



**DISEÑO ÓPTIMO DE REFUERZO DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL
USANDO FIBRAS DE FURCRAEA ANDINA “FIQUE”**

**OSCAR GIOVANNY ANGARITA RIBERO
JUAN SEBASTIÁN URIBE ROA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

**DISEÑO ÓPTIMO DE REFUERZO DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL USANDO
FIBRAS DE FURCRAEA ANDINA “FIQUE”**

**PROYECTO DE GRADO
MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**OSCAR GIOVANNY ANGARITA RIBERO
JUAN SEBASTIÁN URIBE ROA**

**DIRECTOR DE PROYECTO:
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
INGENIERO CIVIL, PhD. En Ingeniería de Estructuras**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2011**

A dios por darme las fuerzas necesarias para sortear los obstáculos presentados a lo largo de este proceso.

A mis padres Alcides Angarita Ardila y Elsa Ribero Tobón, a mis hermanas Claudia Tatiana Angarita Ribero y Adriana Marcela Angarita Ribero por su apoyo y confianza incondicional durante la realización de este proyecto.

A todos aquellos estudiantes de ingeniería civil que quieren aportar de a poco para que la ingeniería Colombiana crezca cada día más y sea un reflejo de eficiencia ante el mundo.

Oscar Giovanny Angarita Ribero.

A Dios.

A mis padres Mabel Roa Forero y Luis Jesús Uribe Carvajal Q.D.E.P, a mi hermana María Paula Uribe Roa, y demás familiares que con su apoyo y cariño incondicional hicieron posible este logro.

A todos los amigos y compañeros que a lo largo de este camino me han acompañado y han sido de gran ayuda para sobrellevar las cosas buenas y malas durante este proceso de formación académico y personal, por ellos quisiera hacer un brindis simbólico muy especial “por lo de siempre”, el que lo entendió, lo entendió.

Juan Sebastián Uribe Roa

AGRADECIMIENTOS

Es de gran importancia reconocer la ayuda que de una u otra manera se recibió en el transcurso del desarrollo de este proyecto, es por esto que nos gustaría expresar y dar el reconocimiento merecido a todos aquellos que aportaron con su colaboración.

En primer lugar agradecemos a nuestras familias, las cuales nos brindaron su apoyo y soporte incondicional en cada etapa de nuestra formación como ingenieros y aún más importante como personas, gracias a ellos logramos culminar exitosamente nuestros estudios de pregrado y este proyecto de investigación, junto con el patrocinio brindado por Coinvecol S.A.S.

Además es importante resaltar la colaboración recibida por parte de nuestro director de proyecto el Ingeniero Oscar Javier Begambre Carrillo, junto con el Ingeniero Ricardo Alfredo Cruz de la escuela de Ingeniería Civil, quienes estuvieron al tanto del desarrollo de este estudio. Así como a la ingeniera Francy Yubith Patiño Oicatá quien con su aporte fue de gran ayuda.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Mecánica especialmente a los ingenieros Omar Gélvez y Carlos Borrás, así como al estudiante Nelson Jaimes, por su colaboración en la elaboración del montaje experimental.

Para finalizar, agradecemos a los laboratoristas encargados de la manipulación de los equipos pertenecientes al edificio Álvaro Beltrán, Jaime y Jairo, quienes nos colaboraron en todo momento para lograr la culminación exitosa de esta meta.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	23
OBJETIVO GENERAL	23
OBJETIVOS ESPECIFICOS	23
1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	25
1.1. RESEÑA HISTÓRICA COMUNA 14 “MORRORICO”	25
1.2. MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL	27
1.2.1. Descripción general de la mampostería	27
1.2.2. Unidades	28
1.2.3. Mortero de pega	29
1.2.4. Comportamiento de la mampostería como material compuesto	30
1.3. FIBRAS NATURALES	31
1.3.1. Generalidades de las Fibras Naturales	31
1.3.2. Furcraea andina “fique”	31
1.4. REFUERZO CON FIBRAS PARA LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL	32
1.5. ANÁLISIS NUMÉRICO	34
1.5.1. Método de elementos finitos	34
1.5.2. Software de simulación de estructuras MIDAS GEN	36
2. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN, CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	37
2.1. VISITA A LA COMUNA 14 “MORRORICO”	37
2.2. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL COMUNA 14 “MORRORICO”	41
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	43
2.3.1. Ensayos de compresión del mortero de pega	43
2.3.2. Ensayos a compresión del ladrillo temosa	45
2.3.3. Pruebas a tracción de la Furcraea andina “fique”	48
2.3.4. Definición del pegante para la interfaz del refuerzo	49
2.4. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	51
2.4.1. Ensayo Pseudo Estático	51
2.4.2. Ensayo a compresión diagonal	53

2.4.3.	Condiciones de Laboratorio	54
2.4.4.	Esquema experimental	56
2.4.5.	Construcción de especímenes	58
3.	DEFINICIÓN DE CARGAS Y ANÁLISIS DE REFUERZO	62
3.1.	ANÁLISIS DE FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE	62
3.2.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL DE LOS MUROS SEGÚN LA NSR-10	64
3.3.	COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA TEÓRICA CONTRA LA RESISTENCIA SOLICITADA	70
3.4.	MODELO NUMÉRICO CUALITATIVO	72
3.4.1.	Descripción y construcción	72
3.4.2.	Análisis de un Muro de tamaño real	76
3.4.3.	Análisis de un Murete	78
3.5.	ANÁLISIS DEL REFUERZO	79
4.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	83
4.1.	RESULTADOS MURETE TIPO I	83
4.2.	RESULTADOS MURETE TIPO II	86
4.3.	RESULTADOS MURETE TIPO III	89
4.4.	RESULTADOS MURETE TIPO IV	91
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
5.1.	COMPARACIÓN FUERZA - DESPLAZAMIENTO PARA CADA TIPO DE MURETE	94
5.2.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE FUERZAS Y ESFUERZOS MÁXIMOS ENTRE CADA TIPO DE MURETE	99
5.3.	ANÁLISIS DE LA RELACIÓN COSTO – BENEFICIO DEL REFUERZO	103
5.3.1.	Análisis cuantitativo	104
5.3.2.	Análisis cualitativo	106
	CONCLUSIONES	108
	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	110
	BIBLIOGRAFÍA	111
	ANEXOS	114

TABLAS

	Pág
<i>Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o proporción.</i>	29
<i>Tabla 2. Resultados ensayos a compresión del mortero</i>	44
<i>Tabla 3. Resultados ensayos a compresión del ladrillo posición soga</i>	46
<i>Tabla 4. Resultados ensayos a compresión del ladrillo posición vertical</i>	47
<i>Tabla 5. Dimensiones de la probeta saco de fique tupido número 7, tres líneas de un solo uso</i>	49
<i>Tabla 6. Resultados caracterización saco de fique tupido número 7, tres líneas de un solo uso</i>	49
<i>Tabla 7. Propiedades de los especímenes</i>	102
<i>Tabla 8. Propiedades de los especímenes</i>	102
<i>Tabla 9. Cálculo costo/m² de refuerzo de fique sencillo a 90°</i>	104
<i>Tabla 10. Cálculo costo/m² de refuerzo de fique doble a 90°</i>	104
<i>Tabla 11. Cálculo costo/m² de refuerzo de fique sencillo a 45°</i>	105

FIGURAS

	<i>pág</i>
<i>Figura 1. Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas o unidades</i>	28
<i>Figura 2. Unidad básica de muro de mampostería</i>	30
<i>Figura 3 . Falla de un muro reforzado con FRP</i>	33
<i>Figura 4 . Elemento finito triangular plano</i>	34
<i>Figura 5. Mallas de elementos finitos triangulares generados por FEMLAB</i>	35
<i>Figura 6. Contorno de tensiones en estructura de mampostería</i>	36
<i>Figura 7. Ingreso a sendero peatonal, comuna 14 “Morrórico”</i>	39
<i>Figura 8. Sendero peatonal, comuna 14 “Morrórico”</i>	39
<i>Figura 9. Viviendas en alto riesgo de colapso, comuna 14 “Morrórico”</i>	40
<i>Figura 10. Vivienda después del colapso, comuna 14 “Morrórico”</i>	40
<i>Figura 11. Casa de Mampostería estructural no confinada, ladrillo macizo “temosa”, disposición en soga; Comuna 14 “Morrórico”</i>	41
<i>Figura 12. Disposición en soga de los ladrillos para muros cargueros, comuna 14 “Morrórico”</i>	43
<i>Figura 13. Ensayo a compresión del mortero de pega</i>	45
<i>Figura 14. Fallo a compresión del ladrillo posición soga</i>	46
<i>Figura 15. Fallo a compresión del ladrillo posición vertical</i>	47
<i>Figura 16. Máquina de ensayos a compresión Edificio Álvaro Beltrán, Universidad Industrial de Santander</i>	48
<i>Figura 17. Fique tupido número 7 – tres líneas de un solo uso</i>	48
<i>Figura 18. Esquema experimental para pruebas de la unión fique – ladrillo</i>	50
<i>Figura 19. Vista 3D del montaje experimental</i>	52
<i>Figura 20. Vista lateral del montaje experimental</i>	52
<i>Figura 21. Esquema general del ensayo de compresión diagonal</i>	53
<i>Figura 22. Murete para prueba en compresión diagonal</i>	54
<i>Figura 23. Puente Grúa con capacidad de 5000Kg</i>	55
<i>Figura 24. Máquina de ensayos universales MTS Test System 810</i>	56
<i>Figura 25. Murete de mampostería sobre bases de madera</i>	57

<i>Figura 26. Bases de madera para ensayo a compresión diagonal</i>	57
<i>Figura 27. Vista 3D del montaje experimental</i>	58
<i>Figura 28. Vista lateral del montaje experimental</i>	58
<i>Figura 29. Almacenamiento de materiales</i>	59
<i>Figura 30. Primera hilada de mortero</i>	59
<i>Figura 31. Proceso de construcción de muros.</i>	60
<i>Figura 32. Aplicación del refuerzo y pintado de muros.</i>	60
<i>Figura 33. Extracción de muretes de prueba.</i>	61
<i>Figura 34. Corte fachada, Casa Buenos Aires</i>	62
<i>Figura 35. Planta estructural primer piso, Casa Buenos Aires</i>	63
<i>Figura 36. Planta estructural segundo piso, Casa Buenos Aires</i>	63
<i>Figura 37. Comparación resistencia teórica vs resistencia requerida</i>	71
<i>Figura 38. Definición del material, modelo MIDAS GEN</i>	73
<i>Figura 39. Definición del material plástico, modelo MIDAS GEN</i>	74
<i>Figura 40. Definición del espesor, modelo MIDAS GEN</i>	74
<i>Figura 41. Modelo final MIDAS GEN</i>	76
<i>Figura 42. Modelo final MIDAS GEN</i>	77
<i>Figura 43. Configuración geométrica del modelo numérico del murete</i>	78
<i>Figura 44. Resultados de esfuerzos para el murete en MIDAS GEN</i>	79
<i>Figura 45. Muro 1, sin refuerzo</i>	80
<i>Figura 46. Muro 2, con refuerzo sencillo a 90 grados</i>	81
<i>Figura 47. Muro 3, con refuerzo doble a 90 grados</i>	81
<i>Figura 48. Muro 4, con refuerzo sencillo a 45 grados</i>	82
<i>Figura 49. Curva Carga vs desplazamiento murete 1-1, MTS Test System 810</i>	84
<i>Figura 50. Curva Carga vs desplazamiento murete 1-2, MTS Test System 810</i>	84
<i>Figura 51. Curva Carga vs desplazamiento murete 1-3, MTS Test System 810</i>	85
<i>Figura 52. Fallas muretes tipo 1</i>	86
<i>Figura 53. Curva Carga vs desplazamiento murete 2-1, MTS Test System 810</i>	87
<i>Figura 54. Curva Carga vs desplazamiento murete 2-2, MTS Test System 810</i>	87
<i>Figura 55. Curva Carga vs desplazamiento murete 2-3, MTS Test System 810</i>	88
<i>Figura 56. Fallas muretes tipo 2</i>	88
<i>Figura 57. Curva Carga vs desplazamiento murete 3-1, MTS Test System 810</i>	89
<i>Figura 58. Curva Carga vs desplazamiento murete 3-2, MTS Test System 810</i>	90

<i>Figura 59. Curva Carga vs desplazamiento murete 3-3, MTS Test System 810</i>	90
<i>Figura 60. Fallas muretes tipo 3</i>	91
<i>Figura 61. Curva Carga vs desplazamiento murete 4-1, MTS Test System 810</i>	92
<i>Figura 62. Curva Carga vs desplazamiento murete 4-2, MTS Test System 810</i>	92
<i>Figura 63. Curva Carga vs desplazamiento murete 4-3, MTS Test System 810</i>	93
<i>Figura 64. Fallas muretes tipo 4</i>	93
<i>Figura 66. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 1</i>	95
<i>Figura 67. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 2</i>	96
<i>Figura 68. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 3</i>	98
<i>Figura 69. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 4</i>	99
<i>Figura 70. Comparación de la resistencia máxima entre cada tipo de murete</i>	100
<i>Figura 71. Comparación del esfuerzo máximo entre cada tipo de murete</i>	103
<i>Figura 72. Relaciones Costo – Beneficio para las 3 configuraciones de refuerzo</i>	106
<i>Figura 73. Comparación entre un muro frisado de forma rustica y uno reforzado con fique</i>	107

GLOSARIO *

	pág
ANISÓTROPICO: cualidad de un medio, generalmente cristalino, en el que alguna propiedad física depende de la dirección de un agente.	13
APAREJO: preparación, disposición para algo.	46
COEFICIENTE DE POISSON: es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.	16
COMPRESIÓN: esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen.	15
CONSISTENCIA: trabazón, coherencia entre las partículas de una masa o los elementos de un conjunto.	29
CORDELERÍA: sitio donde se hacen cordeles y otras obras de cáñamo	17
DIFUSIVIDAD: parámetro que rige la propagación del calor al interior de los materiales (conducción + almacenamiento).	21
DOSIFICACIÓN: establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen la mezcla, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas, o bien, para obtener un acabado o pegado correctos.	30
DUCTILIDAD: fácilmente deformable.	16
ELÁSTICO: dicho de un cuerpo que puede recobrar completamente su forma y extensión tan pronto como cesa la acción que las alteraba.	14
ELEMENTOS FINITOS: es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería	20
ESCARPADO: dicho de una altura: Que no tiene subida ni bajada transitable o la tiene muy áspera y peligrosa.	25

* (REAL-ACAMEDIA-ESPAÑOLA)

FASES: cada una de las partes homogéneas físicamente separables en un sistema formado por uno o varios componentes.	13
GEOTECTÓNICA: perteneciente o relativo a la forma, disposición y estructura de las rocas y terrenos que constituyen la corteza terrestre.	27
GEOTEXTILE: el geotextil es una malla compuesta por fibras sintéticas cuyas funciones principales se basan en su resistencia mecánica a la perforación y tracción, y a su capacidad drenante.	17
HOMOGÉNEO: dicho de una sustancia o de una mezcla de varias: De composición y estructura uniformes.	13
ICÓNICO: dicho de un signo: Que posee cualidades de icono.	13
ISOTRÓPICO: característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección.	14
LITOLOGÍA: parte de la geología que trata de las rocas.	27
MULTIFAMILIARES: dicho de un edificio: De varias plantas, con numerosos apartamentos, cada uno de los cuales está destinado para habitación de una familia.	13
ORNAMENTACIÓN: acción o efecto de engalanar con adornos	12
ORTOÉDRICO: aralelepípedo cuyas caras forman ángulos diedros rectos.	14
PELETERÍA: es la industria dedicada a la elaboración de indumentaria a partir de cuero y piel animal; es una de las tecnologías más antiguas conocidas, remontándose a la prehistoria, y probablemente la forma más antigua de elaboración de indumentaria.	17
PLASTICIDAD: dicho de un material: Que, mediante una compresión más o menos prolongada, puede cambiar de forma y conservar esta de modo permanente, a diferencia de los cuerpos elásticos.	15
POLÍMERO: compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.	17
POLISPASTO: aparejo de dos grupos de poleas uno fijo y otro móvil.	41
PROBETA: muestra de cualquier sustancia o material para probar su elasticidad, resistencia, etc.	29
SEGREGACIÓN: separar o apartar algo de otra u otras cosas.	15
SÍLICO-CALCÁREAS: Ladrillos que se obtienen con un 10 % de cal viva y un 90 % de arena rica en sílice.	14

SOGA: dicho de construir con la dimensión más larga del ladrillo o piedra en la misma dirección del largo del paramento.	31
TAXONÓMICO: que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación.	28
TOPOGRAFÍA: conjunto de particularidades que presenta un terreno en su configuración superficial.	27
VANGUARDIA: en primera posición, en el punto más avanzado, adelantado a los demás.	18
XILEMA: también conocido como leño o hadroma, es un tejido vegetal leñoso de conducción que transporta líquidos de una parte a otra de las plantas vasculares. Junto con el floema, forma una red continua y que se extiende a lo largo de todo el organismo de la planta.	17

RESUMEN

TITULO:* DISEÑO ÓPTIMO DE REFUERZO DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL USANDO FIBRAS DE FURCRAEA ANDINA “FIQUE”

AUTORES: OSCAR GIOVANNY ANGARITA RIBERO**
JUAN SEBASTIAN URIBE ROA**

PALABRAS CLAVES: MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL, MURO, CONFINAMIENTO, FURCRAEA ANDINA “FIQUE”.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto tiene como finalidad el estudio de nuevas formas de reforzamiento estructural a base de materiales autóctonos, con el fin de que estos puedan ser reglamentados e implementados por la normatividad vigente.

El análisis de las propiedades mecánicas de las mallas de fibra de Furcraea andina “fique” permite la utilización de este material como refuerzo, que en el caso específico de este estudio, fue aplicado a la mampostería estructural no confinada mediante un análisis teórico práctico.

Este trabajo está compuesto por cinco (5) capítulos iniciando con el estado del conocimiento, en donde se muestra una breve reseña histórica de la zona a la cual fue dirigida la investigación, seguido de conceptos teóricos fundamentales para la comprensión del estudio. Se realiza una serie de ensayos de laboratorio y cálculos numéricos con el fin de estimar las propiedades mecánicas de los ejemplares, obteniendo un fundamento teórico previo a la realización de los experimentos. Finalmente, se presentan los resultados experimentales junto con sus respectivos análisis.

Como resultado de los análisis desarrollados, se obtuvieron comportamientos favorables por parte del refuerzo con mallas de fibra de fique aplicado a los ejemplares utilizados en las pruebas, permitiendo establecer un diseño óptimo de refuerzo como objetivo principal de este estudio.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo ingeniero civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE: ^{*} OPTIMAL REINFORCEMENT DESIGN OF STRUCTURAL MASONRY USING FURCRAEA ANDINA "FIQUE" FIBERS

AUTHORS: OSCAR GIOVANNY ANGARITA RIBERO^{**}
JUAN SEBASTIAN URIBE ROA^{**}

KEY WORDS: STRUCTURAL MASONRY, WALL, CONFINEMENT, FURCRAEA ANDINA "FIQUE".

DESCRIPTION:

This project aims to study new forms of structural reinforcement based on local materials in order to be satisfactorily regulated and implemented by the current regulations.

The analysis of the mechanical properties of the Furcraea Andina fiber meshes allows the use of this material as a structural reinforcement which is the specific case of this study. It was applied to the unconfined structural masonry throughout a theoretical and experimental analysis.

This work consists of five (5) chapters beginning with the state of knowledge, where a brief history of the area in which this research was focused is presented, followed by basic theoretical concepts for the understanding of the study. There were performed a series of laboratory tests and numerical calculations to estimate the mechanical properties of the specimens, obtaining a theoretical foundation prior to the completion of the experiments. Finally, experimental results are presented along this document within a respective analysis.

As a result of the analysis developed, positive behaviors were obtained by the fique fiber mesh reinforcement applied to the specimens used in the tests, thus allowing an optimal design of reinforcement as the main objective of this study.

^{*}Work Degree

^{**} Faculty of Physicist – Mechanics. School of Civil Engineering. Directress: Oscar Javier Begambre Carrillo PhD.

INTRODUCCIÓN

El proceso de crecimiento y desarrollo de un país se da a partir del conocimiento de la historia y la experiencia, debido a las catástrofes naturales que se han presentado en los últimos años, se han detectado falencias en la seguridad e integridad de las estructuras, lo que produce un incremento en las actividades investigativas en centros educativos como la Universidad Industrial de Santander. El grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción - INME contribuye en el desarrollo y utilización de materiales autóctonos en la construcción de vivienda económica basados en los distintos estudios de vulnerabilidad de edificaciones en zonas de amenaza sísmica, lo que conduce a la creación de proyectos para la rehabilitación de las áreas en riesgo.

La problemática social, económica y ambiental de Colombia sumada a un incremento demográfico excesivo de los centros urbanos, ha dado como resultado el desplazamiento de la población hacia zonas con características no aptas para la construcción de vivienda. La zona de la comuna 14 Morrórico fue fundada por asentamientos en su mayoría de personas provenientes de sectores campesinos de la provincia de García Rovira, San Gil, San Vicente, Berlín, Tona y veredas aledañas (DIAZ REY & PARRA SEQUEDA, 2007); la unión de factores como la alta actividad sísmica producida por la presencia de un sistema de fallas y de un nido sísmico, sumado a la situación Socio – Económica de este sector, da como resultado una alta vulnerabilidad en las estructuras presentes donde el uso de construcciones con mampostería estructural se encuentra ampliamente difundido, destacándose la utilización de mampostería no reforzada la cual se caracteriza por ser utilizada como sistema estructural en regiones de amenaza sísmica baja lo que da como resultado estructuras incapaces de cumplir su función poniendo en riesgo la seguridad de vidas humanas y generando grandes pérdidas en caso de ocurrencia de un evento catastrófico.

En el mercado se tiene acceso a métodos de rehabilitación estructural con fibras, los cuales podrían ser una opción para suplir los requerimientos estructurales de las edificaciones presentes en la comuna 14 Morrórico; la implementación de este tipo de procedimientos esta en gran medida limitado por el elevado costo que estos implican en proporción con la capacidad adquisitiva de los habitantes del sector; esta situación expone la necesidad de optimizar el uso de los materiales comerciales para reducir costos e identificar y evaluar nuevas alternativas que generen resultados satisfactorios mejorando la respuesta estructural de las edificaciones del sector.

La Norma Sismo Resistente Colombiana del 2010 Título D “Mampostería Estructural” contempla la utilización de muros de mampostería no reforzada para zonas de amenaza sísmica baja según el capítulo D.9 “Muros de Mampostería no reforzada”, la cual establece parámetros para el buen uso de este sistema estructural (NSR-10, 2010). Dadas las características de la ciudad de Bucaramanga, el uso de este sistema no es recomendable, por lo que surge la necesidad de proponer métodos de rehabilitación con el fin de encontrar soluciones viables para disminuir el impacto sobre las estructuras, y por consiguiente, ofrecer mayor seguridad a los ocupantes de las mismas. Este proyecto busca definir una configuración óptima de refuerzo con fibras de fique teniendo en cuenta los estados de falla por fricción – cortante y tensión diagonal del bloque, así como la relación Costo – Beneficio más ventajosa para las capacidades económicas del estado y de las personas directamente interesadas en su aplicación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y proponer el refuerzo óptimo de muros de mampostería estructural no reforzada para un muro de una edificación tipo en la comuna 14 “Morrórico” de la ciudad de Bucaramanga, usando fibras de Furcraea Andina “Fique”.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el tipo de ladrillo, aparejo, apoyos y tamaño del muro de mampostería estructural no reforzada más utilizado en la vivienda tipo de la comuna 14 “Morrórico” de la ciudad de Bucaramanga.
- Determinar de forma experimental la relación esfuerzo – deformación estableciendo el comportamiento mecánico del muro de mampostería estructural no reforzada en condiciones iniciales.
- Determinar la distribución de esfuerzos producidos en el muro objeto de estudio debido a la acción de cargas de servicio y sismo, empleando un software de simulación de estructuras basado en elementos finitos.

- Realizar ensayos de laboratorio para determinar la respuesta del muro estudiado para cinco configuraciones de refuerzo con fibras de Furcraea Andina “Fique”.
- Determinar la relación Costo – Beneficio más viable teniendo en cuenta las condiciones socio-económicas de la zona de estudio.

1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.1. RESEÑA HISTÓRICA COMUNA 14 “MORRORICO”

Los barrios que hacen parte de esta comuna se poblaron por asentamientos en su mayoría de personas provenientes de sectores campesinos de la provincia de García Rovira, San gil, San Vicente, Berlín, Tona y veredas aledañas, a mediados del siglo XX. Su condición de pobreza a causa del destierro producido por la violencia política partidista los condujo a comprar y a ocupar lotes en los terrenos escarpados y erosivos del oriente de Bucaramanga, sin ningún tipo de urbanismo, donde levantaron sus viviendas haciendo uso de un sistema de autoconstrucción individual. (ARDILA CUBILLOS & MÉNDEZ RINCÓN, 2003)

El barrio Albania se comenzó a construir en 1950, con poca solidez en sus estructuras, sin ningún tipo de servicio público domiciliario. Se alumbraban con velas, lámparas de petróleo o gasolina, y no contaban con alcantarillado. Similares circunstancias vivió el barrio buenos aires. (DIAZ REY & PARRA SEQUEDA, 2007)

El barrio Miraflores inició construcciones en 1961 en terrenos de la señora Elvira Mantilla de Mantilla, los cuales fueron donados mediante escritura pública a la compañía de los jesuitas siendo el padre Upegui, director de la compañía, quien entregó los lotes para las primeras viviendas y así hasta concluir la ocupación del espacio útil. La junta de acción comunal conformada por los hogares establecidos gestionó la instalación de los servicios públicos domiciliarios logrando su objetivo en 1980. Las divergencias al interior de la comunidad, condujo a la creación de un comité cívico que promovió entre sus integrantes la necesidad de independizarse para crear el barrio los sauces.

El barrio Morrórico inició su proceso constructivo en 1964 en los terrenos de las veredas Retiro Grande y Retiro Chiquito, propiedad de la señora Elvira Mantilla de Mantilla, quien donó algunos lotes inicialmente, pero que posteriormente se fueron vendiendo a familias procedentes de la zona campesina de los municipios de Soto Norte. El barrio Vegas de Morrórico se independizó de Morrórico en 1983.

En general el proceso de ocupación del espacio de la comuna 14, se caracteriza por corresponder a un patrón de migración del campo a la periferia de la ciudad sin escalonamiento. Dicha se determina por ser una zona de ladera periférica, bastante pendiente, sin planeación en lo urbanístico y espacial. Las viviendas se han construido sin los permisos y licencias otorgados por las autoridades competentes, con problemas sensibles de erosión y riesgo para las familias allí instaladas, según lo determina el plan de ordenamiento territorial aprobado en septiembre del año 2000 el cual define a la comuna 14 como un territorio ubicado en zona de alto riesgo.

La comuna está formada por nueve barrios, Morrórico, Miraflores, Albania, Buenos Aires, Limoncito, Vega Morrórico, Buenavista, Sauces y el Diviso, presentando un área total de 711.301.062 metros cuadrados (m²). Sus habitantes se ubican en el estrato económico 1 y 2 compartiendo características similares en su patrón socio-económico y cultural. La mayor parte de los ingresos de esta población dependen de actividades en el pequeño comercio independiente (tiendas), economía informal, actividades de construcción, servicios domésticos, economía del rebusque como el comercio ilegal de gasolina Venezolana, transporte urbano pirata en carros particulares, talleres de zapatería, lavaderos de camiones y tracto camiones, talleres de ornamentación y carpintería. (DIAZ REY & PARRA SEQUEDA, 2007)

1.2. MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

1.2.1. Descripción general de la mampostería

Se entiende por mampostería la unión de dos fases de materiales, compuestas por bloques, los cuales pueden ser de forma natural (rocas) u obra de fábrica (Ladrillos), y una sucesión de juntas denominadas brechas, este trabajo conjunto da como resultado un material no homogéneo con comportamiento no lineal y anisótropico. A lo largo de la historia la mampostería ha sido el material protagónico para la construcción de grandes obras icónicas que actualmente hacen parte del patrimonio cultural y arquitectónico de la humanidad, algunas de las más representativas son:

- Taj Mahal, construido entre 1631 y 1654 en la ciudad de Agra, estado de Uttar Pradesh, India.
- Castillo de Alnwick, construido después de la conquista normanda en Northumberland, Inglaterra.
- La gran muralla China, construida en el siglo V a.C. para proteger la frontera norte del imperio de china de los constantes ataques de los mongoles.
- Las pirámides de Egipto, construidas aproximadamente en el 2500 a.C.

Además de estas importantes obras arquitectónicas, la mampostería es ampliamente utilizada en la construcción de edificios multifamiliares y de oficinas en el rango de hasta 5 pisos. Es importante recalcar que actualmente en Colombia este tipo de estructuras se encuentran con gran facilidad, pero en muchos casos por desconocimiento de las normatividades vigentes que velan por el buen diseño y construcción, unido con la situación económica y social del país dan como resultado el uso incorrecto de estos sistemas estructurales.

1.2.2. Unidades

Las unidades que se utilizan en las construcciones de mampostería estructural pueden ser de concreto, cerámica (arcilla cocida), sílico-calcreas o de piedra. Un ladrillo es una pieza cerámica, generalmente ortoédrica, obtenida por moldeo, secado y cocción a altas temperaturas de una pasta arcillosa. Según el tipo de mampostería estructural y según el tipo de refuerzo, las unidades pueden ser de perforación vertical, de perforación horizontal o piezas sólidas, de acuerdo con la posición normal de la pieza en el muro. Las unidades sólidas son aquellas cuyas cavidades ocupan menos de un 25% del volumen de la pieza* (NSR-10, 2010). Además, los ladrillos presentan un comportamiento típico elástico – frágil, pero no necesariamente homogéneo o isotrópico.† (LÓPEZ, OLLER, & OÑATE, 1998)

Su forma es la de un prisma rectangular, en el que sus diferentes dimensiones reciben el nombre de sogá, tizón y grueso, siendo la sogá su dimensión mayor. Así mismo, las diferentes caras del ladrillo reciben el nombre de tabla, canto y testa.

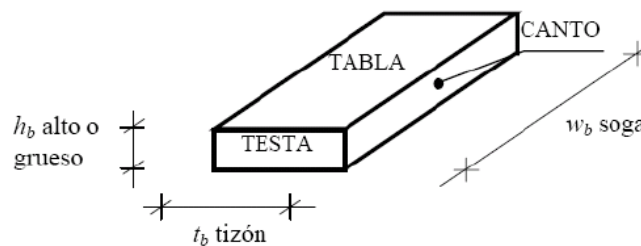


Figura 1. Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas o unidades ‡
(MARTÍNEZ, 2003)

Las propiedades mecánicas de los bloques dependen fundamentalmente de la naturaleza de los mismos, las más destacadas para efectos de análisis estructural son la densidad, el

* NSR-10, Título D: Mampostería estructural, D.3.6: Unidades de mampostería, Bogotá D.C Colombia, Marzo 2010.

† Referencia tomada de, Cálculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos, J. López; S. Oller; E. Oñate; 1998.

‡ Fuente Figura 1. Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas. Martínez, J.L. (2003).

módulo de deformación longitudinal y la resistencia a compresión; también se suele determinar directamente la resistencia a flexo-tracción. (CHIQUILLO SALAMANCA & PATIÑO OICATÁ, 2011)

1.2.3. Mortero de pega

El mortero utilizado en la mampostería está compuesto por una mezcla de cemento, arena y agua, dependiendo de la resistencia requerida existen diferentes tipos de morteros preestablecidos en la normatividad. Las dosificaciones de los componentes de los morteros de pega se basan en ensayos previamente desarrollados en el laboratorio o por experiencia de campo en obras similares, y se clasifican como **H**, **M**, **S** o **N** de acuerdo con la dosificación mínima establecida de sus componentes y con la resistencia a la compresión, la cual se muestra en la siguiente tabla:

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cp} MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁶⁾	
							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⁽⁶⁾	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

Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o proporción.*

(NSR-10, 2010)

La preparación del mortero de pega con las dosificaciones establecidas previamente, debe llevarse a cabo utilizando mezcladoras mecánicas apropiadas en seco o con el agua de amasado suficiente para obtener la plasticidad requerida. Cuando se mezclen los componentes en seco, la adición de agua se debe realizar por el albañil hasta obtener la plasticidad y consistencia requeridas (agua al gusto). El tiempo de mezclado debe ser el suficiente para obtener uniformidad sin segregación en la mezcla. La preparación manual

* NSR-10, Título D: Mampostería estructural, D.3.4.1: Tabla D.3.4-1, Bogotá D.C Colombia, Marzo 2010.

sólo se admite para trabajos de obras menores (NSR-10, 2010). Para hacer una caracterización mecánica del mortero en estado de servicio se deben tener en cuenta factores como el peso específico, la resistencia a compresión, el módulo de deformación longitudinal y el coeficiente de Poisson.

1.2.4. Comportamiento de la mampostería como material compuesto

La mampostería como material compuesto transmite de manera muy efectiva las cargas de compresión. El parámetro gobernante para determinar la resistencia es proporcionado por las propiedades mecánicas de los ladrillos debido a que la falla se da por el agrietamiento a causa de la tracción transversal sobre los mismos, provocada por una expansión diferencial lateral de las unidades y una ductibilidad mayor del mortero.

El comportamiento de la mampostería está sujeto a la orientación de las juntas de mortero y a las cargas aplicadas; por lo general, las deformaciones plásticas aparecen en las juntas y varían según sea la magnitud del cortante y la tensión normal. También tiene gran influencia en el modo de falla el grado de compresión al que se vea sometida la mampostería, presentando desde una falla solamente en las juntas o una combinación de fisuración junta – mortero. Cabe aclarar que no todos los mecanismos de fractura en la mampostería han sido del todo desarrollados. (LÓPEZ, OLLER, & OÑATE, 1998)

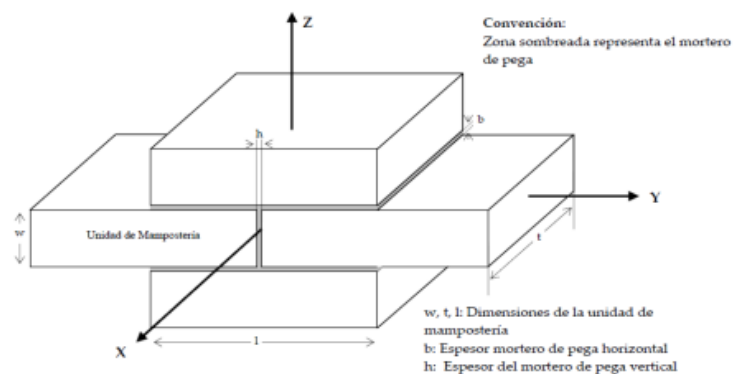


Figura 2. Unidad básica de muro de mampostería*
(JARAMILLO, MORALES, & HINCAPIÉ, 2008)

* Jaramillo Juan, Morales Marcela, Hincapié Gonzalo. Respuesta Sísmica de muros de mampostería no reforzada sometidos a aceleraciones perpendiculares a su plano. Universidad EAFIT. (2008).

1.3. FIBRAS NATURALES

1.3.1. Generalidades de las Fibras Naturales

Las fibras son polímeros lineales muy alargados con una longitud de cadena lo suficientemente grande para ser hiladas, obteniendo hebras, hilos o cordelería. En tejidos, en esteras o unidas, estas fibras forman telas esenciales para la industria textil. Si bien la sociedad ha venido evolucionando los métodos para la fabricación de textiles, sus funciones han cambiado muy poco, en la mayoría de los casos las fibras naturales se usan para la fabricación de vestido y contenedores. Sin embargo, los textiles tradicionales se usan cada vez más con propósitos industriales, como elementos de materiales compuestos en geotextiles y agrotexiles. (MONDRAGÓN AGUILAR, 2002)

Las fibras tienen como origen dos fuentes principales: las naturales, como las de origen vegetal, animal y mineral; y las sintéticas, que son a causa de la investigación humana, provienen básicamente del petróleo y gas natural, como lo son el polipropileno, polietileno, dracón, rayón, nylon, entre otras.

Las fibras naturales de origen vegetal se dividen en dos grupos importantes: las blandas, que provienen de la corteza o fruto de las plantas, como el algodón, lino, damagua, etc.; y las duras, que se derivan de las hojas, como la cabuya, abacá, piña, palmas, entre otras. Las fibras de origen animal provienen principalmente del pelo de animales como el conejo, cerdo, caballo y oveja, siendo muy utilizadas en la peletería. (FLÓREZ AGUILAR & LÓPEZ HERNÁNDEZ, 2010)

1.3.2. Furcraea andina “fique”

Las fibras de fique se caracterizan por tener una alta dureza debido a que provienen de los haces vasculares, principalmente del xilema. Estos haces mecánicos del fique están constituidos de fibras elementales o fibrillas, soldadas entre sí por una cera o goma (cemento vegetal). De esta planta, mediante un proceso mecánico manual, se obtiene la

fibra conocida como cabuya, compuesta por una serie de células alargadas, de paredes gruesas, o de grupos de células que forman un filamento o banda, cuya característica principal es su buena resistencia a la tracción gracias a que su función básica es la de sostener y dar rigidez a las hojas. Después de extraídas, las fibras de fique pueden presentar longitudes que varían entre 0.5 y 3 metros, y espesores con diámetro de 1/10 a 1/3 de milímetros. Se estima que la resistencia a la tracción de la fibra de fique puede variar entre 3850 y 70000 kg/cm². (VARGAS & SOLANDO, 1999)

Uno de los usos más importantes de las fibras de *Furcraea andina* “fique”, es la creación de mallas trenzadas mediante un proceso manual para la producción de sacos de fique normalmente utilizados en la industria cafetera, los cuales tienen como función principal el almacenamiento y transporte del grano de café. Estos sacos se elaboran tanto de forma artesanal como industrial, permitiendo, en el caso de la elaboración industrial, la elección de la cantidad de fibras de fique utilizadas para el trenzado de la malla, con una numeración ascendente de 1 a 7, siendo la número siete la malla con la mayor cantidad de fibras.

1.4. REFUERZO CON FIBRAS PARA LA MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

El refuerzo con fibras es un método de rehabilitación estructural mediante el cual se logra aumentar la resistencia de los muros de mampostería; este refuerzo en el plano del muro se ejecuta mediante la adhesión de una determinada fibra a la superficie del espécimen, en lo posible, orientada en dirección paralela a la de la aplicación de la fuerza cortante. En la actualidad, el mercado brinda la posibilidad de adquisición de diferentes tipos de fibras para reforzamiento estructural, algunas de estas son fibras de refuerzo de polímero (FRP)* como las fibras de carbono y las fibras de vidrio, entre otras. Uno de los usos de vanguardia que se le da a estos materiales en la rama de la ingeniería civil, es la

* FRP de la sigla en inglés Fiber Reinforced Polymer

reparación y reforzamiento de sistemas estructurales existentes, los cuales pueden estar parcialmente dañados o ser estructuralmente insuficientes para soportar un evento sísmico. Las antiguas edificaciones de mampostería fueron diseñadas para resistir únicamente cargas verticales, debido a la ausencia de alguna sollicitación de carga con componente horizontal durante el diseño, dichas construcciones son generalmente frágiles durante una excitación del suelo resultado de un evento sísmico, por lo que la aplicación de un refuerzo, en este caso por parte de las fibras, es de gran utilidad para asegurar la integridad estructural de este tipo de sistemas constructivos.

Experimentalmente se han logrado resultados que respaldan el buen funcionamiento del uso de las fibras comerciales mencionadas con anterioridad para el reforzamiento de muros estructurales ante la acción de un sismo, observándose un aumento significativo en la resistencia de los muros objeto de estudio, de los cuales, algunos estaban en estado inicial y otros con daños previos a la aplicación del refuerzo. (MOSALLAM & SWAGATA, 2011)

Es importante resaltar que actualmente se están adelantando estudios para evaluar y validar la capacidad de reforzamiento de otras variedades de fibras, como es el caso de la fibra de fique o *Furcraea andina*



*Figura 3 . Falla de un muro reforzado con FRP
(MOSALLAM & SWAGATA, 2011)*

1.5. ANÁLISIS NUMÉRICO

1.5.1. Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico avanzado que ha sido creado para la resolución de ecuaciones diferenciales que se plantean en sistemas discretos o continuos, bajo ciertas condiciones de frontera, mediante la utilización de ecuaciones matriciales.

Las aplicaciones actuales de este método son muy extensas e incluyen tanto sistemas lineales y no lineales como estáticos y dinámicos, en áreas tales como la mecánica de sólidos, teoría de la elasticidad, mecánica de fluidos, transferencia de calor y electromagnetismo.

En el caso de sistemas continuos, el método consiste en transformar una estructura o dominio de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, lo cual se logra dividiendo dicho dominio en un cierto número finito de elementos. A esta transformación se le conoce como discretización. Los vértices de cada elemento se conocen como nodos. En la figura 4 se muestra un único elemento finito triangular plano. (ZIENKIEWICZ & TAYLOR, 2000)

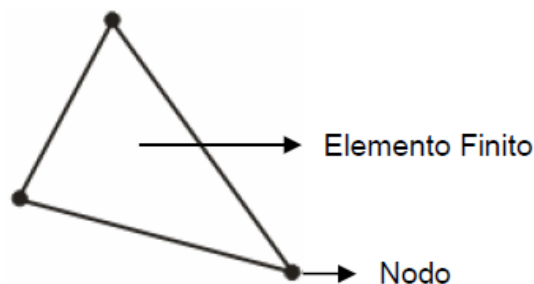
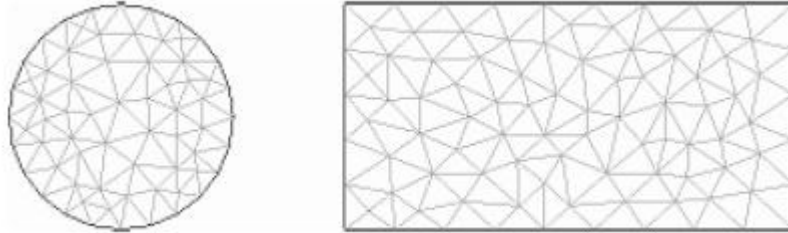


Figura 4 . Elemento finito triangular plano
(DUARTE BALLEEN & JEREZ BARAJAS, 2007)

El conjunto de nodos y elementos se denomina malla de elementos finitos. La figura 5 muestra una malla de elementos finitos triangulares para una estructura circular y otra rectangular generada por el software FEMLAB. (DUARTE BALLEEN & JEREZ BARAJAS, 2007)



*Figura 5. Mallas de elementos finitos triangulares generados por FEMLAB**
(DUARTE BALLEEN & JEREZ BARAJAS, 2007)

Al dominio de cálculo se le asocia el modelo matemático que representa su comportamiento fenomenológico (físicoquímico, mecánico, etc.), junto con los parámetros numéricos propios del sistema, tales como la viscosidad, densidad, conductividad térmica, coeficiente de difusividad, entre otros (LEWIS, NITHIARASU, & SEETHARAMU, 2004). Además, Se debe asignar a la estructura las condiciones de frontera correspondientes al problema en particular.

La solución del sistema de ecuaciones se realiza sobre la malla creada. El comportamiento en cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante funciones de interpolación. La respuesta es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de los valores de un número determinado y finito de puntos.

* Fuente: Figura obtenida mediante el software de simulación en estructuras FEMLAB (Finite Element Method Laboratory)

1.5.2. Software de simulación de estructuras MIDAS GEN

Sistema integrado para el diseño de edificios y de estructuras en general que incorpora utilidades de enmallado automático para el reparto de cargas entre los elementos de forjado, de suavizado de picos de armado en losas macizas, de dimensionamiento conforme varios códigos, control automático del punzonamiento, condiciones de contorno unidireccionales y/o no-lineales, análisis dinámico y de capacidad, cargas móviles, entre otras características avanzadas. Además del análisis convencional del software de simulación de estructuras, MIDAS GEN permite un análisis no lineal considerando grandes desplazamientos, construcción por fases considerando la variación de las propiedades de los materiales en el tiempo y análisis de calor de hidratación. (MIDAS GEN, 2010)

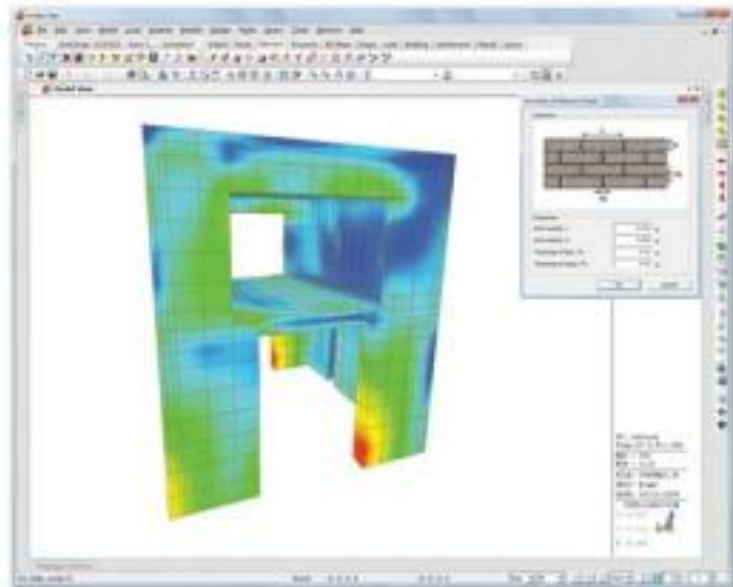


Figura 6. Contorno de tensiones en estructura de mampostería*

* Fuente: Figura tomada de MIDAS GEN catalogo_es_2010_ simulsoft-ingenieros.es

2. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN, CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

2.1. VISITA A LA COMUNA 14 “MORRORICO”

En el proceso de levantamiento de información para el desarrollo de este proyecto, se realizó una visita a la comuna 14 “Morrórico”, en donde se pretendía captar mediante imágenes fotográficas y conversaciones con los habitantes de la zona, las formas constructivas más comunes que se presentan en el sector; siendo esta una manera más precisa para definir las principales características de la tipología estructural utilizada en dicha comuna.

La zona de estudio se ubica en el sector nororiental del área metropolitana de Bucaramanga, sobre los kilómetros 1 y 4 de la vía que de Bucaramanga comunica a Pamplona, entre los 880 y 1280 metros de altitud. Empieza en la calle 10 con carrera séptima peatonal, en línea recta hacia el sur hasta encontrar la carrera 47 con calle 32, de allí sigue hacia el oriente hasta encontrar la carrera 51, la cual se une a la quebrada La Flora; luego en dirección sur oriente llegando al costado occidental del barrio Buenos Aires; se continúa por el sur hasta el costado oriental del mismo barrio; desde ese punto, en línea recta hacia el norte hasta las estribaciones de La Mona Samaria; desde allí en sentido oriente – occidente por la coordenada 1.281.000 hasta la carrera 40; prosigue bordeando las manzanas desde la coordenada 267.266 por el costado norte hasta encontrar la vía a Vegas de Morrórico; por esta sigue en dirección norte hasta el nivel 880; sobre la coordenada 107.000 en sentido sur hasta nuevamente encontrar nuevamente la carrera 36 con calle 10. (DESARROLLO-SOCIAL)

La visita comienza con el ingreso a la comuna en un automóvil particular por la vía Bucaramanga - Pamplona, hasta llegar al restaurante “Corcovado”, donde se inicia el reconocimiento de la zona mediante extensas caminatas guiadas por habitantes del sector pertenecientes a la junta de acción comunal. Los altos índices de violencia y delincuencia presentes en la comuna, así como la incredulidad de la gran mayoría de la población hacia los programas de prevención y estudios relacionados con la alta vulnerabilidad de las viviendas allí construidas, dificultan la labor de recolección de datos con fines académicos.

Debido a las características geográficas y la forma en la que se presentó el poblamiento del sector, la comuna 14 se ha venido expandiendo alrededor de una vía vehicular pavimentada de gran importancia, como lo es la Vía Bucaramanga – Cúcuta, brindando un modo de soporte económico y comunicación a los habitantes de la zona. El transporte y la movilidad de la comuna son insuficientes para suplir su gran densidad poblacional, la cual es, según estudios realizados por la secretaría de desarrollo social del municipio de Bucaramanga, de aproximadamente 5.38 personas por familia y 7.12 personas por vivienda. A pesar de ser una población asentada a borde de carretera, el ingreso de los moradores a sus viviendas se hace de difícil acceso a causa del mal estado de sus senderos peatonales y de la elevada pendiente presentada en la zona. En la figura 7 se muestra el ingreso a un sendero peatonal en mal estado desde la vía principal Bucaramanga – Cúcuta.



Figura 7. Ingreso a sendero peatonal, comuna 14 "Morrórico"

Fuente los Autores



Figura 8. Sendero peatonal, comuna 14 "Morrórico"

Fuente los Autores

La fuerte ola invernal que se ha presentado en Colombia entre los años 2010 y 2011, ha dejado ver que las elevadas pendientes a causa del terreno escarpado en donde se encuentra la comuna, el pobre proceso urbanístico que se dio en el sector a mediados del siglo XX y la poca importancia que se le da al cumplimiento de las normas en los

procesos constructivos de las estructuras allí presentes, son las principales causas de la gran vulnerabilidad que tiene esta población ante la amenaza de un posible sismo.



*Figura 9. Viviendas en alto riesgo de colapso, comuna 14 "Morrónico"
Fuente los Autores*



*Figura 10. Vivienda después del colapso, comuna 14 "Morrónico"
Fuentes los Autores*

2.2. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL COMUNA 14 “MORRORICO”

El sector de la comuna 14 “Morrórico” de la ciudad de Bucaramanga se encuentra ubicado sobre la falla Bucaramanga – Santa Marta en un terreno que presenta una topografía de alta pendiente y esta conformado por nueve barrios (Morrórico, Miraflores, Albania, Buenos Aires, Limoncito, Vega Morrórico, Buenavista, Sauces y el Diviso) considerados subnormales (Estrato 1 y 2); Debido a esto, la mayoría de las edificaciones presentes allí han sido construidas por sus propietarios basados en la experiencia propia o en la de maestros de obra, obviando las normas sismo resistentes y sin supervisión de un personal calificado. Según la zonificación sismo geotectónica de la ciudad de Bucaramanga, la litología presente en la zona de la comuna 14 corresponde a rocas metamórficas e ígneas pertenecientes al Neis de Bucaramanga, con una fuerte cristalización; Los suelos corresponden a arenas arcillosas y limosas en los sectores metamórficos, y arcillas arenosas o arenas arcillosas en los sectores ígneos. (BAUTISTA URRUTIA, 2008, pág. 28)



*Figura 11. Casa de Mampostería estructural no confinada, ladrillo macizo “temosa”, disposición en sogas; Comuna 14 “Morrórico”
Fuente los Autores*

La tipología de la zona se puede analizar desde dos puntos de vista taxonómicos, uno arquitectónico y otro estructural. Desde el punto de vista arquitectónico es común encontrar viviendas con el mismo diseño, por lo general las edificaciones se encuentran en lotes que presentan regularidad en planta con una profundidad bastante superior a su ancho; en cuanto a su elevación tienden a tener dos o tres niveles, aunque también pueden encontrarse de 4, 5, ó 6 en algunas ocasiones. Los materiales empleados en estas edificaciones son el concreto reforzado y el ladrillo cocido de arcilla; por lo general los acabados, cuando están presentes, solo se aplican en las fachadas de las viviendas que se encuentran al borde de la vía Bucaramanga – Cúcuta debido al propósito comercial de estas. Desde el punto de vista estructural se pueden apreciar variaciones en el tipo de cimentación, tipo de terrajeo, confinamiento de la mampostería, ancho de columnas y espesores de placa; por esto, el problema de las estructuras presentes en esta zona no solo se limita a la resistencia de la mampostería per se, sino a todos estos factores que trabajan en conjunto. En la zona predomina el uso de mampostería en edificaciones que cuentan con solo columnas, confinamiento en el primer nivel o mampostería de ladrillo no confinada, con una presencia del 78% de las edificaciones. Los materiales más utilizados para la construcción de estructuras de mampostería son los ladrillos H-10 ó el H-15; para efectos de este estudio, se tuvo en cuenta la participación de un 30.3% del ladrillo macizo o “temosa” para muros portantes o cargueros especialmente del primer nivel de la mampostería no confinada, la cual no es apta como sistema estructural en zonas de alta actividad sísmica como lo es la ciudad de Bucaramanga, por lo que se hace necesario el uso de algún tipo de refuerzo. (BAUTISTA URRUTIA, 2008, pág. 45)

El levantamiento de los muros se hace por hiladas sobre una cimentación de viga corrida, empleándose para la unión de los ladrillos un mortero de pega o “picha” según la denominación que se le da en la zona, con un espesor de entre 1.5 y 2 [cm], el cual cumple una dosificación de 2 carretilladas de arena por un bulto de cemento y agua al gusto del maestro hasta alcanzar una contextura apropiada. Para verificar el aplome de los muros el maestro verifica mediante el uso de plomada y nivel la perpendicularidad de cada hilada, el aparejo utilizado para muros cargueros de ladrillo temosa es en soga con el fin de obtener muros con mayor sección transversal que resistan mayores solicitaciones verticales. (ARDILA CUBILLOS & MÉNDEZ RINCÓN, 2003)



Figura 12. Disposición en soga de los ladrillos para muros cargueros, comuna 14 “Morrórico”

Fuente los Autores

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Con el fin de predecir el comportamiento mecánico de un material compuesto como la mampostería, se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las principales características de cada uno de los elementos que lo componen. Se llevaron a cabo ensayos de compresión del mortero de pega y el ladrillo temosa, así como la caracterización completa de las fibras de Furcraea Andina “Fique” utilizada como refuerzo estructural.

2.3.1. Ensayos de compresión del mortero de pega

Los ensayos de compresión de las probetas de mortero están basados en la norma* (NSR-10, 2010) y en la norma (NTC-220, 2004) en la cual se especifica que el mortero debe tener buena plasticidad, consistencia y capacidad de retención de agua; la

* NSR-10, Título D: Mampostería estructural, D.3.4: Mortero de Pega, Bogotá D.C Colombia, Marzo 2010.

dosificación utilizada para el mortero de pega en este estudio es la de un mortero tipo N, por cada (1) unidad de cemento se agregan (3) tres unidades de arena, y agua al gusto.

Se elaboraron (3) tres grupos de (3) tres probetas cubicas de 50 mm de arista para llevar a cabo las pruebas de compresión, realizadas a los 7 días de su elaboración, los resultados se encuentran en el ANEXO A y de su análisis se obtuvo la siguiente tabla:

Resultados Experimentales		
Área Sección [mm]	2500	
Espécimen	Resistencia [Ton]	Esfuerzo [Mpa]
1	0,954	3,82
2	0,966	3,86
3	0,932	3,73
4	0,974	3,90
5	1,022	4,09
6	1,045	4,18
7	0,980	3,92
8	1,099	4,40
9	1,023	4,09
	f'c_{Prom} [Mpa]	4,00

Tabla 2. Resultados ensayos a compresión del mortero

Fuente los autores

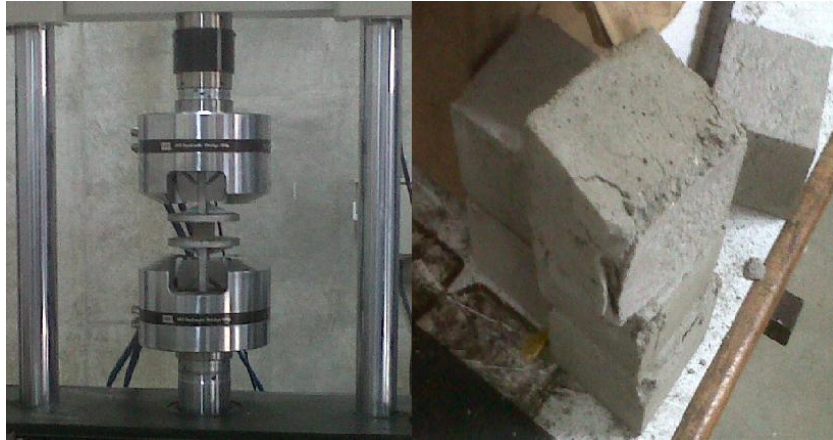


Figura 13. Ensayo a compresión del mortero de pega

Fuente los Autores

2.3.2. Ensayos a compresión del ladrillo temosa

Los ensayos de compresión de los ladrillos de arcilla cocida realizados en este estudio están basados en la norma (NTC-4017, 2005) en la cual se especifica que los especímenes deben ser seleccionados de manera que sean representativos del lote de unidades del que se toman (variedad de colores, texturas, tamaños), además deben estar limpios, secos, a temperatura ambiente y sin materiales extraños no asociados a su fabricación; el número de especímenes que se deben tomar por lote (tamaño máx. lote 100.000 unidades) es de (5) cinco.

Para determinar la resistencia de los ladrillos se realizaron (10) diez pruebas, (5) cinco en la posición soya y (5) cinco con el ladrillo en posición vertical con el fin de caracterizar la presión máxima aplicable a cada uno de los especímenes. Se tomaron videos de estas pruebas los cuales se encuentran en el ANEXO B de este documento.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos a compresión con su respectivo esquema de aplicación de la carga:

- Primeros Ensayos:

Resultados Experimentales 1		
Área Sección [mm]	54400	
Espécimen	Resistencia [Ton]	Esfuerzo [Mpa]
1	75	13,79
2	60	11,03
3	59	10,85
4	40	7,35
5	52	9,56
f'c_{Prom} [Mpa]		10,51

Tabla 3. Resultados ensayos a compresión del ladrillo posición soga

Fuente los Autores



Figura 14. Fallo a compresión del ladrillo posición soga

Fuente los Autores

- Segundos Ensayos:

Resultados Experimentales 2		
Área Sección [mm]	11200	
Espécimen	Resistencia [Ton]	Esfuerzo [Mpa]
1	1,5	1,34
2	1,4	1,25
3	2,6	2,32
4	2	1,79
5	1	0,89
f'c_{Prom} [Mpa]		1,52

Tabla 4. Resultados ensayos a compresión del ladrillo posición vertical

Fuente los Autores



Figura 15. Fallo a compresión del ladrillo posición vertical

Fuente los Autores



*Figura 16. Maquina de ensayos a compresión Edificio Álvaro Beltrán, Universidad Industrial de Santander
Fuente los Autores*

2.3.3. Pruebas a tracción de la Furcraea andina “fique”

Los ensayos de tracción realizados a los sacos de fique tupido número 7 - tres líneas de un solo uso se realizaron acorde con la norma (D-5034, 2009), en la que se especifica el tamaño de la probeta y la velocidad del ensayo, siendo esta última 300 [mm/min].



*Figura 17. Fique tupido número 7 – tres líneas de un solo uso
Fuente los Autores*

Dimensiones de la Probeta	
Largo [cm]	17,5
Ancho [cm]	3

Tabla 5. Dimensiones de la probeta saco de fique tupido número 7, tres líneas de un solo uso
Fuente los Autores

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de biomateriales de la escuela de metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, ciudad de Bucaramanga. Antes de proceder a realizar la prueba, testigo y contratestigo fue necesario calibrar las pinzas de la máquina de tracción con el fin de obtener resultados confiables, para esto se realizaron tres pruebas preliminares. Los resultados de las pruebas así como videos de las mismas se encuentran en el ANEXO C de este documento.

Del análisis de resultados se obtuvo la siguiente caracterización para el saco de fique tupido número 7, tres líneas de un sólo uso:

Caracterización Saco de Fique tupido número 7, tres líneas de un sólo uso				
Ensayo	E [Mpa]	Fluencia [Mpa]	Carga Máx [N]	Ruptura [mm]
Prueba	165,2	8,41	612	32,48
Testigo	143,2	9,85	594	24,6
Contratestigo	137,3	8,03	505	9,33
Promedio	148,6	8,76	570,3	22,14
			57,0 [Kg]	

Tabla 6. Resultados caracterización saco de fique tupido número 7, tres líneas de un solo uso
Fuente los Autores

2.3.4. Definición del pegante para la interfaz del refuerzo

Durante el proceso de selección del material que se utilizó para proporcionar la adhesión del fique a la superficie de los muros, se contempló inicialmente la utilización del yeso dental tipo IV debido a experiencias previas en donde se implementaba este material en la

instalación de cielos rasos en el centro comercial cuarta etapa de la ciudad de Bucaramanga. Con el fin de probar la efectividad del pegante, se realizó un montaje experimental con el cual se pretendía observar la respuesta de la interfaz del fique y el ladrillo ante la acción de una fuerza cortante, comprobando así, que la falla fue causada por la resistencia a tracción del fique y no por la poca adherencia de la fibra a las unidades de mampostería. Este material fue descartado por su bajo rendimiento al momento de su aplicación y su alto costo al no ajustarse al objetivo social de este estudio.

La segunda alternativa para el pegante fue el cemento mezclado con agua, denominado “pasta”, contemplado debido a sus buenas propiedades a la compresión y a cortante. Al realizarse el mismo esquema experimental que se utilizó para el yeso dental se obtuvieron resultados parecidos por lo que este material fue el seleccionado como pegante debido a su buena resistencia y rendimiento por metro cuadrado, así como su bajo costo en relación con el yeso dental, aproximadamente 8 veces más económico.



Figura 18. Esquema experimental para pruebas de la unión fique – ladrillo

Fuente los Autores

2.4. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

2.4.1. Ensayo Pseudo Estático

Para la comprensión de los mecanismos de fallo, análisis de resistencia y procesos de colapso de los muros de mampostería estructural según la tipología encontrada en la comuna 14 “Morrórico”, se plantea la realización de un ensayo pseudo-estático de carga cíclica en el que el espécimen se somete a una historia predefinida de desplazamientos, el cual se realiza a una velocidad lenta en comparación con las velocidades de deformación esperables durante un evento sísmico.

Se realizó la construcción de seis (6) muros de mampostería estructural no confinada no reforzada, utilizando ladrillos “temosa” de arcilla cocida de resistencia a la compresión conocida mediante pruebas de laboratorio (Numeral 2.3.2 del presente documento), los cuales se unieron con una brecha de mortero tipo N de resistencia mínima a la compresión F'_{cp} de 7.5 Mpa propuesta por la (NSR-10, 2010), pero cuya resistencia real (Numeral 2.3.1 del presente documento) para el caso específico de los especímenes de prueba de este proyecto fue menor por fallas en la dosificación por parte de la persona encargada de la construcción de los ejemplares. Las dimensiones de los muros son las mismas para los 6 especímenes siendo, 1.8 metros de largo, 1.8 metros de alto y 16 centímetros de ancho. Por investigaciones previas a la realizada en este proyecto, el laboratorio de estructuras del edificio Álvaro Beltrán contaba con 18 vigas de concreto reforzado de base 30 centímetros, altura 30 centímetros y largo 2 metros, por lo que se decidió utilizar algunos de dichos elementos como una forma de simulación de la viga corrida de cimentación presente en las edificaciones construidas en sistema de mampostería estructural, representando así, un ahorro en el costo de la creación de cada uno de los especímenes de prueba. El esquema experimental completamente terminado se muestra a continuación:

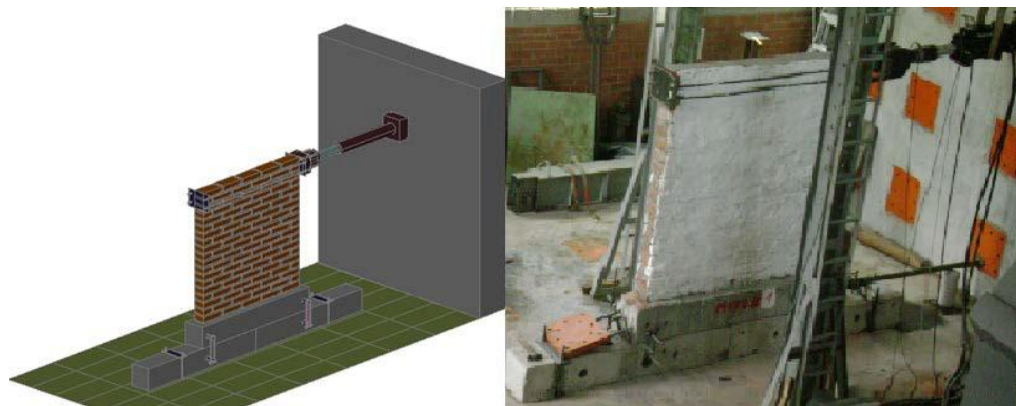


Figura 19. Vista 3D del montaje experimental

Fuente los autores

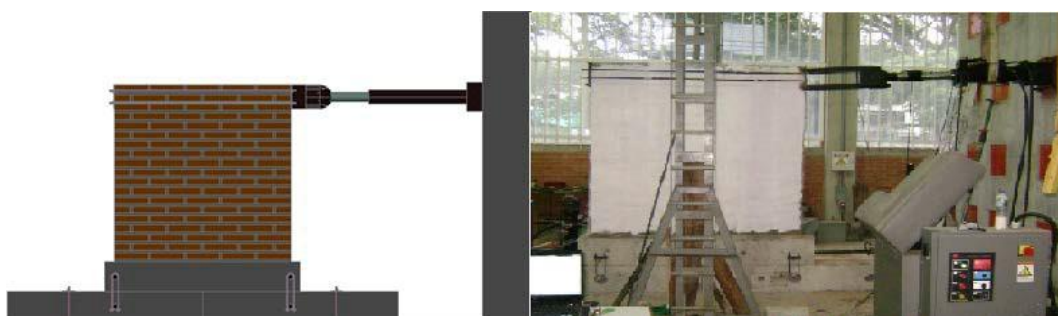


Figura 20. Vista lateral del montaje experimental

Fuente los autores

Durante los ensayos pseudo estáticos propuestos anteriormente, se presentaron una serie de inconvenientes de tipo experimental que conllevaron a la reducción de la cantidad de configuraciones de refuerzo propuestas en un inicio (de cinco a tres) y que no permitieron la implementación de la carga vertical durante la prueba, por lo cual, el modo de falla obtenido no permitió una correcta caracterización del aporte de refuerzo con mallas de fibra de fique. Es por esto que se implementó un ensayo a compresión diagonal sobre muretes extraídos de los muros construidos originalmente y cuyo procedimiento está explicado en detalle en el numeral 2.4.2 del presente documento. Las condiciones de laboratorio, el esquema experimental, el desarrollo de las pruebas pseudo estáticas, el análisis de las situaciones presentadas durante el desarrollo de las pruebas y sus respectivos resultados se encuentran en el ANEXO D de este documento.

2.4.2. Ensayo a compresión diagonal

La aplicación de este ensayo tiene como objeto la determinación de la resistencia de muros de mampostería, de forma experimental, ante esfuerzos cortantes o de tensión diagonal producidos por la aplicación de una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales, causando así, una falla por tensión diagonal con el espécimen separándose paralelo a la dirección de la carga.

Este método fue desarrollado para medir de una manera más precisa el esfuerzo cortante al que resiste la mampostería. El tamaño de espécimen debe ser representativo del tamaño original de los muros de mampostería permitiendo su uso en las máquinas de pruebas de los laboratorios. (ASTM-E519-02)

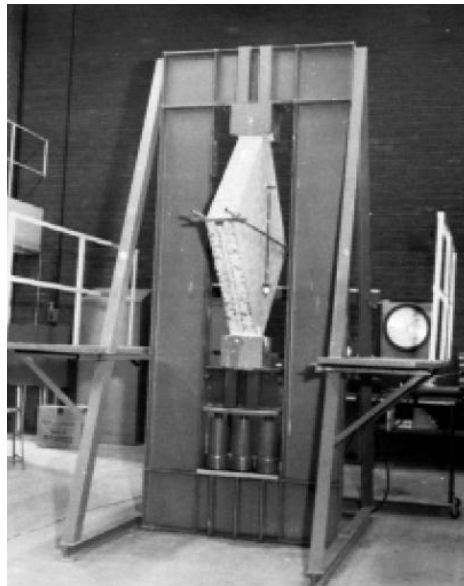


Figura 21. Esquema general del ensayo de compresión diagonal
(ASTM-E519-02)

Los muretes deberán tener una longitud de al menos una vez y media veces la longitud de la pieza y el número de hiladas necesario para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud. Los muretes se ensayarán a una carga de compresión monótona a lo largo de su diagonal para posteriormente calcular el esfuerzo cortante medio. (NTCM, 2004)

El número de especímenes debe ser al menos tres, construidos con el mismo tamaño, tipo de unidades de mampostería y mortero. Después de la construcción, los especímenes no deben moverse durante al menos siete días y deberán ser guardados en el laboratorio no menos de veintiocho (28) días, manteniéndolos a una temperatura entre 24 y 8 grados centígrados. (ASTM-E519-02)

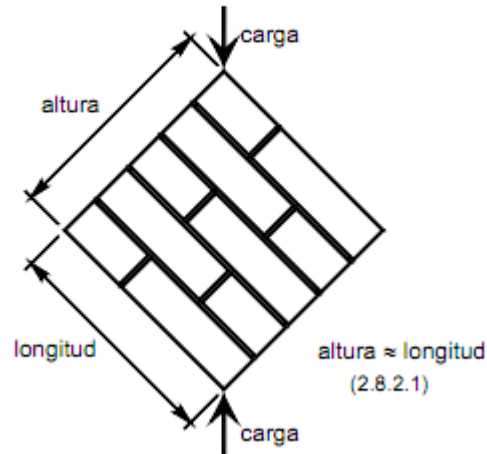


Figura 22. Murete para prueba en compresión diagonal
(NTCM, 2004)

2.4.3. Condiciones de Laboratorio

En el proceso de determinar la contribución que le genera el reforzamiento con mallas de fibra de Furcraea Andina “Fique” a la resistencia lateral de un muro de mampostería estructural, se hace necesario el desarrollo de un experimento en donde se obtenga las características mecánicas de muretes de mampostería, tanto reforzada como no reforzada, ante la acción de una fuerza cortante, como una representación de lo que sería el esfuerzo presentado en un muro en el momento de ocurrencia de un evento sísmico. Para ello se dispuso del laboratorio del grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción – INME, ubicado en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander.

El laboratorio cuenta con dos equipos esenciales para la construcción y ensayo de los especímenes requeridos en este proyecto. Estos son:

Puente Grúa con capacidad de 5000kg:

Máquina utilizada para la elevación y transporte de materiales y equipos, tanto en interior como en exterior, de uso muy común tanto en almacenes industriales, como talleres. Se trata de una estructura elevada formada por una o varias vigas metálicas, con un sistema de desplazamiento de 4 ruedas sobre rieles laterales, movidos por uno o más motores eléctricos, con un sistema elevador central mediante polispasto y gancho.*



Figura 23. Puente Grúa con capacidad de 5000Kg

Fuente los Autores

Máquina de ensayos universales MTS Test system 810:

Máquina que tiene la capacidad de realizar pruebas de cargas estáticas y dinámicas en materiales y componentes, la cual posee un sistema variado de cargas controladas y diferentes grados de flujo en el servo-válvula. El sistema MTS 810 puede ser fácilmente configurado para cumplir con las necesidades de cada material o componente que se quiera probar y tiene una capacidad de hasta 500kN. Se pueden utilizar diferentes

* <http://www.sigweb.cl/biblioteca/PuentesGruas.pdf>

materiales desde plásticos, aluminio, compuestos hasta aceros. Tiene una gran versatilidad en la realización de ensayos, permitiendo desarrollar pruebas de tensión, compresión, fatiga, fractura mecánica y durabilidad de los materiales.*



Figura 24. Máquina de ensayos universales MTS Test System 810

Fuente los Autores

2.4.4. Esquema experimental

Para la realización de los ensayos a compresión diagonal se extrajeron tres (3) muretes de 50 cm de alto por 50 cm de ancho, de cada uno de los muros previamente construidos, representando las tres configuraciones de refuerzo con malla de fique y el muro en su estado original, dando un total de doce (12) muretes.

* <http://labomecanica.tol.itesm.mx/laboratorio/documentacion/MTS.pdf>



Figura 25. Murete de mampostería sobre bases de madera

Fuente los Autores

Con el fin de adaptar la prueba de compresión diagonal a la máquina de ensayos universales se elaboró dos bases de madera, para darle estabilidad al murete durante las pruebas y asegurar la distribución de la carga a lo largo de su diagonal.



Figura 26. Bases de madera para ensayo a compresión diagonal

Fuente los Autores

Finalmente se obtiene el montaje experimental necesario para la ejecución de las pruebas requeridas para este proyecto.

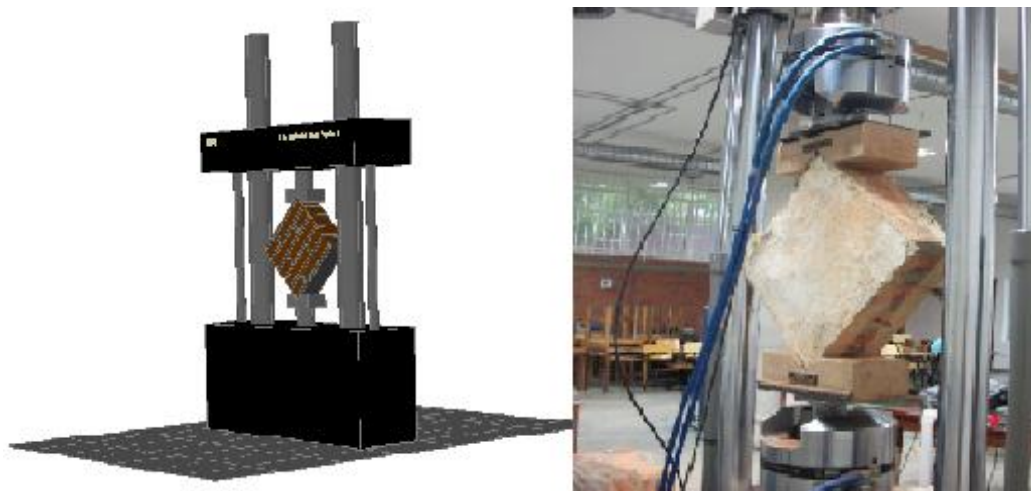


Figura 27. Vista 3D del montaje experimental
Fuente los autores

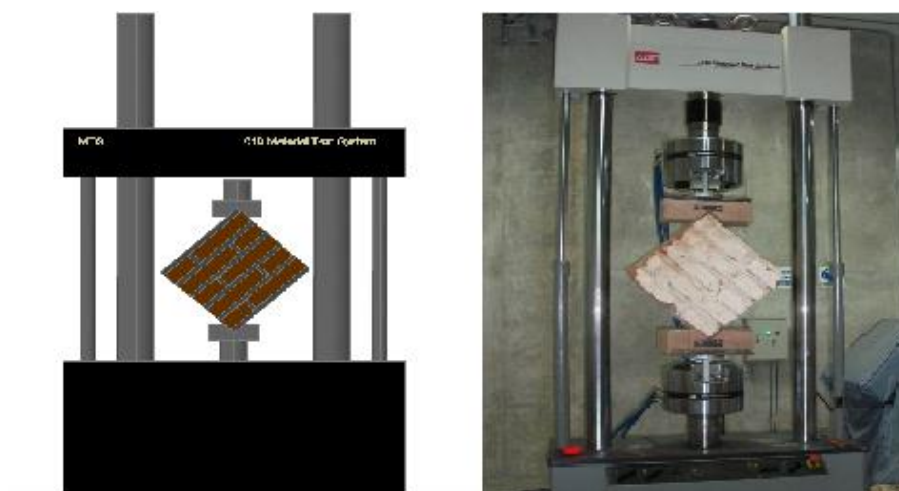


Figura 28. Vista lateral del montaje experimental
Fuente los autores

2.4.5. Construcción de especímenes

En la construcción de los cuatro (6) muros de prueba, se contó con la presencia de un maestro de construcción, simulando el proceso que se presenta en la comuna 14 “Morrórico”. La utilización de herramientas como palustre, nivel y plomada fueron de vital importancia para el levantamiento de cada uno de los muros objetos de estudio.

Durante el proceso, los materiales fueron almacenados dentro del laboratorio de estructuras del edificio Álvaro Beltrán encima de tableros de madera, con el fin de prevenir el deterioro anormal o la contaminación a causa de agentes externos, como lo es, en el caso de la conservación del cemento en bolsa, la humedad.



Figura 29. Almacenamiento de materiales

Fuente los autores

Con el fin de asegurar la adherencia del mortero a la viga de cimentación se crearon pequeñas aberturas en la superficie de contacto entre la viga de cimentación y la primera hilada del mortero de pega.



Figura 30. Primera hilada de mortero

Fuente los autores

Durante el levantamiento de los muros, se siguió el patrón de colocación de las unidades presentado en la tipología de la comuna 14 “Morrórico”, siendo este, un aparejo de ladrillos puesto en sogá como se presenta en la figura 31.



Figura 31. Proceso de construcción de muros.

Fuente los Autores

Terminada la construcción de los muros de mampostería se procede con la aplicación del refuerzo con mallas de fibra de fique, cuya configuración de refuerzo se explica en detalle al final del capítulo 3. Se aplica una capa de pintura blanca con el fin de determinar con mayor facilidad las grietas presentadas en cada uno de los especímenes durante la prueba.



Figura 32. Aplicación del refuerzo y pintado de muros.

Fuente los Autores

Finalmente, por medio de una pulidora eléctrica y con la ayuda de un oficial de la construcción, se extraen los doce (12) muretes con los que se va a realizar los ensayos a compresión diagonal.



Figura 33. Extracción de muretes de prueba.

Fuente los Autores

3. DEFINICIÓN DE CARGAS Y ANÁLISIS DE REFUERZO

3.1. ANÁLISIS DE FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

Con el propósito de estimar el valor de cortante que actúa sobre una estructura tipo de la comuna 14 “Morrórico”, se llevó a cabo un análisis de fuerza horizontal equivalente basado en los planos estructurales de una casa ubicada en la zona con la tipología de estudio (BAUTISTA URRUTIA, 2008) siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10, 2010). Con este análisis, se calculó el valor de cortante que afecta la estructura ante la presencia de un sismo. A continuación se observan las plantas estructurales y el corte de fachada de la casa tomada como ejemplo para el análisis:

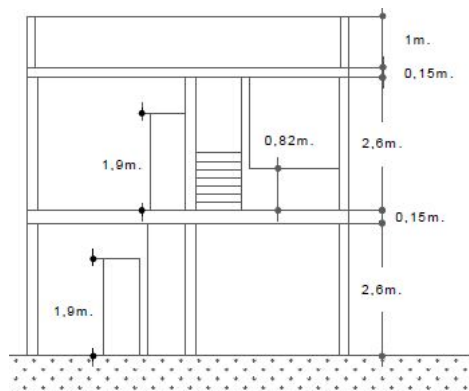


Figura 34. Corte fachada, Casa Buenos Aires
(BAUTISTA URRUTIA, 2008)

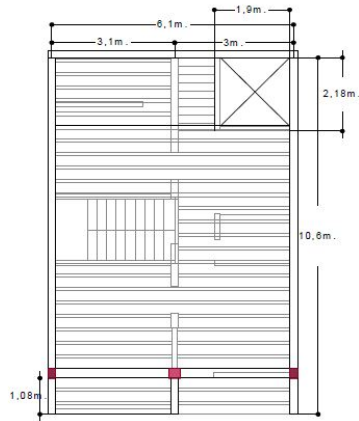


Figura 35. Planta estructural primer piso, Casa Buenos Aires
(BAUTISTA URRUTIA, 2008)

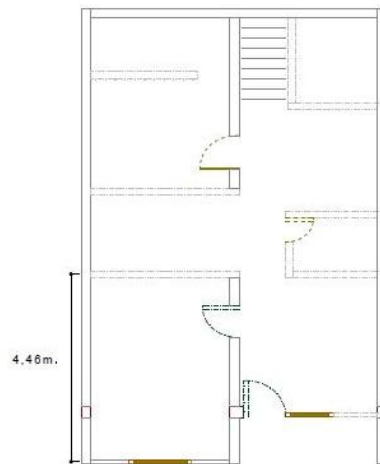


Figura 36. Planta estructural segundo piso, Casa Buenos Aires
(BAUTISTA URRUTIA, 2008)

El análisis de fuerza horizontal equivalente se llevó a cabo en SAP 2000 versión estudiantil. El esquema general del análisis se muestra a continuación y se encuentra detallado en el ANEXO E de este documento:

1. Se definió la grilla para generar el modelo en SAP, así como el centroide de la placa.

2. Se calcularon las cargas verticales que actúan sobre las viguetas y posteriormente las que actúan sobre los muros estructurales para definir el peso de casa piso, de lo que se obtuvo una fuerza vertical de 17.11 [KN/m].
3. Una vez definida la geometría y las cargas verticales que actúan sobre la estructura se procedió a determinar, según la (NSR-10, 2010), el periodo fundamental de la estructura en la dirección X y Y, haciendo las comprobaciones necesarias, a partir de estos valores, se determinó el valor de las fuerzas horizontales para derivas (f_i) y las fuerzas sísmicas (E_i) aplicadas en cada nivel, de lo que se obtuvo que la estructura cumple las derivas máximas permitidas debido a la gran rigidez de los muros.
4. Con las fuerzas sísmicas (E_i) halladas en el numeral anterior y las cargas verticales del numeral 2, se procedió a analizar en el modelo numérico la respuesta de la estructura, de lo que se obtuvo las reacciones a cortante en la base de la estructura; con estos valores de cortante se calculó que los muros laterales de la estructura, cuyas dimensiones 10.6 [m] de largo y 2.6 [m] de alto, reciben un cortante máximo de 25.246 [Ton].

De este análisis de fuerza horizontal equivalente se obtuvo que el cortante máximo que debe resistir un muro estructural de la casa tipo tomada como referencia en este estudio es de 25.246 [Ton] para ser aceptable como sistema estructural en la comuna 14 "Morrórico".

3.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL DE LOS MUROS SEGÚN LA NSR-10

Dentro de los análisis necesarios para hacer una correcta caracterización de los muros objeto de estudio se consideró importante determinar la resistencia nominal teórica a compresión y a cortante de los especímenes del laboratorio, estos cálculos se efectuaron

según lo estipulado en la (NSR-10, 2010) Titulo D. La hoja electrónica con estos cálculos se encuentra en el ANEXO F de este documento y el análisis se muestra a continuación:

1. Primero se lleva a cabo la determinación de la Resistencia de la mampostería a compresión f'_m por medio de registros históricos, determinación experimental sobre muretes de prueba o mediante ensayos sobre los materiales individuales; En este caso f'_m se determinó a partir de ensayos realizados sobre los materiales individuales para lo cual se utilizaron las ecuaciones D.3.7-1 y D.3.7-2 de la presente norma respectivamente:

$$R_m = \left(\frac{2h}{75+3h}\right) f'_{cu} + \left(\frac{50k_p}{75+3h}\right) f'_{cp} \leq 0.8f'_{cu} \quad \text{D.3.7-1}$$

h : Altura de la unidad de mampostería, en [mm], para ser empleada en la ecuación D.3.7.1.

k_p : Factor de corrección por absorción de la unidad, adimensional, en la determinación de la resistencia a la compresión de la mampostería no inyectada.

$$k_p = 1.4 \text{ para unidades de concreto}$$

$$k_p = 0.8 \text{ para unidades de arcilla o sílico-calcáreas}$$

f'_{cp} : Resistencia especificada a la compresión del mortero de pega, MPa.

f'_{cu} : Resistencia especificada a la compresión de la unidad de mampostería medida sobre área neta, MPa.

R_m : Parámetro definido por medio de la ecuación (D.3.7-1).

Siendo,

$$h = 70 [mm]$$

$$k_p = 0.8$$

$$f'_{cp} = 4.0 [Mpa]$$

$$f'_{cu} = 10.51 [Mpa]$$

$$R_m \text{ Formula} = 5.72$$

$$0.8f'_{cu} = 8.408$$

$$R_m \text{ Tomado} = 5.72$$

Continuando con el Análisis,

$$f'_m = 0.75R_m \quad \text{D.3.7-2}$$

$$f'_m = 4.29 \text{ [Mpa]}$$

2. Una vez determinado f'_m se procede a calcular el módulo de elasticidad y de cortante según el numeral D.5.2. de la NSR-10. Los registros históricos del módulo de elasticidad determinados experimentalmente para proyectos de construcción, pueden utilizarse en diseños posteriores de obras con materiales similares. En ausencia de los valores experimentales como es el caso de este estudio, puede emplearse lo siguiente:

Para mampostería en arcilla el módulo de elasticidad según D.5.2-3 es:

$$E_m = 900f'_m \leq 20000 \text{ [Mpa]}$$

$$E_m = 3219.868 \text{ [Mpa]}$$

Para mampostería en arcilla el modulo de cortante según D.5.2-5 es:

$$G_m = 0.4E_m$$

$$G_m = 1287.947 \text{ [Mpa]}$$

3. Con el fin de hacer un análisis de esfuerzos de trabajo admisibles, se deben determinar ciertas características dimensionales efectivas las cuales se encuentran en el D.5.4 de la (NSR-10, 2010) y se muestran en detalle a continuación:

l_w : Longitud horizontal del muro, [mm]

A_e : Área efectiva de la sección de mampostería, [mm²]

t : Espesor efectivo de la sección para evaluar efectos de pandeo, [mm]

h' : Altura efectiva de la sección para evaluar efectos de pandeo, [mm]

b : Ancho efectivo, [mm]

$$b = \frac{A_e}{l_w}$$

A_{mv} : Área efectiva para determinar esfuerzos cortantes, [mm²]

$$A_{mv} = bl_w$$

h'/t : Factor

R_e : Factor de Reducción por esbeltez, D.5.5-2:

$$R_e = 1 - \left[\frac{h'}{42t} \right]^2 \text{ para } \frac{h'}{t} \leq 30$$

$$R_e = \left[\frac{21t}{h'} \right]^2 \text{ para } \frac{h'}{t} < 30$$

Siendo,

$$l_w = 10600 [mm]$$

$$A_e = 54400 [mm^2]$$

$$t = 160 [mm]$$

$$h' = 2600 [mm]$$

$$b = 5.13 [mm]$$

$$A_{mv} = 54400 [mm^2]$$

$$h'/t = 16.25$$

$$R_e = 0,850$$

4. A partir de los parámetros definidos en los numerales anteriores se procede a hacer un análisis por esfuerzos de trabajo admisibles Apéndice D-1.5 de la (NSR-10, 2010) para determinar las resistencias teóricas de los muros construidos en el laboratorio, como se muestra:

- Esfuerzo y Fuerza de compresión Axial:

$$F_a = 0.2f'_m R_e$$

$$F_a = 0.730 \text{ [Mpa]}$$

Para determinar la fuerza a compresión que resiste el muro se opero el esfuerzo con el área que trabaja a compresión, la cual es t (160) x l (10600) [mm] del muro:

$$\text{Fuerza } F_a = 0.730 \left(160 * \frac{10600}{10000} \right) \text{ [Ton]}$$

$$\text{Fuerza } F_a = 123.82 \text{ [Ton]}$$

- Compresión por flexión:

$$F_b = 0.33 f'_m \leq 14 \text{ [Mpa]}$$

$$F_b = 1.42 \text{ [Mpa]}$$

- Tracción por flexión: La tracción por flexión está definida en la tabla D-1.5-1 “Esfuerzos admisibles para tracción por flexión de la mampostería con aparejo trabado F_t [Mpa]” de la (NSR-10, 2010), para morteros de mampostería en dirección perpendicular tanto para la junta horizontal como vertical, de lo que se obtienen los siguientes valores:

F_{th} : Tracción por flexión en la dirección perpendicular a las juntas horizontales

$$F_{th} = 0.17 \text{ [Mpa]}$$

F_{tv} : Tracción por flexión en la dirección perpendicular a las juntas verticales

$$F_{tv} = 0.33 \text{ [Mpa]}$$

- Esfuerzo y fuerza por cortante D-1.5-12:

$$F_v = \sqrt{\frac{f'_m}{40}} \leq 0.56 \text{ [Mpa]}$$

$$F_v = 0.05 \text{ [Mpa]}$$

Para determinar la fuerza a cortante que resiste el muro se opero el esfuerzo con el área que trabaja a cortante, la cual es $t (160) \times l (10600)$ [mm] además de un factor de seguridad $j=0.8$, así:

$$\text{Fuerza } F_v = 7.03 \text{ [Ton]}$$

De los resultados presentados en este numeral se establece entonces que la resistencia nominal a fuerza axial y cortante de los muros de la casa tipo son respectivamente:

$$\text{Fuerza } F_a = 123.82 \text{ [Ton]}$$

$$\text{Fuerza } F_v = 7.03 \text{ [Ton]}$$

Estos valores son de gran importancia para efectos comparativos entre los valores teóricos y los requerimientos de la normatividad presente.

3.3. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA TEÓRICA CONTRA LA RESISTENCIA SOLICITADA

La norma sismo resistente colombiana (NSR-10, 2010) define como uno de los requisitos generales para las estructuras en mampostería estructural^{*} la resistencia ante cargas horizontales en dos direcciones en planta, es por esto que se plantea una comparación directa entre la resistencia teórica de un sistema estructural que no es aceptado a causa de su poca disipación de energía en el rango inelástico contra la sollicitación del mismo sistema ante la presencia de un evento sísmico en una zona de alto riesgo.

Los valores mostrados en la figura 37 fueron resultados de los análisis realizados en los numerales 3.1 y 3.2 de este documento, en donde se determinó la fuerza cortante requerida para un muro de una casa tipo de la comuna 14 “Morrórico” por medio de la aplicación de una fuerza horizontal equivalente y la resistencia teórica ante fuerzas cortantes propuesta en el apéndice D-1[†] de la norma sismo resistente colombiana (NSR-10, 2010).

^{*} D.1.4 — Requisitos generales para las estructuras en mampostería estructural. (NSR-10, 2010)

[†] Diseño de mampostería estructural por el método de los esfuerzos de trabajo admisibles. (NSR-10, 2010)

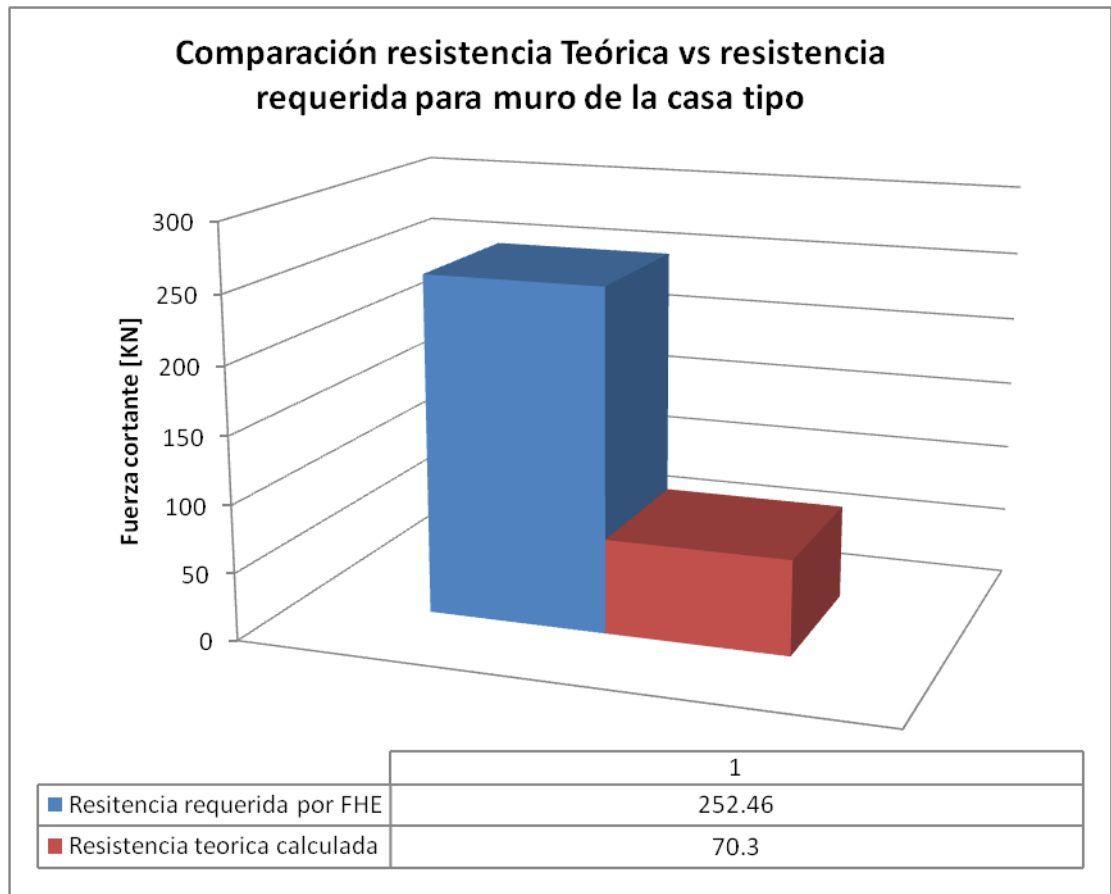


Figura 37. Comparación resistencia teórica vs resistencia requerida

Fuente los Autores

La representación gráfica mostrada en la figura anterior deja ver la gran diferencia entre la resistencia solicitada a un muro que cumple función estructural por la acción de un evento sísmico y la resistencia teórica del mismo, siendo la primera, aproximadamente 3.6 veces más grande que la segunda; De esto se puede inferir el acierto de la normatividad al prohibir el uso de este sistema estructural en zonas catalogadas como de alto riesgo sísmico.

3.4. MODELO NUMÉRICO CUALITATIVO

Se elaboraron dos modelos numéricos correspondientes a los muros a escala real y a los muretes con la finalidad de estimar la distribución de esfuerzos y el posible tipo de falla.

3.4.1. Descripción y construcción

En el proceso de análisis de los esfuerzos producidos por la aplicación de una fuerza a cada uno de los especímenes, se crearon modelos numéricos cualitativos de un muro en tamaño real y de un murete con el fin de obtener los resultados más precisos en la distribución de esfuerzos y el modo de falla del elemento. Para ello, se utilizó el software integrado para el diseño y simulación de estructuras basadas en elementos finitos, MIDAS GEN. A continuación se presenta un breve repaso de la construcción del modelo:

1. Definición de las unidades con las que se desea trabajar.
2. Definición los materiales que se van a utilizar en el modelo.

Tree menu > properties > material > add > elección del concreto reforzado.

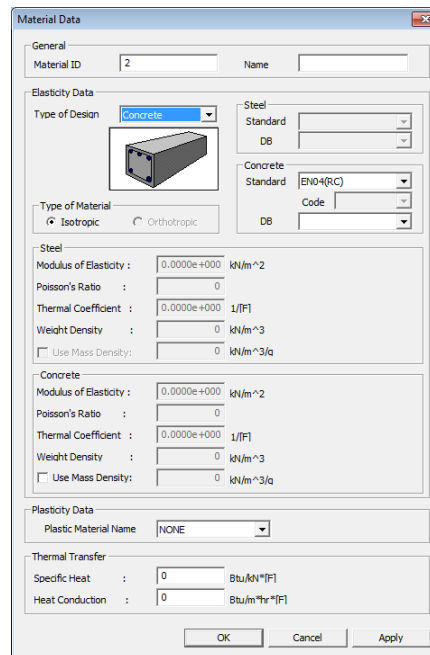


Figura 38. Definición del material, modelo MIDAS GEN

Fuente los Autores

- Definición del material plástico para conceder las propiedades de mampostería a los datos del material definido en el paso anterior. Cabe destacar la imposibilidad para modificar ciertas propiedades mecánicas de los materiales a causa del software de modelamiento utilizado, lo que limita en cierta forma el modelo presentado.

Tree menu > properties > plastic material > add > elección del modelo de mampostería e ingreso de las propiedades geométricas de los especímenes de este proyecto.

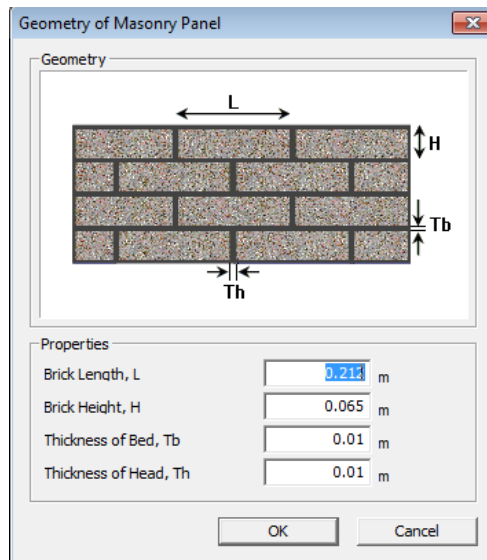


Figura 39. Definición del material plástico, modelo MIDAS GEN
Fuente los Autores

4. Definición del espesor de las unidades de mampostería.

Tree menu > properties > tickness > add > elección del espesor deseado.

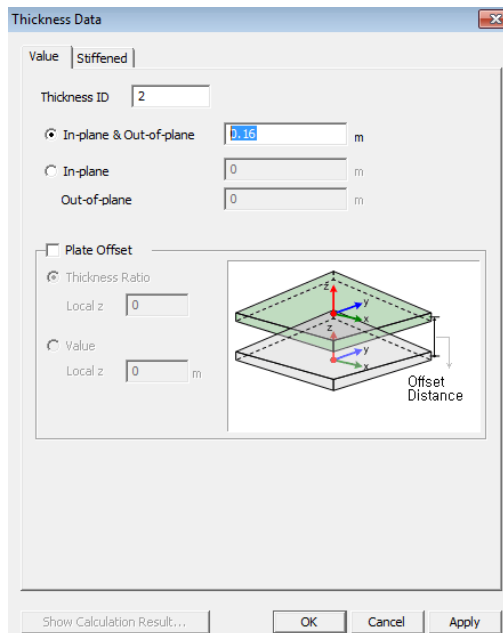


Figura 40. Definición del espesor, modelo MIDAS GEN
Fuente los Autores

5. Creación del muro con las propiedades definidas anteriormente y siguiendo la geometría de los especímenes de prueba.

Tree menu > geometry > elements > create > creación de los elementos.

6. División de los elementos para mayor presión en la obtención de esfuerzos ante la acción de las cargas.

Tree menu > geometry > elements > divide > elección de divisiones tanto para el eje X como para el eje Y.

7. Definición de los apoyos en la base del muro.

Tree menu > geometry > boundaries > supports > elección de restricción de movimiento y rotación en todos los ejes para los puntos deseados.

8. Definición de la carga nodal a aplicar, creación de los casos de carga y sus respectivas combinaciones.

Para el modelo de un muro real:

Tree menu > static loads > static load cases > creación del caso de carga lateral.

Tree menu > static loads > nodal loads > creación de la carga horizontal requerida.

Tree menu > static loads > create load cases using load combinations > creación de las combinaciones de carga en donde se usa la carga lateral impuesta al muro sumado de la carga producida por el peso propio.

Para el modelo de un murete:

Tree menu > static loads > static load cases > creación del caso de carga.

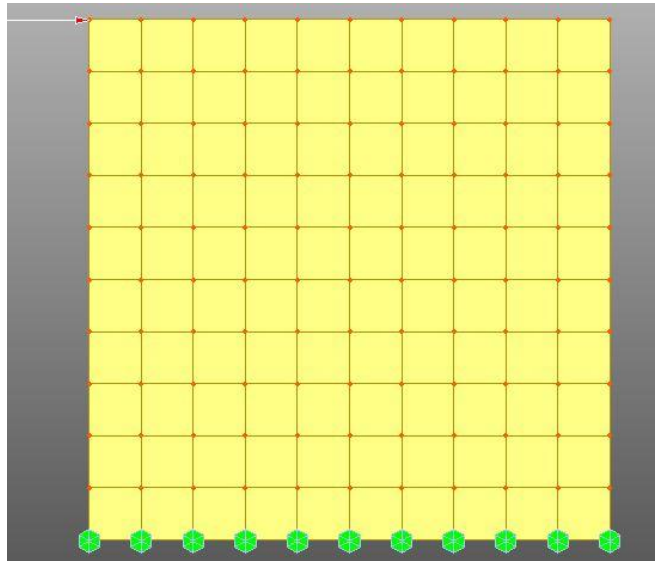


Figura 41. Modelo final MIDAS GEN

Fuente los Autores

3.4.2. Análisis de un Muro de tamaño real

El análisis de fuerza horizontal equivalente permite determinar la resistencia que debe tener un muro estructural ante la presencia de un evento sísmico, es por esto que se incorporó la creación de un modelo numérico el cual simulará el efecto de la máxima fuerza lateral y vertical generada por la ocurrencia de un sismo en un muro con las características geométricas del muro expuesto en este proyecto para consigo determinar la tendencia de distribución de los esfuerzos y así realizar una propuesta más acertada en el diseño óptimo de refuerzo con las fibras de fique. La figura 42 muestra la distribución de esfuerzos obtenidos por la aplicación de una carga lateral de 42.9 KN definidos según el análisis de fuerza horizontal equivalente para un muro de 1.8 [m] de largo.

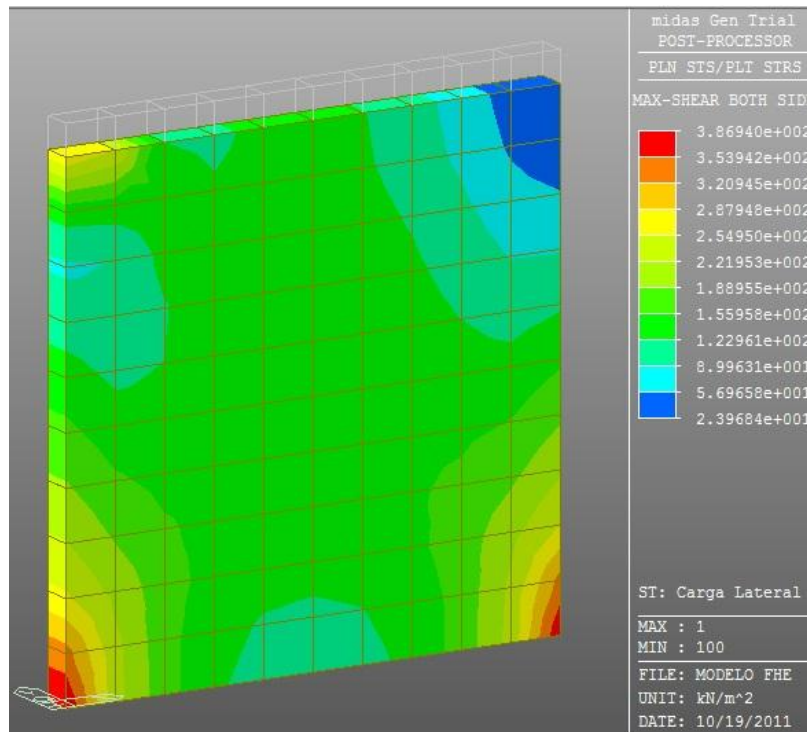


Figura 42. Modelo final MIDAS GEN

Fuente los Autores

La distribución de esfuerzos cortantes presentados en la figura 42 muestra la posible tendencia de falla del muro objeto de estudio a causa de la imposición de una carga horizontal elevada. El ángulo de 45 grados en el que se presenta el incremento de esfuerzos es típico de una falla por cortante debido a la aplicación de la carga lateral y la baja presencia de esfuerzos normales de compresión siendo de gran importancia la adherencia y fricción presentada entre las juntas de mortero y las unidades.

La relación longitud / altura del muro es de gran importancia en el modo de fallo del mismo; por las dimensiones de este caso particular, se presenta un incremento en los esfuerzos en las esquinas inferiores del muro a causa de una posible tendencia al volcamiento, lo que supone por un lado el aplastamiento del bloque y por otro la falla a tracción a causa de la separación de la junta mortero – unidad. De la misma forma se puede apreciar un alto grado de aplastamiento en el lugar de la aplicación de la carga propagándose en el sentido de la fuerza cada vez con menos intensidad. El modelo numérico se encuentra en el ANEXO G de este documento.

3.4.3. Análisis de un Murete

Con el fin de predecir la distribución de esfuerzos en un murete ante la presencia de una carga impuesta en una de las diagonales principales se incorporó la creación de un modelo numérico para el cual se impuso una carga de 10 [ton] basado en modelos previos presentados en (San Bartolomé, Muñoz, & Madalengoitia) en los que se expone la distribución de la fuerza de tal forma que se pueda simular el apoyo de los muretes al llevarse a cabo el experimento; en la figura 43 y figura 44 se muestra la configuración geométrica del modelo y la distribución de esfuerzos cortantes obtenidos ante la aplicación de la carga respectivamente.

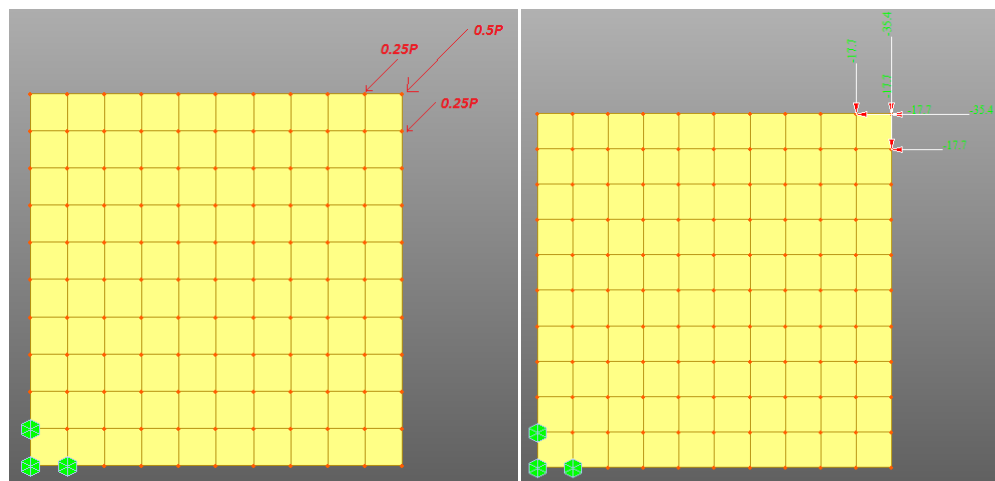


Figura 43. Configuración geométrica del modelo numérico del murete

Fuente los Autores

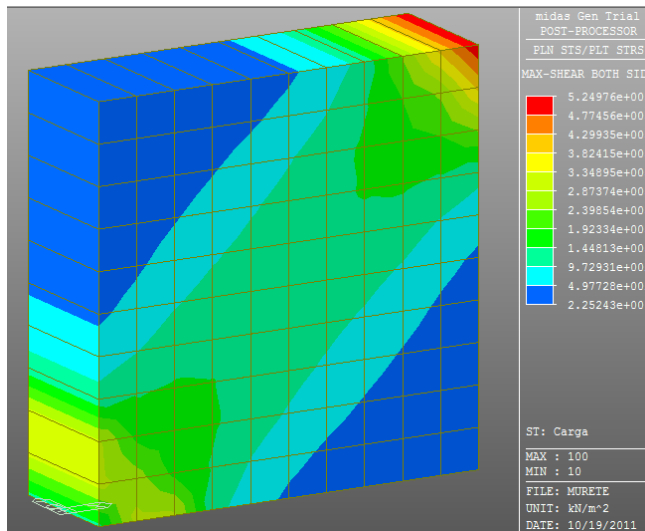


Figura 44. Resultados de esfuerzos para el murete en MIDAS GEN

Fuente los Autores

La distribución de esfuerzos cortantes presentados en la figura 44 muestra la tendencia de falla a tracción de un murete por de la separación de la junta mortero – unidad a causa de la imposición de cargas en una de sus diagonales principales. El ángulo de 45 grados en el que presenta el incremento de esfuerzos es típico de una falla por cortante, siendo de gran importancia la adherencia y fricción presentada entre las juntas de mortero y las unidades; además se presenta un incremento en los esfuerzos en los puntos de aplicación de la carga a causa del aplastamiento de los bloques en estas zonas en particular; La relación longitud / altura de los muretes debe ser de uno según lo expone (ASTM-E519-02).El modelo numérico se encuentra en el ANEXO H de este documento.

3.5. ANÁLISIS DEL REFUERZO

Con base en los resultados obtenidos por los modelos numéricos en donde se muestra la tendencia de la distribución de esfuerzos tanto en los muros de una vivienda tipo de la comuna 14 como en los muretes utilizados en las pruebas de compresión diagonal, y analizando los posibles modos de fallo, se plantearon 3 configuraciones de refuerzo con

mallas de fibra de Furcraea andina “Fique” con el fin de determinar el comportamiento del sistema ante la acción de fuerzas laterales en el plano del muro que infieren en una falla por cortante, deslizamiento del bloque, entre otras.

Para establecer el aporte de la fibra, surge la necesidad de llevar a prueba un espécimen sin ninguna clase de refuerzo, para de esta forma establecer mediante gráficos comparativos la variación de las características propias de un sistema estructural sometido a las fuerzas producidas en un evento sísmico. La nomenclatura y el análisis detallado de cada configuración se presenta a continuación:

- Muro 1: no presenta refuerzo de ninguna clase, es el muro en su estado natural.



Figura 45. Muro 1, sin refuerzo

Fuente los Autores

- Muro 2: presenta un refuerzo sencillo con mallas de fique colocadas a 90 grados con respecto a la horizontal, cuya función es la de aumentar la resistencia al deslizamiento del bloque a causa del esfuerzo cortante presentado en el muro. Su disposición permite utilizar los hilos de fique a la tracción a causa del volcamiento presentado en el lado contrario a la aplicación de la carga.



Figura 46. Muro 2, con refuerzo sencillo a 90 grados

Fuente los Autores

- Muro 3: presenta un refuerzo doble con mallas de fique colocadas a 90 grados con respecto a la horizontal. Además ayudar en el aumento de la resistencia al deslizamiento del bloque y la tracción al igual que el muro 2, permite establecer una comparación en el crecimiento de la resistencia a causa de la cantidad de mallas de refuerzo colocadas y así determinar si el aumento es significativo o no.



Figura 47. Muro 3, con refuerzo doble a 90 grados

Fuente los Autores

- Muro 4: presenta un refuerzo sencillo con mallas de fique colocadas a 45 grados con respecto a la horizontal. Su función principal es la de colaborar en el aumento de la resistencia a la tensión lateral del bloque a causa de los grandes esfuerzos de compresión durante el volcamiento del muro.



Figura 48. Muro 4, con refuerzo sencillo a 45 grados

Fuente los Autores

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los resultados presentes en esta sección corresponden a las pruebas realizadas a cada uno de los muretes probados a compresión diagonal en el laboratorio, así como el tipo de falla expuesto por cada uno de ellos. En el ANEXO I de este documento se encuentran las tablas correspondientes a estos ensayos.

4.1. RESULTADOS MURETE TIPO I

Para los resultados de los muretes tipo 1 los cuales no presentaban ningún tipo de refuerzo se obtuvo una resistencia a cortante aproximada de 43 [KN], además se observa cierta variación en los resultados entre especímenes lo cual se puede visualizar en las figuras 49, 50 y 51.



Figura 49. Curva Carga vs desplazamiento murete 1-1, MTS Test System 810
Fuente los Autores

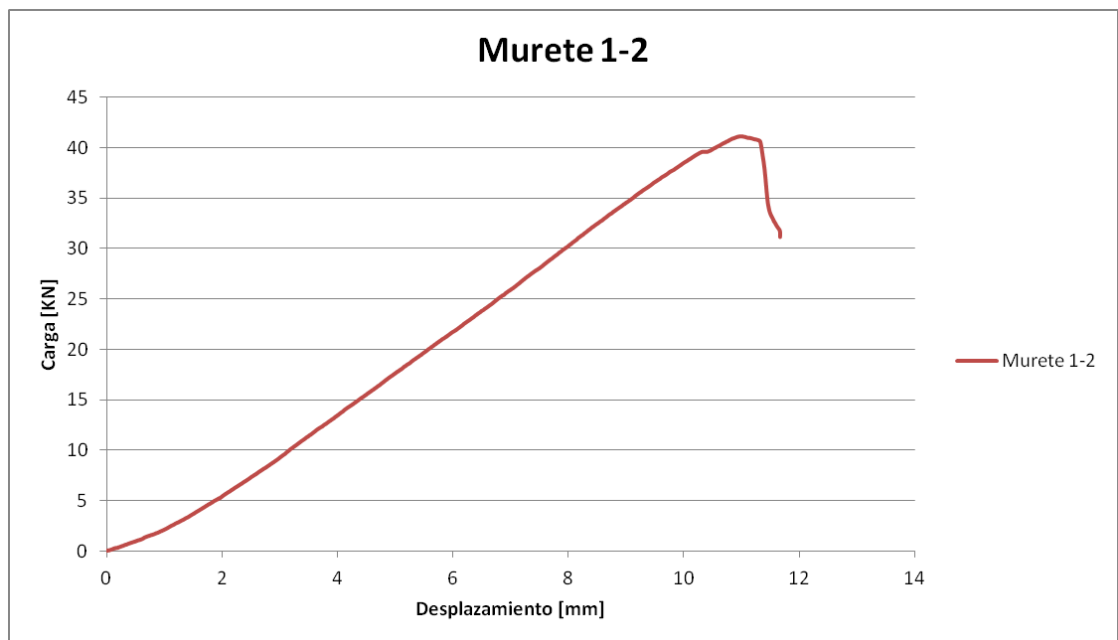


Figura 50. Curva Carga vs desplazamiento murete 1-2, MTS Test System 810
Fuente los Autores

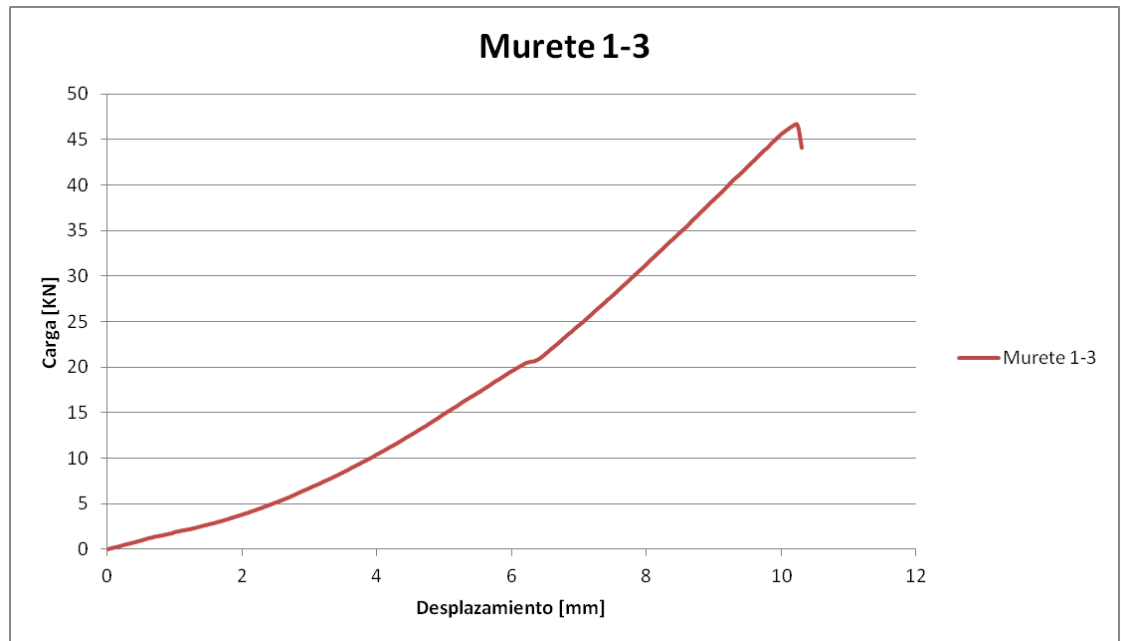


Figura 51. Curva Carga vs desplazamiento murete 1-3, MTS Test System 810

Fuente los Autores

En la figura 52 se puede observar una falla en los especímenes a lo largo de su diagonal causada por el efecto de la carga aplicada, además se destaca que esta falla se presentó de manera súbita al momento de realizarse los ensayos.



Murete 1-1

Murete 1-2

Murete 1-3

Figura 52. Fallas muretes tipo 1

Fuente los Autores

4.2. RESULTADOS MURETE TIPO II

Para los resultados de los muretes tipo 2 los cuales presentaban refuerzo sencillo con las fibras orientadas a 90° , se obtuvo una resistencia a cortante con cierta variación entre las pruebas debido a posibles cambios en los materiales y/o mano de obra por parte de la persona encargada de la construcción de los mismos, es por esto que el murete 2-1 no presenta una resistencia representativa por lo que no será tenido en cuenta para análisis posteriores. Los resultados de los especímenes se pueden visualizar en las figuras 53, 54 y 55.

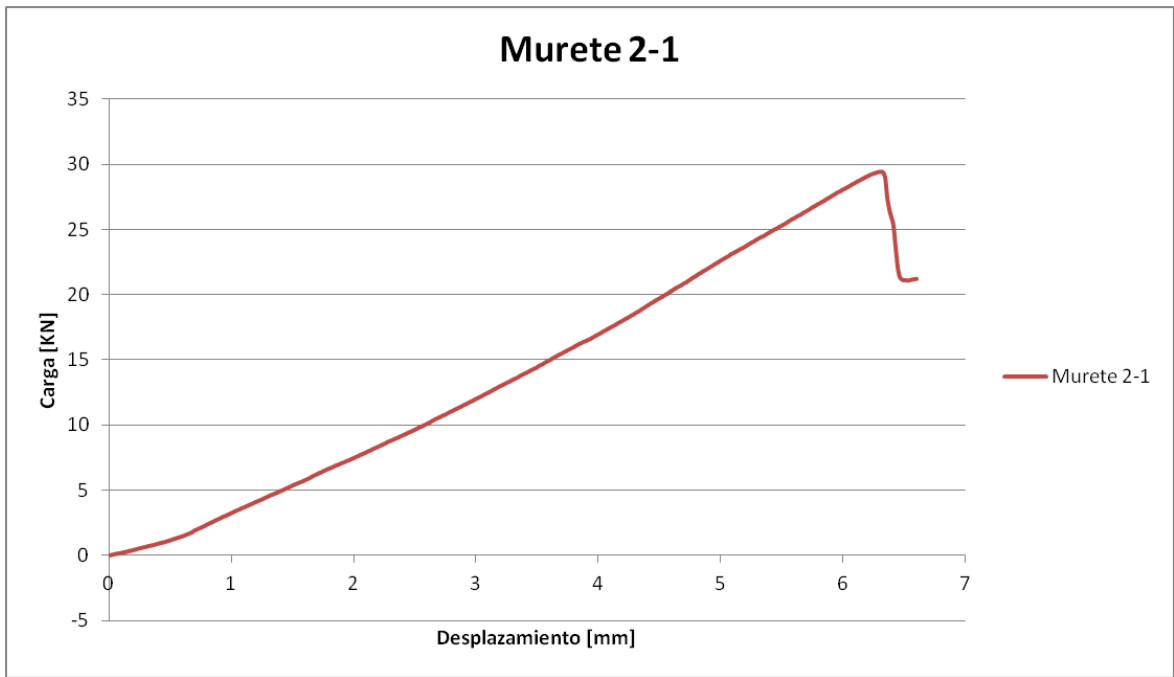


Figura 53. Curva Carga vs desplazamiento murete 2-1, MTS Test System 810
 Fuente los Autores

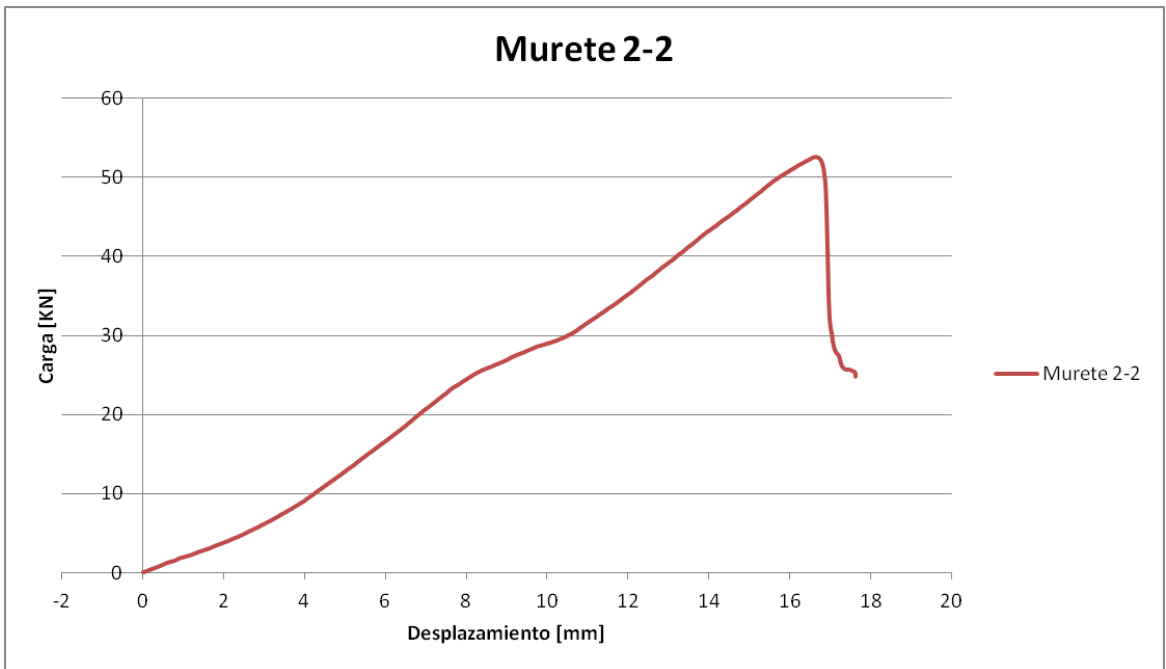


Figura 54. Curva Carga vs desplazamiento murete 2-2, MTS Test System 810
 Fuente los Autores

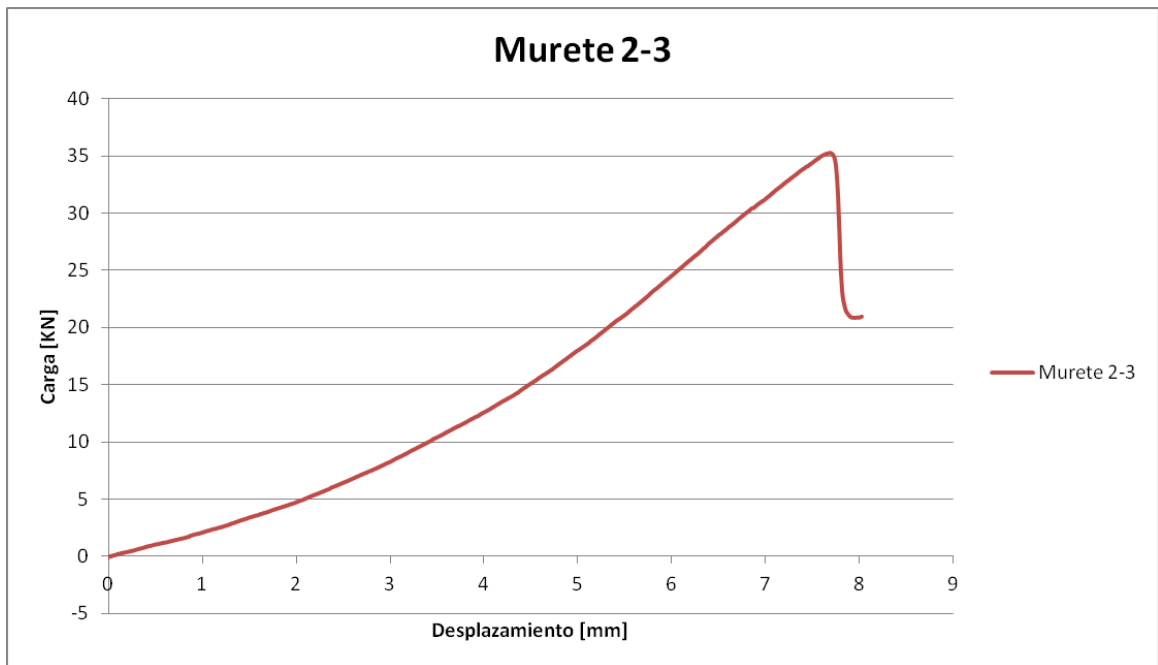


Figura 55. Curva Carga vs desplazamiento murete 2-3, MTS Test System 810
Fuente los Autores

En la figura 56 se observa una falla en los especímenes a lo largo de su diagonal causada por el efecto de la carga aplicada con cierta dispersión de las fisuras debido al refuerzo, además se destaca que esta falla se presentó de manera progresiva sin la presencia de fragmentación de los elementos.



Figura 56. Fallas muretes tipo 2
Fuente los Autores

4.3. RESULTADOS MURETE TIPO III

Para los resultados de los muretes tipo 3 los cuales presentaban refuerzo doble con las fibras orientadas a 90°, se obtuvo una resistencia a cortante aproximada de 49 [KN], además se observa cierta variación en los resultados entre especímenes lo cual se puede visualizar en las figuras 57, 58 y 59.

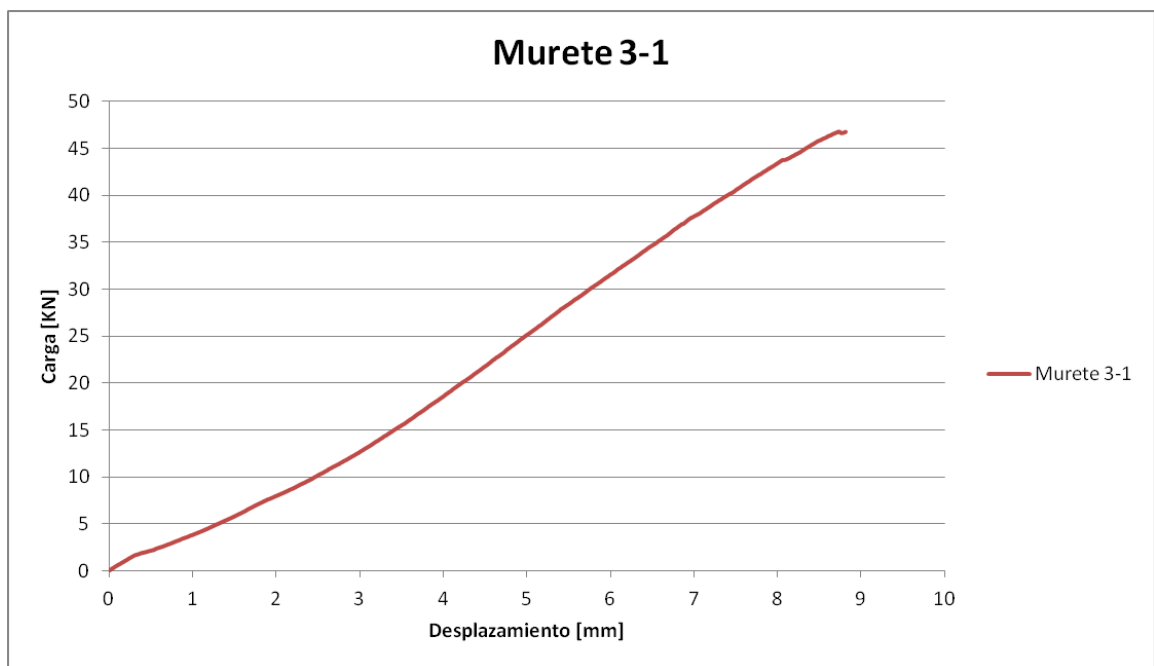


Figura 57. Curva Carga vs desplazamiento murete 3-1, MTS Test System 810

Fuente los Autores

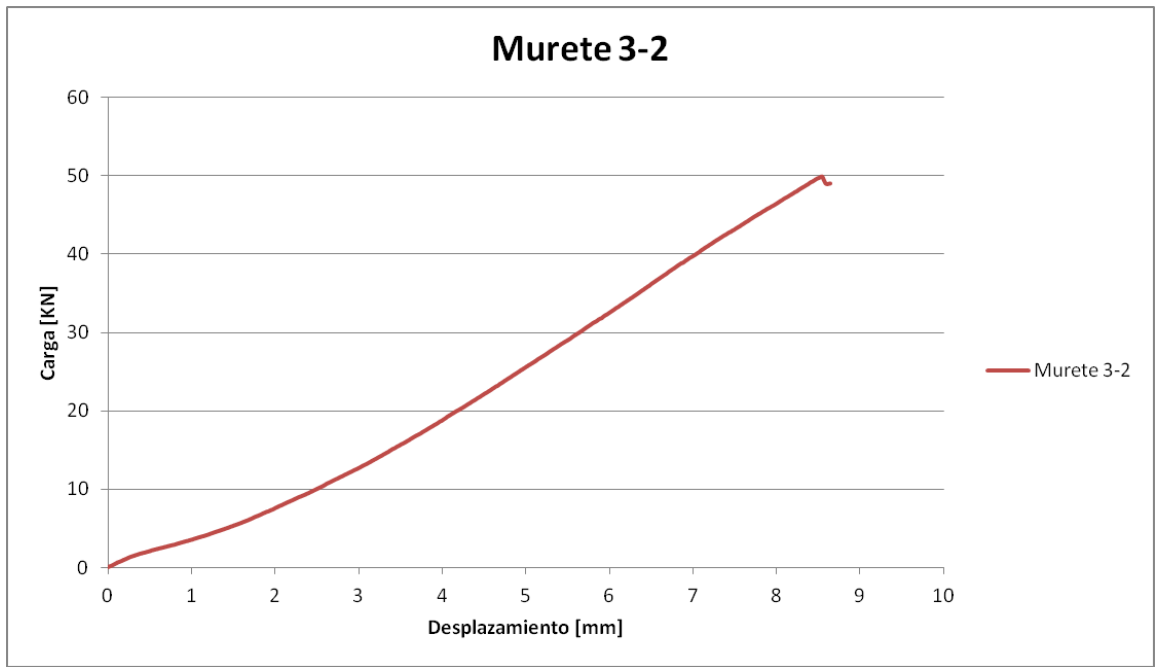


Figura 58. Curva Carga vs desplazamiento murete 3-2, MTS Test System 810

Fuente los Autores

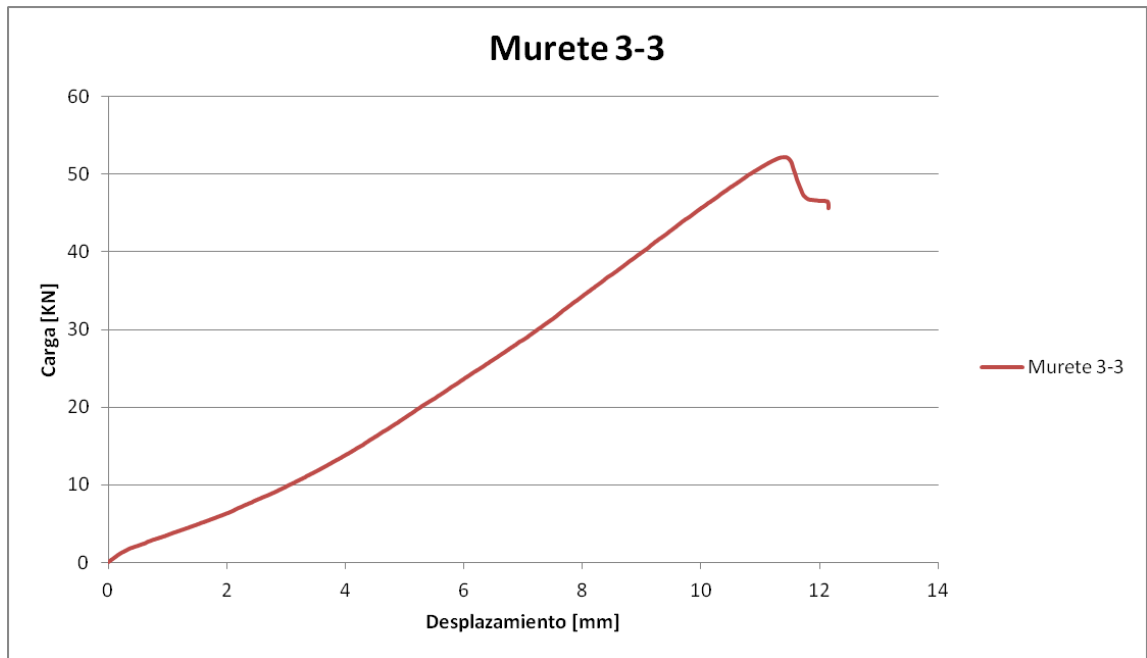


Figura 59. Curva Carga vs desplazamiento murete 3-3, MTS Test System 810

Fuente los Autores

En la figura 60 se presentan fallas de los muretes a lo largo de su diagonal, combinada con un aplastamiento en los puntos de aplicación de la carga; Esta falla al igual que para los especímenes tipo 2 se presentó de manera progresiva sin la presencia de fragmentación de los elementos.

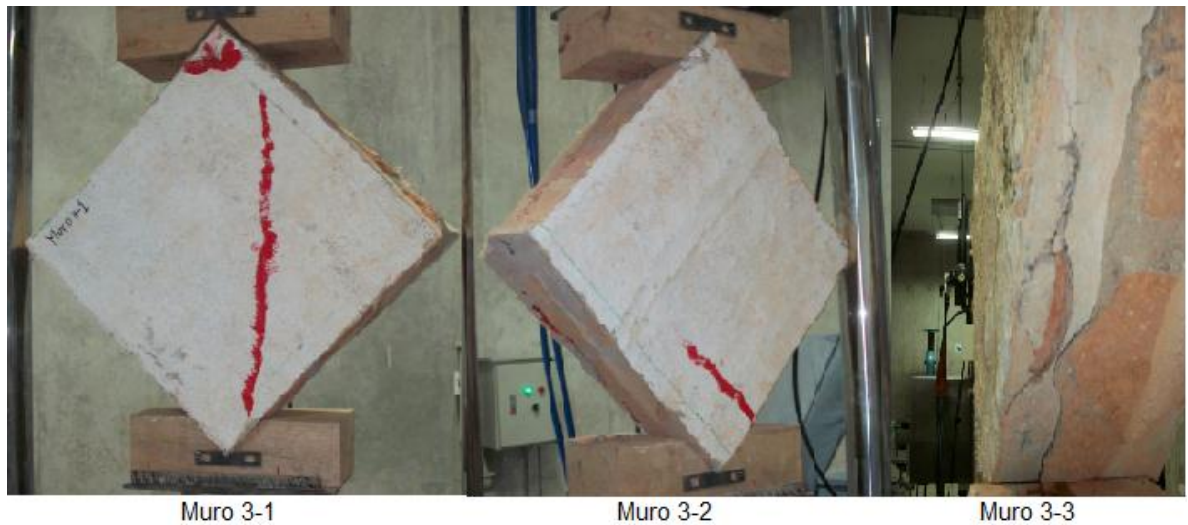


Figura 60. Fallas muretes tipo 3
Fuente los Autores

4.4. RESULTADOS MURETE TIPO IV

Para los resultados de los muretes tipo 4 los cuales presentaban refuerzo sencillo con las fibras orientadas a 45° , se obtuvieron resistencias con cierta variación y al igual que el murete 2-1 fue necesario descartar para análisis posteriores el murete 4-3 al no presentar una resistencia representativa. Los resultados de los especímenes se pueden visualizar en las figuras 61, 62 y 63.

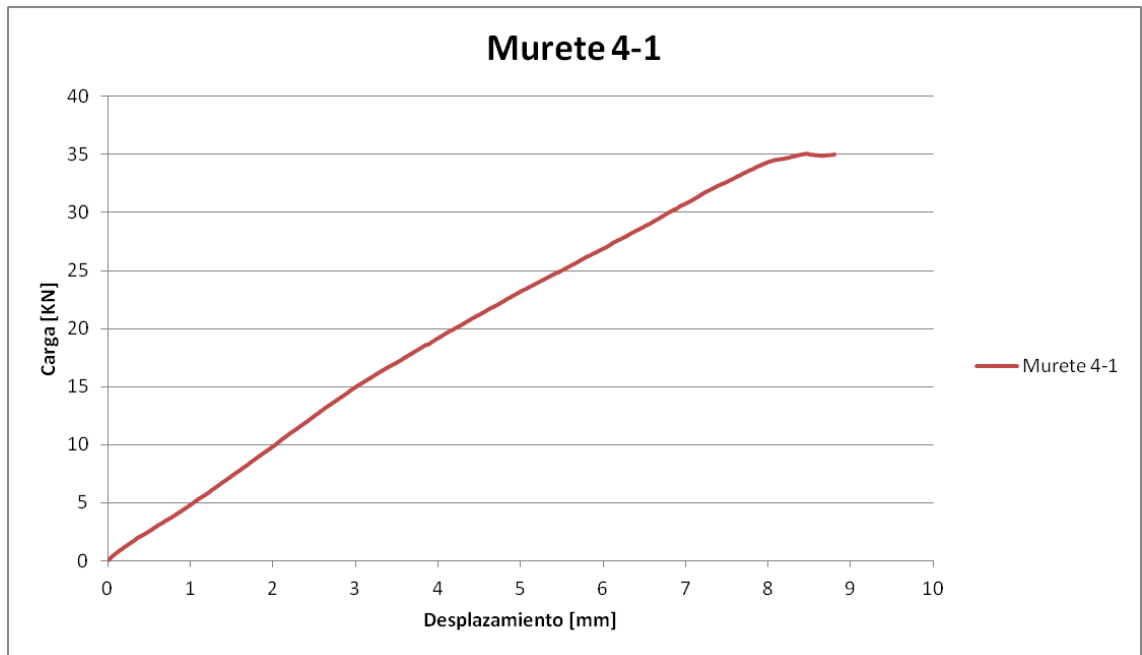


Figura 61. Curva Carga vs desplazamiento murete 4-1, MTS Test System 810
Fuente los Autores

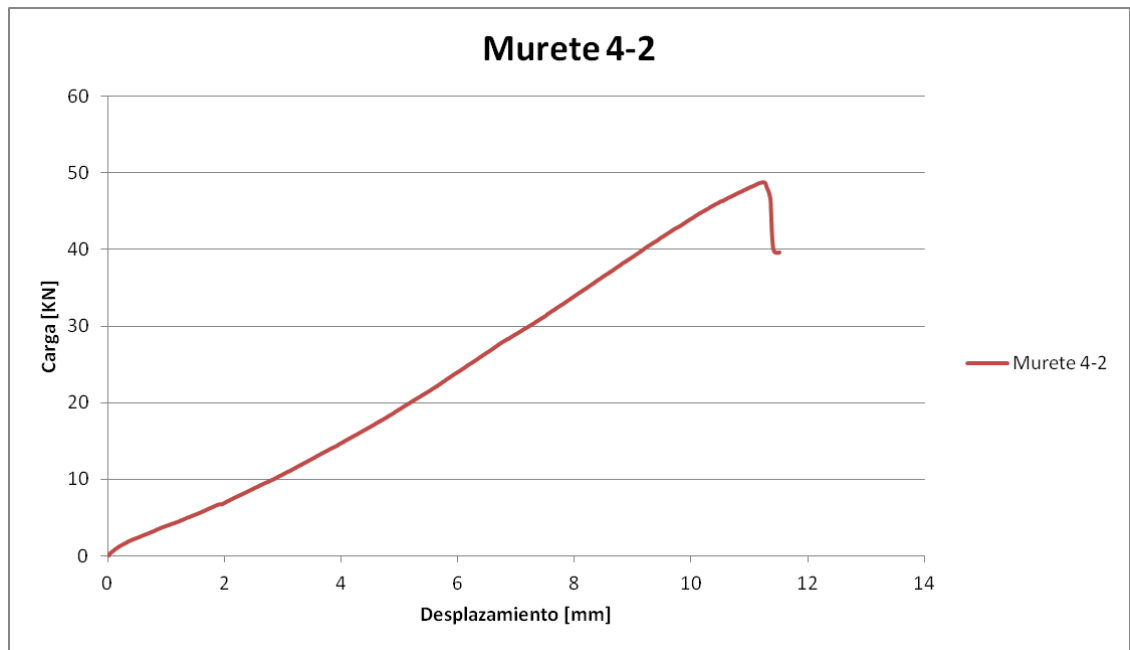


Figura 62. Curva Carga vs desplazamiento murete 4-2, MTS Test System 810
Fuente los Autores

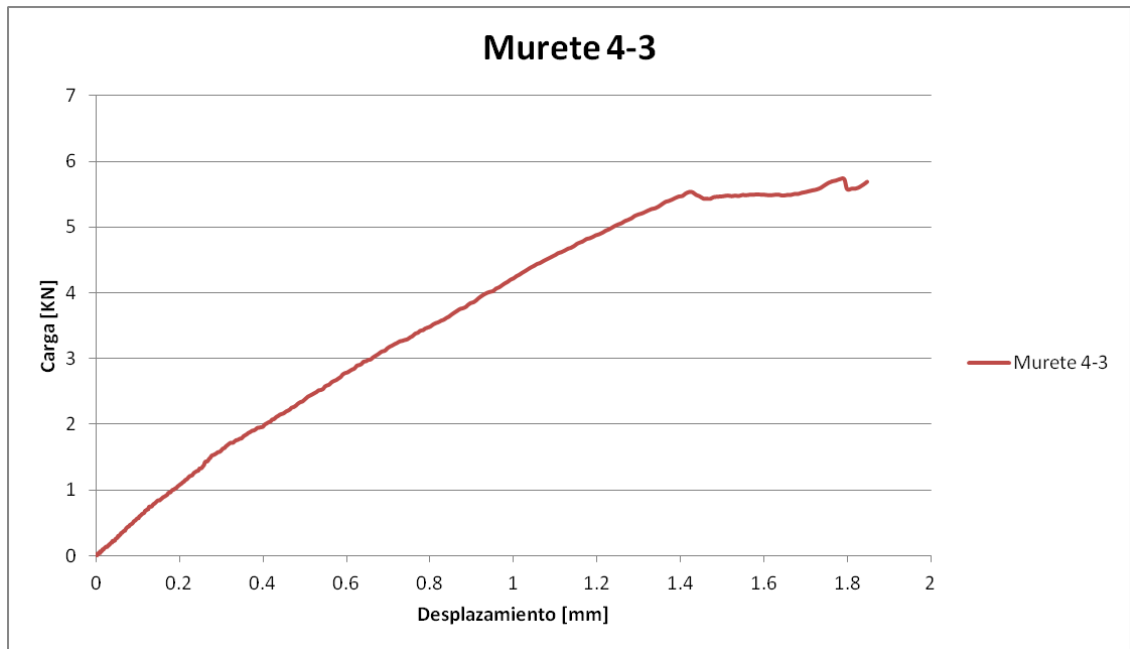


Figura 63. Curva Carga vs desplazamiento murete 4-3, MTS Test System 810
Fuente los Autores

En la figura 64 se presentaron fallas de los muretes a lo largo de su diagonal; Esta falla al igual que para los especímenes tipo 2 y tipo 3 se presentó de manera progresiva sin la presencia de fragmentación de los elementos.



Figura 64. Fallas muretes tipo 4
Fuente los Autores

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta todos los análisis y las comparaciones realizadas en este proyecto, con base en los diseños teóricos propuestos por la normatividad vigente y los resultados experimentales obtenidos de los ensayos a compresión diagonal. Se enfoca en resaltar las características que son de vital importancia para establecer el diseño óptimo de refuerzo con mallas de fibra de Furcraea andina “Fique”. Los cálculos y análisis detallados se encuentran en el ANEXO J del presente documento.

5.1. COMPARACIÓN FUERZA - DESPLAZAMIENTO PARA CADA TIPO DE MURETE

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos presentados en el capítulo 4 es importante para el análisis determinar la fuerza y desplazamiento (vertical) máximo a compresión que resistió cada tipo de murete además del promedio de los mismos, lo cual se expone a continuación:

En los muretes tipo uno (1) se obtuvo los siguientes valores máximos:

Fuerza Máxima:

Murete 1-1	43.8228 [KN]
Murete 1-2	41.1043 [KN]
Murete 1-3	46.7424 [KN]

Desplazamiento Máximo:

Murete 1-1	6.5195 [mm]
Murete 1-2	11.6650 [mm]
Murete 1-3	10.3073 [mm]

De lo que se obtiene una fuerza y un desplazamiento máximo promedio, así:

$$F_{Promedio\ muretes\ tipo\ 1} = 43.8898 [KN]$$

$$\delta_{Promedio\ muretes\ tipo\ 1} = 9.4973 [mm]$$

La representación del comportamiento en conjunto de los tres muretes tipo 1 ensayados se presenta en la figura 66.

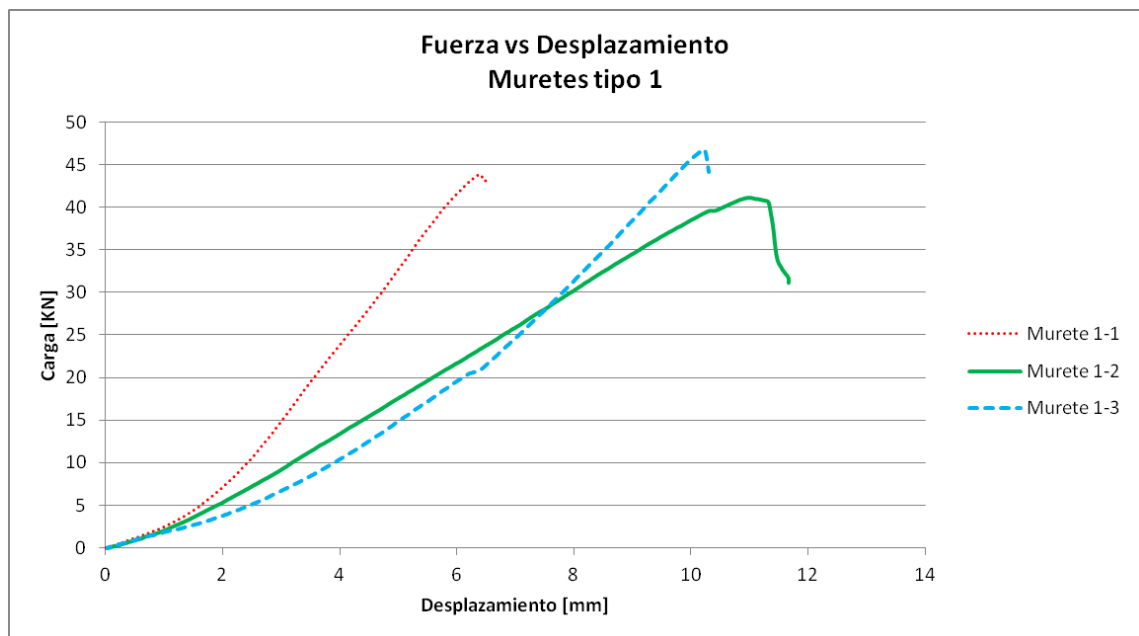


Figura 65. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 1

Fuente los Autores

En los muretes tipo dos (2) se obtuvo los siguientes valores máximos:

Fuerza Máxima:

Murete 2-2 52.6507 [KN]

Murete 2-3 35.2578 [KN]

Desplazamiento Máximo:

Murete 2-2 17.6180 [mm]

Murete 2-3 8.0282 [mm]

De lo que se obtiene una fuerza y un desplazamiento máximo promedio, así:

$$F_{Promedio \text{ muretes tipo 2}} = 43.9542 [KN]$$

$$\delta_{Promedio \text{ muretes tipo 2}} = 12.8231 [mm]$$

El comportamiento en conjunto de los dos muretes tipo 2 ensayados se presenta en la figura 67, en la que se destaca un aumento importante en la ductilidad por parte del espécimen 2-2 con respecto a los muretes de referencia.

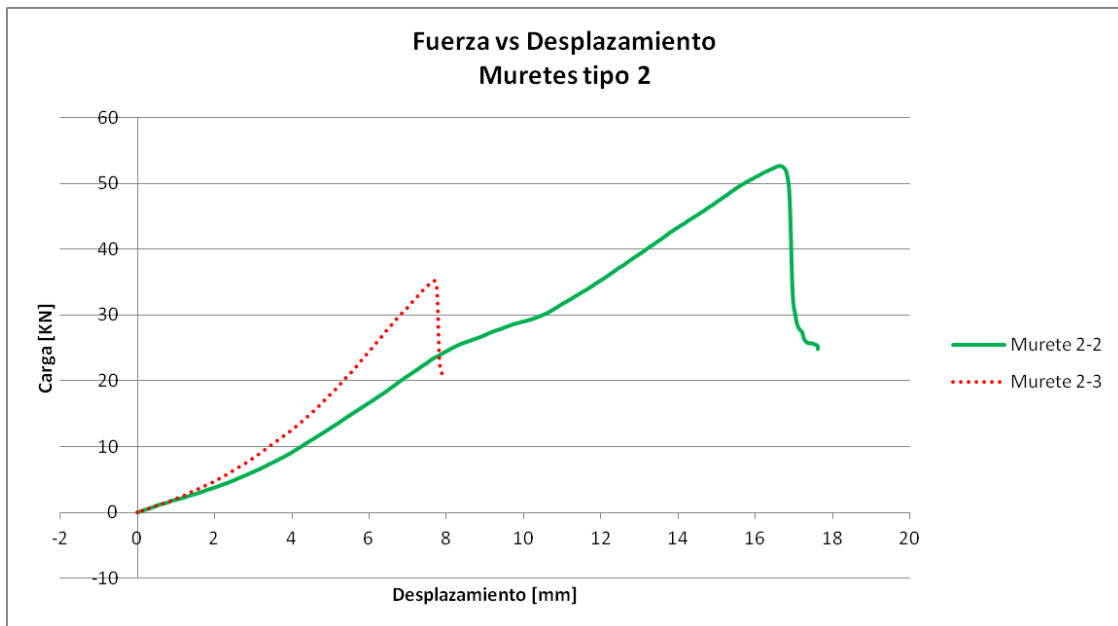


Figura 66. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 2

Fuente los Autores

En los muretes tipo tres (3) se obtuvo los siguientes valores máximos:

Fuerza Máxima:

Murete 3-1	46.7495 [KN]
Murete 3-2	49.8577 [KN]
Murete 3-3	52.1812 [KN]

Desplazamiento Máximo:

Murete 3-1	8.8189 [mm]
Murete 3-2	8.6421 [mm]
Murete 3-3	12.1576 [mm]

De lo que se obtiene una fuerza y un desplazamiento máximo promedio, así:

$$F_{Promedio\ muretes\ tipo\ 3} = 49.5961 [KN]$$

$$\delta_{Promedio\ muretes\ tipo\ 3} = 9.8729 [mm]$$

La representación del comportamiento en conjunto de los tres muretes tipo 3 ensayados se presenta en la figura 68.

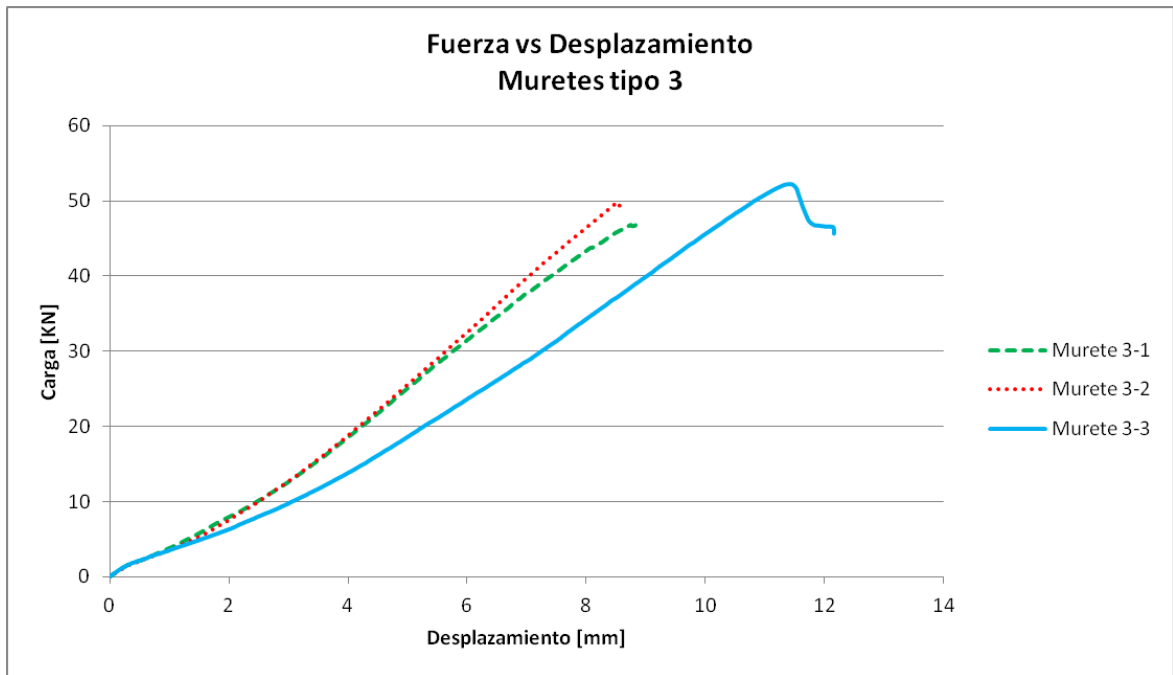


Figura 67. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 3
Fuente los Autores

En los muretes tipo cuatro (4) se obtuvo los siguientes valores máximos:

Fuerza Máxima:

Murete 4-1 35.0790 [kN]
Murete 4-2 48.7637 [kN]

Desplazamiento Máximo:

Murete 4-1 8.8001 [mm]
Murete 4-2 11.5153 [mm]

De lo que se obtiene una fuerza y un desplazamiento máximo promedio, así:

$$F_{Promedio \ muretes \ tipo \ 4} = 41.9214 [kN]$$

$$\delta_{Promedio \ muretes \ tipo \ 4} = 10.1577 [mm]$$

El comportamiento en conjunto de los dos muretes tipo 4 ensayados se presenta en la figura 69.

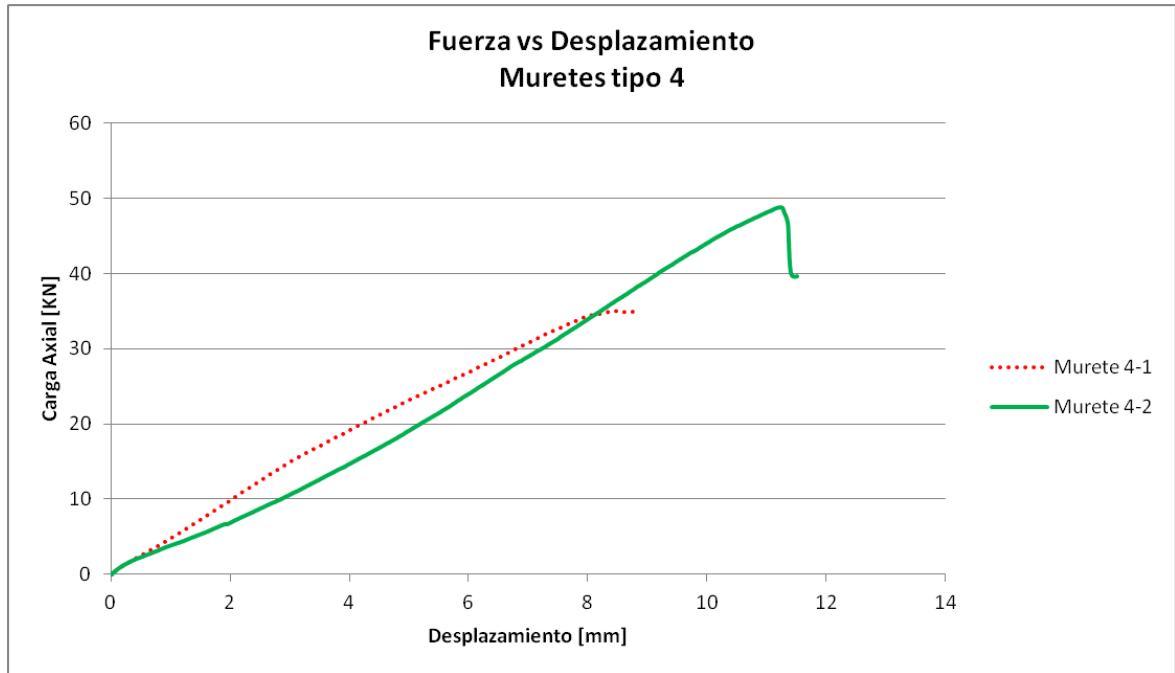


Figura 68. Fuerza vs. Desplazamiento para Muretes tipo 4

Fuente los Autores

5.2. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE FUERZAS Y ESFUERZOS MÁXIMOS ENTRE CADA TIPO DE MURETE

Por medio del análisis individual de los especímenes presentados en el numeral anterior, se pudo establecer comparaciones entre los distintos tipos de muretes con el fin de determinar la variación de algunas de las características mecánicas por la presencia de distintas configuraciones de refuerzo.

En la figura 70 se observa la variación de la carga máxima resistida impuesta sobre la diagonal en cada uno de los ejemplares, en donde se hace evidente que los muretes tipo 3, los cuales presentaban un refuerzo doble con las fibras orientadas a 90°, tienen un aumento considerable en la resistencia máxima, en comparación con los demás tipos de especímenes. Una fuerza máxima a compresión de 49.59 [KN] deja ver un aumento de aproximadamente 13% en comparación con la resistencia máxima del espécimen de referencia (Murete tipo I).

Las otras configuraciones de refuerzo (Muretes tipo II y IV) no mostraron un crecimiento considerable en su resistencia. Factores como cambios en la homogeneidad de los lotes de ladrillo, variaciones en la dosificación del mortero de pega, poca fiabilidad en el proceso de adhesión del refuerzo al muro y sobre esfuerzos presentados al momento de la extracción de los muretes, pudieron afectar el comportamiento de los ejemplares, y de esta forma incidir en su resistencia máxima.

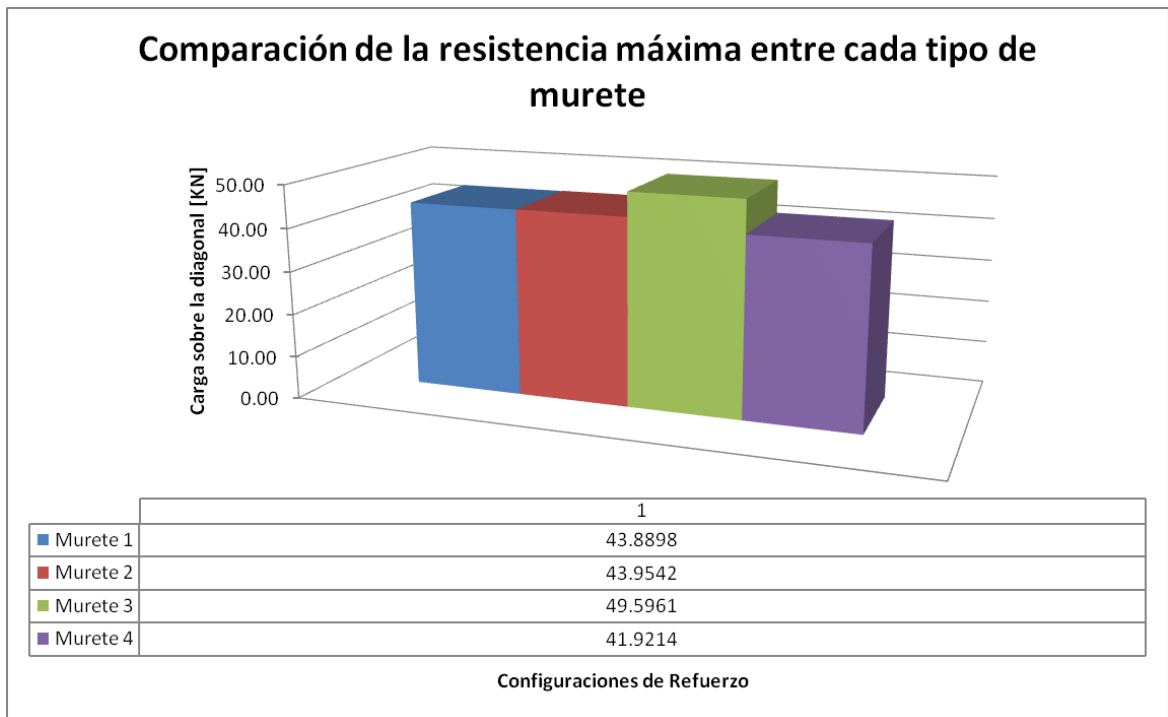


Figura 69. Comparación de la resistencia máxima entre cada tipo de murete

Fuente los Autores

Con el fin de realizar una comparación del esfuerzo cortante admisible entre los especímenes ensayados en este proyecto y el valor teórico calculado por los lineamientos presentados en la norma sismo resistente colombiana (numeral 3.2 del presente documento), se siguió el procedimiento de análisis descrito en la (ASTM-E519-02) para el cálculo del esfuerzo cortante máximo de los ejemplares de prueba presentado a continuación:

- El esfuerzo cortante se expresa como:

$$S_s = \frac{0.707 P}{An}$$

Donde:

P: Carga máxima aplicada

An: Área neta del espécimen, calculada como se muestra a continuación:

$$An = \left(\frac{W + h}{2} \right) tn$$

Siendo:

W: ancho del espécimen, mm.

h: Altura del espécimen, mm.

t: Espesor del espécimen, mm.

n: Porcentaje de área bruta de la unidad, expresado en decimales.

Las tablas 7 y 8 muestran las propiedades y los valores de esfuerzos cortantes máximos para cada uno de los ejemplares de prueba de este proyecto.

Propiedades de los especímenes	
W	500 mm
h	500 mm
t	160 mm
n	1
An	80000 mm ²

Tabla 7. Propiedades de los especímenes

Fuente los Autores

Esfuerzo Cortante S_s [Mpa]	Tipos de muretes			
	1	2	3	4
Prueba 1	0.387	-	0.413	0.310
Prueba 2	0.363	0.465	0.441	0.431
Prueba 3	0.413	0.312	0.461	-
Promedio	0.388	0.388	0.438	0.370

Tabla 8. Propiedades de los especímenes

Fuente los Autores

La figura 71 muestra la gran diferencia entre el esfuerzo cortante calculado teóricamente y los obtenidos de forma experimental. Todos los valores calculados por la (ASTM-E519-02) están en el rango establecido de esfuerzos cortantes admisibles propuesto por la (NSR-10, 2010), pero son muy superiores al esperado mediante el análisis teórico, lo que supone un factor de seguridad bastante elevado establecido por la normatividad, a causa de la incertidumbre producto de la falta de resultados experimentales en este campo.

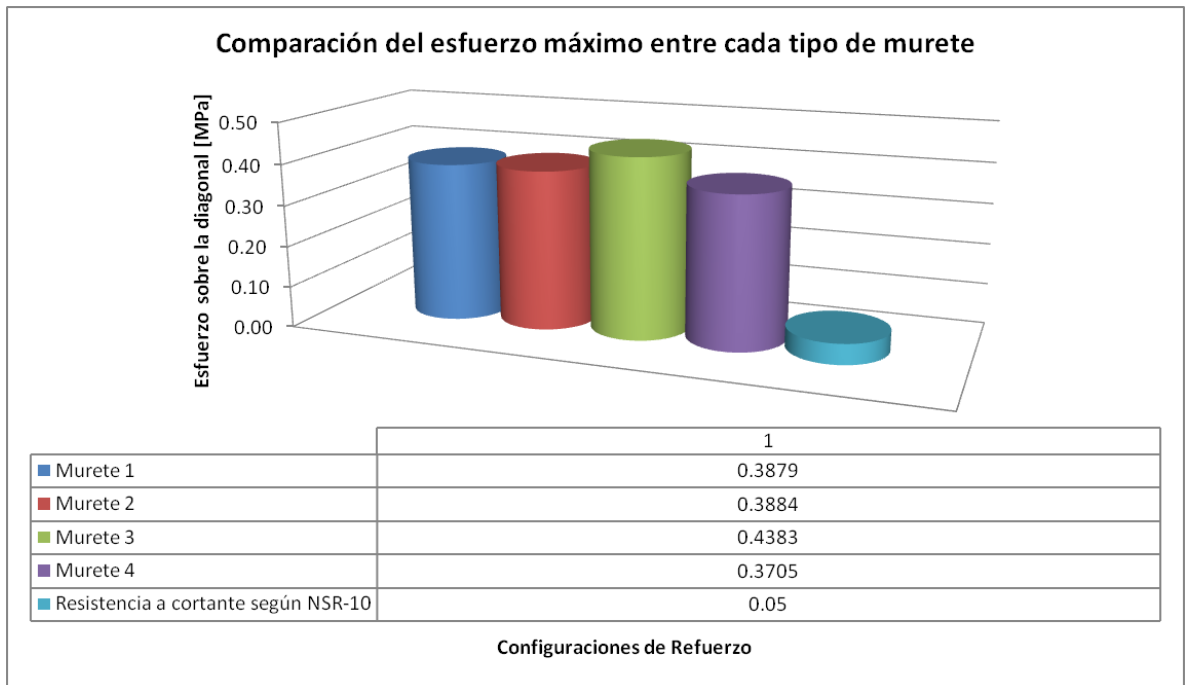


Figura 70. Comparación del esfuerzo máximo entre cada tipo de murete

Fuente los Autores

5.3. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN COSTO – BENEFICIO DEL REFUERZO

Una vez determinados los valores de esfuerzo máximo, calculados en el numeral 5.2, resistidos por los muretes objeto de estudio, se debe hacer un análisis para determinar las relaciones costo – beneficio de cada tipo de espécimen con el fin de determinar de una forma acertada la mejor configuración de refuerzo con fibra de fique para la mampostería.

5.3.1. Análisis cuantitativo

Desde el punto de vista cuantitativo se calculó el valor por metro cuadrado de cada tipo de refuerzo con el fin de contrastar estos resultados con los esfuerzos resistidos por los mismos. Los cálculos se efectuaron con base en los muros construidos previamente a los muretes, los cuales tenían dimensiones de 1.8 [m] x 1.8 [m], y las cantidades de cemento y sacos de fique tupido, número siete (7), tres (3) líneas de un solo uso utilizadas en la aplicación del refuerzo; cabe aclarar que no se contempló dentro de este análisis el costo de la mano de obra debido a que se reforzaron especímenes de idénticas dimensiones; además los valores presentados a continuación se encuentran en pesos colombianos y están sujetos a fluctuaciones del mercado.

MURO 2			
	Cantidad	Costo Unitario	Costo
Área [m2]	6.48	-	-
Bultos de Fique	6.00	\$ 2,500.00	\$ 15,000.00
Bultos de Cemento	1.00	\$ 22,000.00	\$ 22,000.00
	Total		\$ 37,000.00
	Valor/[m²]		\$ 5,709.88

Tabla 9. Cálculo costo/m² de refuerzo de fique sencillo a 90°

Fuente los Autores

MURO 3			
	Cantidad	Costo Unitario	Costo
Área [m2]	6.48	-	-
Bultos de Fique	12.00	\$ 2,500.00	\$ 30,000.00
Bultos de Cemento	1.50	\$ 22,000.00	\$ 33,000.00
	Total		\$ 63,000.00
	Valor/[m²]		\$ 9,722.22

Tabla 10. Cálculo costo/m² de refuerzo de fique doble a 90°

Fuente los Autores

MURO 4			
	Cantidad	Costo Unitario	Costo
Area [m2]	6.48	-	-
Bultos de Fique	8.00	\$ 2,500.00	\$ 20,000.00
Bultos de Cemento	1.00	\$ 22,000.00	\$ 22,000.00
		Total	\$ 42,000.00
		Valor/[m²]	\$ 6,481.48

Tabla 11. Cálculo costo/m² de refuerzo de fique sencillo a 45°

Fuente los Autores

Con el fin de comparar de una forma clara la relación costo – beneficio (resistencia) se generó la figura 72 en la que se aprecia que la configuración de refuerzo que aporta más a la resistencia es la de doble capa de fique con la disposición de las fibras a 90° con respecto a la horizontal, aunque tenga un costo superior por metro cuadrado (\$ 9,722.22), seguida a esta, se encuentra el refuerzo de capa sencilla de fique con disposición de las fibras a 90°, la cual no da un aporte significativo en la resistencia con respecto a el valor de referencia y presenta un costo por metro cuadrado de \$ 5,709.88, por último, se observa que la configuración de capa sencilla de fique con disposición de las fibras a 45° no aportó en absoluto a la resistencia y presenta un costo mayor (\$ 6,481.48) que la anterior configuración mencionada (Tipo 2), por lo que es la que presenta la relación costo – beneficio menos conveniente.

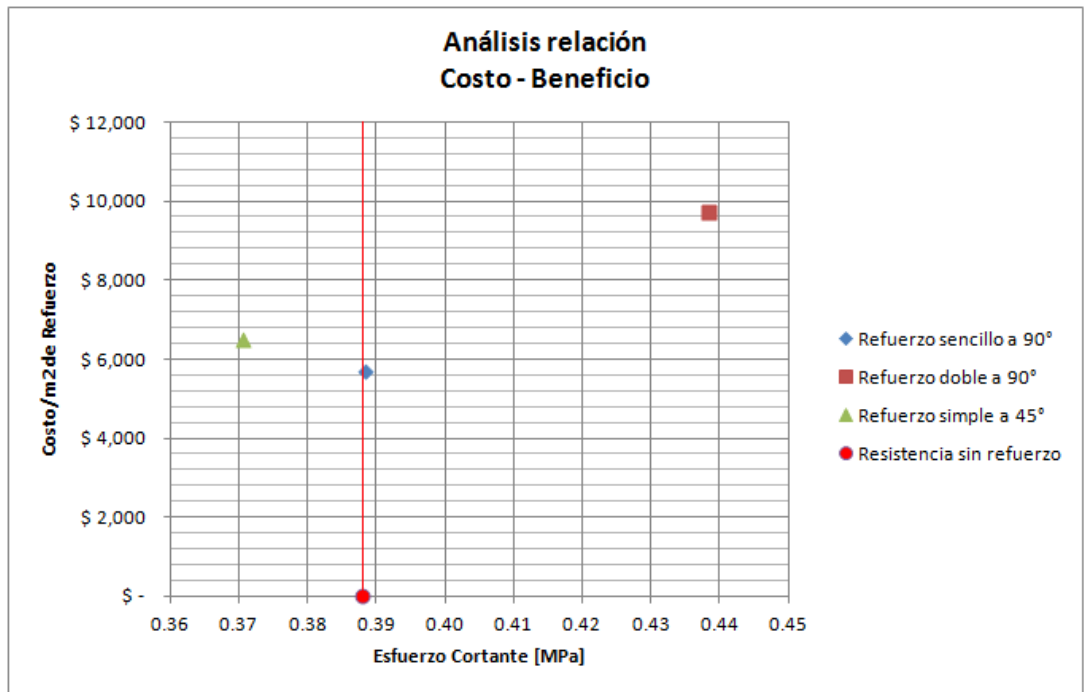


Figura 71. Relaciones Costo – Beneficio para las 3 configuraciones de refuerzo
Fuente los Autores

5.3.2. Análisis cualitativo

Desde el punto de vista cualitativo sobresalen tres beneficios al usar el refuerzo de fibra de fique en la mampostería, el primero de ellos estéticamente hablando es el acabado rustico que se obtiene, el cual presenta semejanza con el elaborado con friso como se puede apreciar en la figura 73; como segundo beneficio se encuentra el aumento en la seguridad para los ocupantes de las estructuras, debido a que el refuerzo de fique mantiene unidos los bloques aun después de la falla ante la presencia de un sismo superior a la resistencia de los elementos, evitándose así la caída de fragmentos lo que podría causar serias lesiones o incluso la muerte, por último es importante destacar que los materiales necesarios para la elaboración de este tipo de refuerzo son de fácil acceso al tratarse de cemento, agua y sacos de fique.



Muro Frisado - Rustico

Muro Reforzado con Fique

Figura 72. Comparación entre un muro frisado de forma rustica y uno reforzado con fique
Fuente los Autores

CONCLUSIONES

- El diseño óptimo de refuerzo para muros de mampostería no confinada utilizando mallas de fibra de Furcraea andina “fique” es la configuración de doble malla con las fibras orientadas a 90° con respecto a la horizontal, la cual presentó un aumento significativo en la resistencia de los especímenes de aproximadamente un 13% relativo a la referencia.
- Desde el punto de vista cualitativo, las mallas de fibra de Furcraea andina “fique”, utilizadas en el reforzamiento de muros de mampostería, son una opción asequible para el público en general, además de ofrecer beneficios estéticos y de seguridad para la vida.
- La Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (D-1.5-12) es conservadora al prohibir el uso de estructuras de mampostería no confinada en zonas de alta actividad sísmica dada la gran diferencia entre la resistencia teórica y la calculada experimentalmente para muros de este tipo.
- Teniendo en cuenta que no se habían realizado caracterizaciones previas en la literatura consultada, las mallas presentes en los sacos de fique tupido número 7, tres líneas de un solo uso empleados en el almacenamiento de café, presentan un módulo de elasticidad aproximado de 148.6 [MPa] y un esfuerzo de fluencia promedio de 8.76 [MPa].
- La magnitud de la carga vertical es un factor relevante en el tipo de falla que se presenta en un muro de mampostería sometido a cargas horizontales durante la realización de un ensayo pseudo estático.

- La distribución de esfuerzos obtenida a través de la creación de un modelo numérico basado en elementos finitos para un muro de mampostería ante la acción de cargas de servicio y sismo, se caracteriza por la presencia de esfuerzos cortantes sobre la diagonal del elemento y efectos de tracción y compresión en sus extremos inferiores a causa de la tendencia al volcamiento, como se presenta en la literatura.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- El ensayo pseudo estático previsto inicialmente para el desarrollo de este proyecto fue modificado debido a que el tipo de falla de los especímenes probados no fue representativo para la correcta caracterización del aporte a la resistencia del refuerzo de la malla de fibra de *Furcraea andina* “fique”; por lo que se determinó realizar pruebas de compresión diagonal sobre muretes extraídos de los muros construidos originalmente.
- Para la realización de estudios posteriores sobre mampostería en los que se construyan especímenes de tamaño real para ser evaluados con un ensayo pseudo estático, se recomienda que la metodología de aplicación de la carga vertical, dentro de lo posible, se efectúe mediante la aplicación de un sistema en donde se asegure el libre desplazamiento de la masa junto con el muro, con el fin de no alterar las distorsiones durante la ejecución de las pruebas manteniendo los parámetros mínimos de seguridad.
- La variación en los resultados de las pruebas de compresión diagonal efectuadas a los muretes se debe a factores como cambios en la homogeneidad de los lotes de ladrillo, variaciones en la dosificación del mortero de pega, poca fiabilidad en el proceso de adhesión del refuerzo al muro y sobre esfuerzos presentados al momento de la extracción de los muretes.
- El número de configuraciones de refuerzo propuestas durante la planeación de este proyecto (5), no fue alcanzado debido a circunstancias generadas durante el desarrollo de los ensayos, las cuales se exponen con mayor detalle en el ANEXO D (Archivo: Ensayo pseudo estático.pdf) del presente documento.

BIBLIOGRAFÍA

ARDILA CUBILLOS, R. A., & MÉNDEZ RINCÓN, A. (2003). *Caracterización Dinámica de las edificaciones de la comuna 14. "Morrórico"*. Bucaramanga: Tesis de Grado.

ARIES. (s.f.). Recuperado el 2010, de <http://www.aries.com.es/es/sistemas-de-ensayo/productos-y-servicios/ensayos-de-estructuras-civiles/id/468>

ASTM-E519-02. *Standard Test Method for diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*.

BAUTISTA URRUTIA, P. A. (2008). *VALIDACION DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD SISMICA SIMULADAS PARA MAMPOSTERIA*. Bucaramanga: Trabajo de Grado.

CHIQUILLO SALAMANCA, J. A., & PATIÑO OICATÁ, F. Y. (2011). *CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA ÚLTIMA DE MUROS DE MAMPOSTERÍA*. Bucaramanga: Trabajo de Grado.

D-5034. (2009). *Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test)*. ASTM.

DESARROLLO-SOCIAL. *Inventario de comunas de Bucaramanga*. Bucaramanga.

DIAZ REY, G., & PARRA SEQUEDA, D. M. (2007). *Experiencia pedagógica formativa de prevención con niños, niñas y adolescentes en riesgo de calle en la comuna 14, Municipio de Bucaramanga*. Bucaramanga.

DUARTE BALLEEN, L. A., & JEREZ BARAJAS, J. L. (2007). *Simulación hidrodinámica de monolito tipo espuma mediante la técnica de los elementos finitos*. Bucaramanga.

FLÓREZ AGUILAR, C. A., & LÓPEZ HERNÁNDEZ, O. A. (2010). *Propuesta de reforzamiento de muros de adobe modificado con confinamiento de madera rolliza*. Bucaramanga: Trabajo de Grado.

JARAMILLO, J., MORALES, M., & HINCAPIÉ, G. (2008). *Respuesta Sísmica de muros de mampostería no reforzada sometidos a aceleraciones perpendiculares a su plano*. Medellín: Universidad EAFIT.

LEWIS, R. W., NITHIARASU, P., & SEETHARAMU, K. N. (2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. Jhon Wiley & Sons Ltda.

LÓPEZ, J., OLLER, S., & OÑATE, E. (1998). *Cálculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos*.

MARTÍNEZ, J. L. (2003). *Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fabrica y aplicación al análisis de construcciones históricas*. Madrid: Tesis Doctoral, UPM.

MIDAS GEN, C. (2010). *simulsoft*. Obtenido de MIDAS GEN catalogo_es_2010_simulsoft-ingenieros.es

MONDRAGÓN AGUILAR, J. (2002). *Monografía escrita*. México D.C.

MOSALLAM, A., & SWAGATA, B. (2011). *Enhancement in in-plane shear capacity of unreinforced masonry (URM) walls*. Irvine, California: University of California.

NSR-10. (2010). *NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA*.

NTC-220. (2004). *DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO USCANDO CUBOS DE 50 mm ó 50.8 mm DE LADO*. BOGOTA D.C.: ICONTEC.

NTC-4017. (2005). *MÉTODOS PARA MUESTREO Y ENSAYOS DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA Y OTROS PRODUCTOS DE ARCILLA*. ICONTEC.

NTCM. (2004). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMÓSTERÍA*.

REAL-ACAMEDIA-ESPAÑOLA. (s.f.). *RAE*. Obtenido de www.rae.es

RIDGE, N. (2007). *DESING MANUAL FOR THE TYFO FIBRWRAP SYSTEMS*. San Diego, California.

San Bartolomé, Á., Muñoz, A., & Madalengoitia, F. *COMPORTAMIENTO A FUERZA CORTANTE DE MURETES DE CONCRETO*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

VARGAS, P., & SOLANDO, R. (1999). *Utilización de la fibra de fique como agregado en la fabricación de productos aglomerados*. Bucaramanga: Trabajo de Grado.

ZIENKIEWICS, O. C., & TAYLOR, R. L. (2000). *The finite Element Method*. Butterworth – Heinemann.

ANEXOS

Los anexos aquí presentes se encuentran en el CD adjunto a este documento:

ANEXO A. Fotos construcción de especímenes de mortero de pega, resultados de las pruebas; Fuente: Máquina de ensayos universales MTS Test System 810, Los Autores; Lugar: Laboratorio de Estructuras, Edificio Álvaro Beltrán, Universidad Industrial de Santander.

ANEXO B. Fotos y Videos pruebas de compresión de ladrillos, Fuente. Los Autores Lugar: Laboratorio de Estructuras, Edificio Álvaro Beltrán, Universidad Industrial de Santander.

ANEXO C. Videos pruebas de tracción de malla de fique, resultados de las pruebas; Fuente: Máquina de ensayos universales, Los Autores; Lugar: Laboratorio de Biomateriales, Escuela de metalúrgica, Universidad Industrial de Santander.

ANEXO D. Fotos y videos pruebas pseudo estáticas, resultados de las pruebas, descripción y análisis del experimento, protocolo de desplazamientos; Fuente: Máquina de ensayos universales, Los Autores; Lugar: Laboratorio de Estructuras, Edificio Álvaro Beltrán, Universidad Industrial de Santander.

ANEXO E. Modelos, planos y cálculos de análisis de fuerza horizontal equivalente; Fuente: Los Autores.

ANEXO F. Cálculo de la resistencia según la NSR-10; Fuente: Los Autores.

ANEXO G: Foto, video y modelo de MIDAS GEN para muro en tamaño real; Fuente: Los Autores.

ANEXO H: Foto, video y modelo de MIDAS GEN para murete; Fuente: Los Autores.

ANEXO I: Resultados experimentales ensayos a compresión diagonal; Fuente: Máquina de ensayos universales MTS Test system 810, Los autores. Lugar: Laboratorio de Estructuras, Edificio Álvaro Beltrán, Universidad Industrial de Santander.

ANEXO J: Análisis de los resultados ensayos a compresión diagonal; Fuente: Los autores.