</i>	147	166	142	152

<i>Espécimen</i>	<i>Altura de celdas Columna 1 (mm)</i>					
	<i>hc1</i>	<i>hc2</i>	<i>hc3</i>	<i>hc4</i>	<i>hc5</i>	<i>hcprom 1</i>
<i>Mt-MP-1</i>	55,22	56,76	54,82	55,36	53,73	55,18
<i>Mt-MP-2</i>	57,47	55,91	56,37	55,89	55,20	56,17
<i>Mt-MP-3</i>	57,46	51,97	55,37	56,03	54,75	55,12
<i>Mt-MP-4</i>	56,27	51,11	56,53	55,75	55,68	55,07
<i>Mt-R1L-1</i>	50,53	49,32	51,43	56,61	55,99	52,78
<i>Mt-R1L-2</i>	55,71	52,53	56,17	56,70	57,19	55,66
<i>Mt-R1L-3</i>	55,38	47,87	55,80	56,58	55,44	54,21
<i>Mt-R1L-4</i>	55,98	51,75	55,10	54,40	55,24	54,49
<i>Mt-R1D-1</i>	56,04	57,00	51,05	55,21	55,47	54,95
<i>Mt-R1D-2</i>	56,53	56,15	57,22	54,97	55,07	55,99
<i>Mt-R1D-3</i>	54,12	54,78	53,19	56,63	52,43	54,23
<i>Mt-R1D-4</i>	52,96	55,07	54,77	51,97	55,97	54,15
<i>Mt-R2L-1</i>	57,11	55,46	55,68	55,07	56,12	55,89
<i>Mt-R2L-2</i>	56,20	57,12	56,57	56,17	55,59	56,33
<i>Mt-R2L-3</i>	53,44	53,56	51,70	51,24	55,77	53,14
<i>Mt-R2L-4</i>	58,49	52,85	52,04	54,22	54,49	54,42

<i>Espécimen</i>	<i>Altura de celdas Columna 2 (mm)</i>					
	<i>hc1</i>	<i>hc2</i>	<i>hc3</i>	<i>hc4</i>	<i>hc5</i>	<i>hcprom 2</i>
<i>Mt-MP-1</i>	56,88	56,17	55,55	55,00	56,37	55,99
<i>Mt-MP-2</i>	54,24	56,63	56,92	52,10	54,58	54,89
<i>Mt-MP-3</i>	55,40	56,04	56,10	54,68	56,81	55,81
<i>Mt-MP-4</i>	56,04	55,01	56,35	54,11	56,89	55,68
<i>Mt-R1L-1</i>	56,71	49,74	52,24	55,66	56,69	54,21
<i>Mt-R1L-2</i>	55,90	55,85	52,84	53,65	54,76	54,60
<i>Mt-R1L-3</i>	56,26	48,39	50,97	51,82	56,62	52,81
<i>Mt-R1L-4</i>	49,42	56,40	55,27	52,23	55,22	53,71
<i>Mt-R1D-1</i>	56,97	54,82	55,03	55,19	56,23	55,65
<i>Mt-R1D-2</i>	56,51	56,98	55,14	55,10	55,72	55,89
<i>Mt-R1D-3</i>	53,43	54,70	52,76	56,62	55,77	54,66
<i>Mt-R1D-4</i>	50,84	54,30	55,20	57,07	56,82	54,85
<i>Mt-R2L-1</i>	57,48	55,76	55,38	58,19	56,47	56,66
<i>Mt-R2L-2</i>	55,41	56,29	55,38	57,46	55,83	56,07
<i>Mt-R2L-3</i>	54,01	56,62	55,59	55,62	55,51	55,47
<i>Mt-R2L-4</i>	54,73	50,54	50,60	54,00	53,38	52,65

<i>Espécimen</i>	<i>Ancho de celdas Columna 1 (mm)</i>					
	<i>ac1</i>	<i>ac2</i>	<i>ac3</i>	<i>ac4</i>	<i>ac5</i>	<i>acprom 1</i>
<i>Mt-MP-1</i>	46,89	44,98	45,51	43,79	46,45	45,52
<i>Mt-MP-2</i>	47,04	45,48	46,78	44,95	46,10	46,07
<i>Mt-MP-3</i>	45,20	45,48	46,65	45,99	45,81	45,83
<i>Mt-MP-4</i>	44,18	45,32	46,60	45,78	46,40	45,66
<i>Mt-R1L-1</i>	44,48	46,58	46,00	46,72	45,20	45,80
<i>Mt-R1L-2</i>	45,82	46,92	45,17	46,25	46,83	46,20
<i>Mt-R1L-3</i>	46,31	45,96	47,26	46,03	46,19	46,35
<i>Mt-R1L-4</i>	47,24	45,55	46,09	45,31	45,33	45,90
<i>Mt-R1D-1</i>	46,34	46,12	46,53	46,20	46,53	46,34
<i>Mt-R1D-2</i>	48,65	45,94	45,26	44,45	45,53	45,97
<i>Mt-R1D-3</i>	45,64	46,16	45,46	46,62	45,70	45,92
<i>Mt-R1D-4</i>	45,25	46,53	46,06	45,62	45,42	45,78
<i>Mt-R2L-1</i>	46,85	43,63	44,91	45,26	44,52	45,03
<i>Mt-R2L-2</i>	45,22	46,83	46,10	47,50	46,08	46,35
<i>Mt-R2L-3</i>	46,85	46,13	46,02	45,43	46,20	46,13
<i>Mt-R2L-4</i>	46,86	45,28	44,06	45,03	43,07	44,86

<i>Espécimen</i>	<i>Ancho de celdas Columna 2 (mm)</i>					
	<i>ac1</i>	<i>ac2</i>	<i>ac3</i>	<i>ac4</i>	<i>ac5</i>	<i>acprom 2</i>
<i>Mt-MP-1</i>	46,55	45,70	44,10	44,49	46,65	45,50
<i>Mt-MP-2</i>	46,32	46,21	47,00	45,06	46,17	46,15
<i>Mt-MP-3</i>	46,28	45,11	47,00	47,34	45,77	46,30
<i>Mt-MP-4</i>	46,43	44,78	46,66	44,80	46,47	45,83
<i>Mt-R1L-1</i>	43,40	45,76	46,47	45,78	45,93	45,47
<i>Mt-R1L-2</i>	45,47	45,75	45,85	46,01	46,10	45,84
<i>Mt-R1L-3</i>	45,98	45,44	46,38	45,64	45,77	45,84
<i>Mt-R1L-4</i>	49,22	46,05	45,59	45,08	45,60	46,31
<i>Mt-R1D-1</i>	47,75	46,26	43,69	46,38	46,42	46,10
<i>Mt-R1D-2</i>	46,61	46,97	45,47	44,96	45,32	45,87
<i>Mt-R1D-3</i>	46,97	44,84	44,92	45,92	45,97	45,72
<i>Mt-R1D-4</i>	46,79	45,97	46,66	45,99	44,88	46,06
<i>Mt-R2L-1</i>	47,45	45,38	46,62	46,17	45,93	46,31
<i>Mt-R2L-2</i>	45,43	47,19	45,32	46,50	46,12	46,11
<i>Mt-R2L-3</i>	45,61	45,54	45,14	46,22	46,87	45,88
<i>Mt-R2L-4</i>	45,43	45,33	44,60	44,66	46,42	45,29

<i>Espécimen</i>	<i>Cantidad Vacíos x columna</i>	$A_{Vc1}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{Vc2}$ (mm <sup>2</sup> )	$AT_{Vc1}$ (mm <sup>2</sup> )	$AT_{Vc2}$ (mm <sup>2</sup> )	$AT_V$ (mm <sup>2</sup> )
<i>Mt-MP-1</i>	10	2512	2548	25119	25476	50595
<i>Mt-MP-2</i>	10	2588	2533	25877	25335	51211
<i>Mt-MP-3</i>	10	2526	2584	25257	25838	51096
<i>Mt-MP-4</i>	10	2514	2552	25142	25517	50659
<i>Mt-R1L-1</i>	10	2417	2465	24169	24647	48817
<i>Mt-R1L-2</i>	10	2571	2503	25714	25026	50740
<i>Mt-R1L-3</i>	10	2513	2421	25128	24210	49338
<i>Mt-R1L-4</i>	10	2501	2487	25015	24871	49886
<i>Mt-R1D-1</i>	10	2547	2565	25468	25654	51122
<i>Mt-R1D-2</i>	10	2574	2563	25735	25635	51370
<i>Mt-R1D-3</i>	10	2490	2499	24900	24991	49891
<i>Mt-R1D-4</i>	10	2479	2526	24787	25261	50048
<i>Mt-R2L-1</i>	10	2517	2624	25169	26237	51406
<i>Mt-R2L-2</i>	10	2611	2586	26107	25857	51964
<i>Mt-R2L-3</i>	10	2451	2545	24512	25447	49960
<i>Mt-R2L-4</i>	10	2441	2384	24412	23844	48256