



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS EN BAHAREQUE DE TIERRA  
ANTE CARGAS HORIZONTALES

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTADO POR

KAROL JULIETH CRISTANCHO BARRIOS

DIRECTOR

Dr. IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS  
NOVIEMBRE DE 2024

## **Agradecimientos**

¡A Dios, porque me ha enseñado que de la mano de él los propósitos se cumplen! A mi esposo por su apoyo incondicional durante toda esta etapa, por incentivar me a culminar este proyecto, a superarme cada día más y a creer en mí.

A mi familia que ha estado acompañando en todo el proceso sus palabras de aliento y comprensión; a mi director de tesis Iván Otalvaro por su invaluable guía y paciencia durante todo el desarrollo de la investigación, su conocimiento y dirección constante fue fundamental para dar forma y avance a este trabajo.

Por su apoyo en la elaboración de los ensayos y guía para la ejecución de los muros, al Ing. Daniel Ruiz, a la Ing. Nathalia Barrera y al señor Jaime Cruz por la construcción de estos ensayos que se desarrollaron en el laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá

## RESUMEN

Este estudio investiga el comportamiento estructural de los muros de tierra de bahareque, un sistema de construcción tradicional de Colombia, específicamente del suroccidente colombiano, departamento del Valle del Cauca, municipio de Jamundí, comunidad La Estrella. Los muros de bahareque, compuestos por guadua o marcos de madera rellenos con mezclas de tierra, han demostrado una considerable resiliencia en zonas sísmicas debido a su naturaleza liviana y flexible.

A pesar de su uso generalizado en estas comunidades, existen datos científicos limitados sobre su desempeño sísmico bajo cargas horizontales cíclicas en el plano. Esta investigación busca abordar esta brecha mediante la evaluación experimental del comportamiento sísmico de cinco modelos de muros, utilizando diferentes combinaciones de materiales de relleno de guadua, madera y tierra. La metodología siguió cuatro fases principales: visitas de campo para documentar las técnicas de construcción tradicionales, caracterización del material, pruebas de prototipos bajo cargas cíclicas y análisis del comportamiento mecánico. Se determinaron las propiedades clave del material, incluida la resistencia a la compresión y el módulo de Young, junto con las propiedades mecánicas y físicas del material de relleno, que incorporaba fibras naturales.

Se realizaron pruebas cíclicas en cinco prototipos de muros, con diversas configuraciones de entramados de guadua y madera, tanto con como sin relleno de tierra. Los muros fueron sometidos a cargas horizontales en el plano para evaluar su capacidad de deformación, disipación de energía y mecanismos de falla. Los resultados indicaron que los muros con relleno de mezcla de tierra, específicamente las configuraciones GSHS (marco de guadua con franjas horizontales de guadua y relleno de mezcla de tierra) y TSHS (marco de madera con franjas horizontales de guadua y relleno de mezcla de tierra), demostraron el mejor desempeño sísmico, con una deriva del 4 % y 7.9 %, resistencias que oscilaron entre 6,4 y 6.7 kN. El estudio concluye que los muros de bahareque, particularmente aquellos que incorporan mezclas de tierra, exhiben alta resiliencia bajo condiciones sísmicas y brindan una construcción sustentable.

## ABSTRACT

This study investigates the structural behavior of bahareque earth walls, a traditional construction system in Colombia, specifically in the southwestern region of Colombia, in the department of Valle del Cauca, municipality of Jamundí, community of La Estrella. Bahareque walls, consisting of guadua or wooden frames filled with mixed soil, have demonstrated considerable resilience in seismic zones due to their lightweight and flexible nature. Despite their widespread use in these communities, limited scientific data exists regarding their seismic performance under in-plane cyclic horizontal loading. This research seeks to address this gap by experimentally evaluating the seismic behavior of five wall models, utilizing different combinations of guadua, wood, and earth fill materials. The methodology followed four main phases: field visits to document traditional construction techniques, material characterization, prototype testing under cyclic loads, and analysis of mechanical behavior. Key material properties, including compressive strength and Young's modulus, were determined, alongside the mechanical and physical properties of the infill material, which incorporated natural fibers.

Cyclic tests were conducted on five wall prototypes, featuring various configurations of guadua and wood frameworks, both with and without soil infill. The walls were subjected to horizontal in-plane loads to assess their deformation capacity, energy dissipation, and failure mechanisms. The results indicated that walls with soil mixture infill—specifically the GSHS (guadua frame with horizontal guadua strips and soil mixture infill) and TSHS (wood frame with horizontal guadua strips and soil mixture infill) configurations—demonstrated the best seismic performance, with a drift of 4 % and 7.9 % and strengths ranging from 6.4 to 6.7 kN. The study concludes that bahareque walls, particularly those incorporating soil mixes, exhibit high resilience under seismic conditions and provide a sustainable construction alternative for rural regions.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Descripción del problema .....	2
1.2	Objetivos del proyecto .....	5
1.3	Organización del documento escrito.....	5
2	REVISION BIBLIOGRAFICA .....	7
2.1	Generalidades del bahareque .....	7
2.1.1	Tipos de bahareque .....	8
2.1.2	Materiales para la elaboración del bahareque.....	11
2.1.3	Proceso constructivo del bahareque.....	11
2.2	Comportamiento del bahareque y sistemas similares ante cargas horizontales.....	12
2.2.1	Pórticos de guadua y bahareque con recubrimiento .....	13
2.2.2	Pórticos de madera y bahareque tradicionales chinos.....	15
2.2.3	Respuesta de diferentes rellenos en muros tradicionales chinos .....	16
2.2.4	Bahareque encementado de la zona del eje cafetero colombiano.....	20
2.2.5	Respuesta de muros de bahareque de tierra .....	22
2.2.6	Muros tradicionales en Rumanía .....	24
3	MATERIALES Y METODOS .....	28
3.1	Materiales.....	28
3.1.1	Suelo empleado en el relleno .....	28
3.1.2	Fibras naturales usadas .....	37
3.1.3	Madera y guadua.....	39
4	Campaña experimental.....	42

4.1	Tipología de muros .....	42
4.2	Conexiones.....	49
4.3	Protocolo de carga.....	51
4.4	Ubicación de sensores.....	53
5	RESULTADOS Y ANALISIS .....	58
5.1	Muro GS.....	59
5.2	Muro TSH.....	63
5.3	Muro GSH.....	67
5.4	MURO GSHS .....	70
5.5	Muro TSHS.....	74
5.6	Efectos de la configuración y relleno de tierra en los prototipos.....	79
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	87
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de los prototipos modificado Herrera (2008).....	13
Tabla 2 Resumen de los módulos modificado Huang et al. (2018).....	15
Tabla 3 Resumen de los modelos modificado Liang et al. (2022) .....	19
Tabla 4 Resumen de los resultados modificado de Meng et al. (2018).....	20
Tabla 5 Resultados de módulos modificado Silva & López (2000)......	21
Tabla 6 Resumen de los resultados modificado Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).....	24
Tabla 7 Resumen de los módulos modificado Dutu et al.(2018).....	24
Tabla 8 Resumen delos módulos modificado Dutu et al. (2020).....	27
Tabla 9 Propiedades índices del suelo empleado en el relleno de tierra.....	28
Tabla 10 Variación de humedad y fibras .....	32
Tabla 11 Variación de porcentajes de humedad y fibras .....	35
Tabla 12 Abreviaturas de los prototipos .....	45
Tabla 13 Desplazamientos vs deriva para el protocolo de carga.....	51

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los procesos de construcción con tierra .....	8
Figura 2 Tipologías del bahareque modificado de Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002) .....	9
Figura 3 Bahareque relleno de tierra tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002) .....	9
Figura 4 Bahareque de tierra hueco tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002) .....	10
Figura 5 Bahareque en tabla .....	10
Figura 6 Bahareque metálico tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002) .....	10
Figura 7 Bahareque encementado tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002) .....	11
Figura 8 Construcción de un prototipo de muro en bahareque, por un residente de la zona.	12
Figura 9 Módulos de guadua fuente Herrera (2008) .....	13
Figura 10 Diagrama fuerza desplazamiento del panel sin recubrimiento fuente Herrera (2008) .....	14
Figura 11 Diagrama fuerza desplazamiento del panel encementado fuente Herrera (2008).	14
Figura 12 Diagrama fuerza desplazamiento del panel con tiras de guadua fuente Herrera (2008) .....	14
Figura 13 Prototipos ensayados fuente Huang et al, (2018) .....	16
Figura 14 Envolvente y Ciclos de histéresis fuente Huang et al., (2018) .....	16
Figura 15 Pórticos y ciclos de histéresis fuente Liang et al. (2022) .....	18
Figura 16 Estructura típica fuente Meng et al.(2018) .....	19
Figura 17 Curva de histéresis nivel 1 y envolvente de los prototipos de Meng et al. (2018)	20
Figura 18 Módulos fabricados fuente Silva & López (2000) .....	21

Figura 19 Carga vs deformación del panel Modulo 1A en guadua fuente Silva & López (2000)	21
.....	
Figura 20 Módulos fabricados fuente Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).	23
.....	
Figura 21 Ciclos de histéresis bahareque embutido fuente Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).	23
.....	
Figura 22 Módulos fuente Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).	23
.....	
Figura 23 Espécimen realizados fuente Duțu et al. (2018)	25
.....	
Figura 24 Ciclos de histéresis de los módulos fuente Duțu et al. (2018)	25
.....	
Figura 25 Especímenes realizados fuente Dutu et al. (2020)	26
.....	
Figura 26 Ciclo de histéresis de espécimen 3, fuente Duțu et al. (2018)	27
.....	
Figura 27 Distribución granulométrica	29
.....	
Figura 28 Masa unitaria seca máxima vs humedad	30
.....	
Figura 29 Esquema grafico del ensayo de resistencia a la compresión inconfiada	31
.....	
Figura 30 Esfuerzo a compresión normalizado de las muestras con longitud 2.5 cm	32
.....	
Figura 31 Esfuerzo a compresión normalizada de las muestras con longitud 5 cm	33
.....	
Figura 32 Esquema del ensayo a compresión diametral	34
.....	
Figura 33 Esfuerzo a tracción normalizada de las muestras con longitud 2.5 cm	34
.....	
Figura 34 Esfuerzo a tracción normalizada de las muestras con longitud 5 cm	35
.....	
Figura 35 Esquema del ensayo de pérdida de masa por inmersión	36
.....	
Figura 36 Valores de pérdida de masa por inmersión de acuerdo con las longitudes de las fibras con humedad del 50 %	36
.....	
Figura 37 Planta obtenida de la zona, <i>Andropogon glomeratus</i>	37
.....	
Figura 38 Cantidad de fibras utilizadas para los muros muestra 1	38
.....	
Figura 39 Cantidad de fibras utilizadas para los muros muestra 2	38

Figura 40 Humedad de la guadua .....	39
Figura 41 Guadua con y sin biodeterioro.....	39
Figura 42 Esquema de guadua.....	40
Figura 43 Resistencia a la compresión uniaxial.....	40
Figura 44 Modulo de elasticidad paralela a la fibra de la guadua .....	41
Figura 45 Humedad de la madera .....	41
Figura 46 Vivienda típica con madera aserrada y latas de guadua.....	43
Figura 47 Casa construida de guadua y esterilla de guadua. ....	43
Figura 48 Vivienda en bareque relleno y latas .....	44
Figura 49 Vivienda en bahareque relleno con madera y latas .....	44
Figura 50 Prototipo GS, muro con pies de guadua sin latas ni relleno.....	46
Figura 51 Prototipo TSH, muro con pies en madera aserrada con latas, sin relleno .....	46
Figura 52 Prototipo GSH, muro con pies en guadua con latas, sin relleno .....	47
Figura 53 Prototipo GSHS con pies en guadua latas y relleno.....	47
Figura 54 Prototipo TSHS con pies en madera aserrada, latas de guadua y relleno.....	48
Figura 55 Detalle del proceso constructivo de las conexiones de las puntillas .....	49
Figura 56 Detalle constructivo de la conexión de puntillas en madera .....	50
Figura 57 Protocolo de carga.....	52
Figura 58 Ubicación de los sensores.....	53
Figura 59 Ubicación de los LVDT ' S y actuador en los muros .....	54
Figura 60 Perfil de desplazamientos laterales muro GS .....	55
Figura 61 Perfil de desplazamiento lateral del prototipo TSH .....	55
Figura 62 Perfil de desplazamiento lateral del prototipo GSH.....	56
Figura 63 Perfil de desplazamiento lateral del muro GSHS .....	56

Figura 64 Perfil de desplazamiento del modelo TSHS.....	57
Figura 65 Montaje GS, esqueleto con pies de guadua sin latas ni relleno.....	59
Figura 66 Ciclos de histéresis del muro GS.....	60
Figura 67 Envolvente de los ciclos de histéresis muro GS.....	61
Figura 68 Desplazamiento horizontal antes y después del ensayo .....	61
Figura 69 Fallas del prototipo GS.....	62
Figura 70 Montaje prototipo TSH, esqueleto con pies de en madera con latas sin relleno. ..	63
Figura 71 Ciclo de histéresis muro TSH.....	64
Figura 72 Envolvente de los ciclos de histéresis TSH.....	64
Figura 73 Desplazamiento horizontal de los muros después del ensayo.....	65
Figura 74 Fallas del muro TSH.....	66
Figura 75 Montaje del prototipo GSH, esqueleto con pies de guadua con latas y hueco.....	67
Figura 76 Ciclo de histéresis prototipo GSH.....	68
Figura 77 Envolvente del prototipo GSH .....	68
Figura 78 Desplazamiento horizontal del prototipo GSH .....	69
Figura 79 Fallas del prototipo GSH.....	69
Figura 80 Montaje del espécimen GSHS esqueleto con latas de guadua y relleno de tierra. 70	
Figura 81 Ciclo de histéresis del prototipo GSHS .....	71
Figura 82 Ciclo de histéresis con envolvente del prototipo GSHS.....	71
Figura 83 Desplazamiento horizontal del muro GSHS .....	72
Figura 84 Falencias del prototipo GSHS después del ensayo .....	73
Figura 85 Montaje del muro TSHS en madera con latas de guadua y relleno de tierra .....	74
Figura 86 Ciclo de histéresis muro TSHS .....	75
Figura 87 Ciclo de histéresis con envolvente del muro TSHS .....	75

Figura 88 Desplazamiento horizontal del muro TSHS .....	76
Figura 89 Fallas del prototipo TSHS .....	77
Figura 90 Fallencias del prototipo TSHS.....	78
Figura 91 Envolvente del ciclo de histéresis .....	79
Figura 92 Esquema degradación de rigidez de un ciclo .....	80
Figura 93 Disipación de energía de un ciclo.....	80
Figura 94 EVDR de un ciclo, modificado de Ali et al. (2012) .....	81
Figura 95 a) Envolvente de los ciclos de histéresis b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente.....	82
Figura 96 a) Envolventes de los ciclos de histéresis b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente.....	83
Figura 97 Envolventes de los ciclos de histéresis, b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente.....	84
Figura 98 a) envolventes de los ciclos de histéresis, b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente.....	86

## 1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Presidencia de la república (2019), en Colombia 1,7 millones de hogares urbanos y 1,6 millones de hogares rurales no tienen vivienda o su vivienda está en no tan buenas condiciones. Con relación a este problema el Gobierno Nacional tiene como meta transformar las condiciones de habitabilidad de los hogares con el mejoramiento físico de viviendas y entorno, además de lograr equidad en el acceso a vivienda para los hogares, para ello ha puesto su mirada en los programas de Casa Digna - Vida Digna; el Semillero de Propietarios, para impulsar el arrendamiento como primer paso para que las familias sean propietarias de su vivienda; el acceso a vivienda de interés social aumentando la oferta de crédito y permitiendo que confluyan diferentes fuentes de financiamiento; la revisión de los topes para viviendas de interés social y prioritario, y los subsidios asociados, reconociendo la diversidad del territorio; y finalmente, el fortalecimiento del Programa de Subsidio de Vivienda de Interés Social Rural mediante soluciones de viviendas adecuadas al entorno rural, regional y cultural.

Así mismo, en Colombia los hogares de los municipios que forman parte de los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial DANE (2024), se observa que el 25.2 % de la población reside en viviendas que cuentan con el permiso del propietario sin costo alguno, el 24.0 % se encuentra en situación de arrendamiento, el 6.4 % son ocupantes de hecho, un 3.3 % de los hogares vive en régimen de propiedad colectiva y solo el 41.1 % de los hogares dispone de una vivienda propia, ya sea en proceso de pago o completamente pagada. El gobierno brinda la oportunidad que por medio del Ministerio de vivienda (2024) en el Programa de Subsidio de Vivienda de Interés Social Rural consiste en un apoyo único en dinero o en especie por un monto de 22 salarios mínimos legales mensuales vigentes (SMMLV) en mejoramiento y de 70 SMMLV para convocatorias ordinarias en construcción de vivienda nueva. Por un lado, en la construcción se pueden edificar viviendas rurales, compuestas por un espacio múltiple para la sala y el comedor, habitaciones, baños y cocina, con instalaciones y acometidas domiciliarias. Por otro lado, el mismo Ministerio permite el uso de materiales estructurales, métodos de diseño y construcción tanto convencionales como alternativos, estos últimos previa autorización de la “Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes”, en cumplimiento de lo establecido en los términos previstos del Capítulo II del título II de la Ley 400 de 1997 y/o su normatividad aplicable que adicione, modifique o sustituya, sin embargo, en otros apartes restringe los cerramientos a

superficies homogéneas constituidas con elementos rígidos, resistentes a las cargas axiales de la cubierta y demás esfuerzos solicitados, de protección y aislamiento del entorno, que brinde condiciones de confort térmico, con aberturas correspondientes a ventanas o puertas que permitan la relación con el entorno Ministerio de Vivienda (2020) lo que restringe a sistemas flexibles como el bahareque de tierra para efectuar los cerramientos de las viviendas.

Debido a lo anterior, en la presente propuesta se pretende estudiar el sistema de construcción en tierra con la técnica del bahareque, desde la caracterización del material del relleno en el laboratorio y el análisis de la respuesta de muros conformados por dos paneles ante cargas horizontales cíclicas, dentro del proyecto de investigación “Beco” de la convocatoria entre sedes de la Pontificia Universidad Javeriana.

## **1.1 Descripción del problema**

A raíz de la pandemia generada por el coronavirus Covid -19, que en Colombia llegó en marzo del 2020 y debido al confinamiento producido por la enfermedad, 204 millones de personas en la mayoría de América Latina no generaron ingresos para satisfacer las necesidades básicas como lo es, tener una vivienda digna, trabajo, alimento, vestuario, entre otros, Colombia aumentó 7 puntos porcentuales con un 33% de pobreza y un 13.1 % en pobreza extrema según (CEPAL-UNESCO, 2021).

Y de acuerdo con el DANE (2024) para 2023 apenas el 43.9 % de los hogares colombianos tenían vivienda propia, en referencia a lo rural, esta cifra es ligeramente mayor (56.1 %). Según la misma entidad, esta cifra de tenencia viene reduciéndose, debido al alto costo de estas, la estabilidad laboral y las altas exigencias de tipo financiera para la compra del inmueble.

En las zonas rurales construir una vivienda conocida como de “material”, que emplea materiales como el concreto, acero y ladrillos de arcilla cocida, resulta ser más costosa que en lo urbano, uno de los factores representativos en el sobre costo, es el transporte, debido al mal estado de las vías, y la disponibilidad de mano de obra calificada en zonas de difícil acceso. En su mayoría, las casas de material son vistas como sinónimo de progreso dejando a un lado las casas de bahareque y tapia, siendo éstas de acuerdo con su configuración estructural compuesta de guadua

y tierra, notablemente más económicas ya que el material se obtiene directamente de la zona. Así mismo una casa en bahareque puede ser un 30 a 60% más económica (Real et al., n.d.)

En la técnica del bahareque, se han desarrollado varias metodologías para las casas de uno y dos pisos que al pasar los años algunas de ellas siguen en pie y han superado embates de la naturaleza como los sismos, por ejemplo, el de Armenia en enero de 1999 que en la zona del eje cafetero muchas casas no se vieron gravemente afectadas Escobar et al. (1999). Entre las técnicas del bahareque clasificadas por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002), se encuentran bahareque en tierra relleno, hueco, en tabla, metálico, encementado y bahareque contemporáneo. Sin embargo, desde el punto de vista normativo, la NSR solo considera el bahareque en cementado como una alternativa estructural para vivienda nueva, teniendo como referencia el bahareque tradicional del viejo Caldas.

De acuerdo con Alzate-Soto & Osorio-Ríos (2014), al estudiar la construcción de bahareque en una zona rural del municipio de Aranzazu Caldas, encontraron que el impacto de la construcción en tierra no es lo suficientemente significativa, alta o persistente para que la naturaleza no sea capaz de regenerarse, y que la disminución de la cobertura vegetal se debe más a la expansión de las fronteras agrícolas o pecuarias, que la extracción propia de las maderas para construir o para fines comerciales, en dicha zona. Mostrando el alto potencial ambiental que tiene la construcción en bahareque tradicional de tierra.

Desde este punto de vista, la realidad muestra una población rural más pobre, una normativa que privilegia la construcción con materiales de alto impacto, que generan no sólo en su fabricación impacto ambiental sino en su transporte, y al bahareque como una opción que puede solucionar ambos problemas. Esto requiere, por un lado, la caracterización de los tipos de bahareque de cada región, y por otro, evaluar su respuesta ante cargas horizontales como las que pueden llegar por la acción sísmica.

En la actualidad, y en especial en la postpandemia del COVID-19, tener vivienda propia se volvió más que un lujo, una necesidad de la mayoría de la población, no solo como sitio de descanso y esparcimiento sino como un posible lugar de trabajo. Uno de los mayores obstáculos de adquisición de vivienda en Colombia es la financiación de esta, dado que el modelo financiero usualmente el 70% del valor comercial en plazos hasta de 30 años, y por ende los propietarios requieren disponer en un periodo de tiempo corto el 30 % restante. Adicionalmente, es frecuente

que los bienes inmuebles financiados en Colombia son los de carácter urbano, agudizando el problema de tenencia de vivienda rural. Las viviendas financiadas en estos modelos son aquellas que están adheridas a la cimentación y no pueden ser transportadas, construidas comúnmente con materiales convencionales, desarrollados en estructura de hormigón armado, con puertas y ventanas en aluminio, acabados en cerámica, pinturas químicas y demás González & García Navarro (2006); dejando una huella de carbono considerable. Debido a lo anterior, la necesidad de vivienda en el sector rural termina promoviendo la autoconstrucción, es decir, donde los mismos habitantes participan en la construcción de sus moradas, caso en el cual no se cuenta con licencias, acompañamiento técnico y la supervisión de la calidad de los materiales, poniendo en riesgo su vida y la de sus familias ante cualquier acontecimiento sísmico.

Tradicionalmente, en las zonas montañosas de Colombia, la construcción en tierra ocupó un lugar importante en la edificación de vivienda, en las zonas de menores recursos los módulos de las viviendas eran edificados con la técnica del bahareque de tierra, sistema compuesto por un esqueleto de madera, guadua o una combinación de ellos, rellenos en su interior con una mezcla de suelo y fibras naturales, que son colocados a mano en un estado plástico, ocasionalmente mezclado con estiércol de equinos o bovinos y cal hidratada para dar mejor apariencia y textura.

Este tipo de vivienda comenzó a desaparecer de los contextos urbanos con la llegada de materiales como el concreto y el ladrillo cocido de arcilla proveniente de procesos industrializados. En la actualidad, está presente solo en los contextos rurales y en municipios pequeños. Desde el punto de vista normativa la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica solo reconoce como sismo resistente las construidas con bahareque en cementado NSR-10 (2010), y tiene consideraciones solo de reparación para las de bahareque de tierra. El uso del cemento y otros materiales no favorece la economía de la vivienda ni reduce de forma significativa las emisiones de carbono, además que reduce el desempeño térmico. En parte, estas razones, motivan el presente trabajo de grado, en el cual se quiere estudiar la respuesta de muros de bahareque de tierra ante cargas horizontales cíclicas, respondiendo la siguiente pregunta de investigación:

*¿Cómo es el comportamiento ante cargas horizontales de muros de bahareque de tierra con las tipologías presentes en la zona sur del Valle del Cauca?*

De la pregunta anterior, es posible derivar la siguiente hipótesis de investigación:

*La respuesta ante cargas horizontales de muros de bahareque de tierra con las tipologías presentes en la zona sur del Valle del Cauca se ve influenciada por el tipo de material que conforma la estructura y su relleno.*

## **1.2 Objetivos del proyecto**

A continuación, se describen los objetivos que se pretenden desarrollar con la presente propuesta.

### **Objetivo general**

Analizar la respuesta ante cargas horizontales en muros de Bahareque de tierra mediante ensayos cíclicos en laboratorio para entender su comportamiento.

### **Objetivos específicos**

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el comportamiento mecánico del relleno en las construcciones de bahareque en una región específica del departamento del Valle del Cauca.
- Diseñar el montaje para ensayos de muros de bahareque en el laboratorio mediante el análisis de los protocolos de carga y su instrumentación.
- Obtener la respuesta de muros de bahareque con y sin relleno de tierra mediante ensayos de cargas cíclicas horizontales en el laboratorio.

## **1.3 Organización del documento escrito**

En el Capítulo 1 se resume la identificación del problema de investigación y los objetivos que se cumplieron en el desarrollo de la propuesta investigativa.

El Capítulo 2 contiene la revisión bibliográfica, la misma está dividida en dos partes, comenzando por algunas generalidades del bahareque y finalizando con el comportamiento del bahareque y con estructura de madera.

Los materiales y métodos están descritos en el Capítulo 3, incluyendo la descripción de los materiales empleados para la construcción de los muros y los ensayos de laboratorio.

En el Capítulo 4 se expone la tipología de la zona, el proceso constructivo, el protocolo experimental y la disposición de sensores.

Los resultados obtenidos y los análisis se presenta el Capítulo 5, organizados de acuerdo con las condiciones de cada muro, es decir, con pies de guadua o de madera, con latas de guadua, con y sin relleno de tierra.

Se resumen las conclusiones del trabajo de grado, así como las sugerencias para trabajos futuros en el Capítulo 6.

## 2 REVISION BIBLIOGRAFICA

Este capítulo está organizado en tres partes. La primera parte hace referencia a las generalidades de la construcción en tierra haciendo énfasis en el Bahareque, la segunda a la respuesta del sistema y otros similares cuando son sometidos a cargas horizontales en el laboratorio.

### 2.1 Generalidades del bahareque

El hombre desde el inicio de los tiempos con el fin de salvaguardar la vida descansaba en cavernas que iba dejando a su paso, después construía tiendas de campaña hechas con pieles de animales y posteriormente chozas construidas en esteras de juncos, que cubrían después con brea, arcilla o barro. De esta manera, empezaron a notar que la radiación solar secaba el barro, lo que los inspiró a fabricar bloques de arcilla que sometieron a cocción en hornos para lograr su sellado, práctica que aún es empleada y ha sido mejorada a lo largo de los años. A propósito de la construcción con tierra, Costi de Castrillo et al. (2017), relatan que muchos monumentos fueron elaborados a partir de ladrillos de barro secados, cerca del Medio Oriente, India, China, Siri-Palestina.

En la antigüedad y en la actualidad, las construcciones en tierra se realizan alrededor de todo el mundo, Hamard et al. (2016), reúnen múltiples investigaciones que clasifican las técnicas en métodos húmedos y secos, a partir del porcentaje de humedad que corresponde al límite plástico. Los métodos secos son aquellos donde la elaboración de muros se realiza con un material compactado por debajo del límite plástico, el control y diseño se realiza a través del Proctor. Mientras que los métodos húmedos son aquellos donde el material se prepara con un contenido de agua que está entre el límite plástico y el límite líquido, la clasificación y los nombres correspondientes se encuentran en el flujograma de la Figura 1.

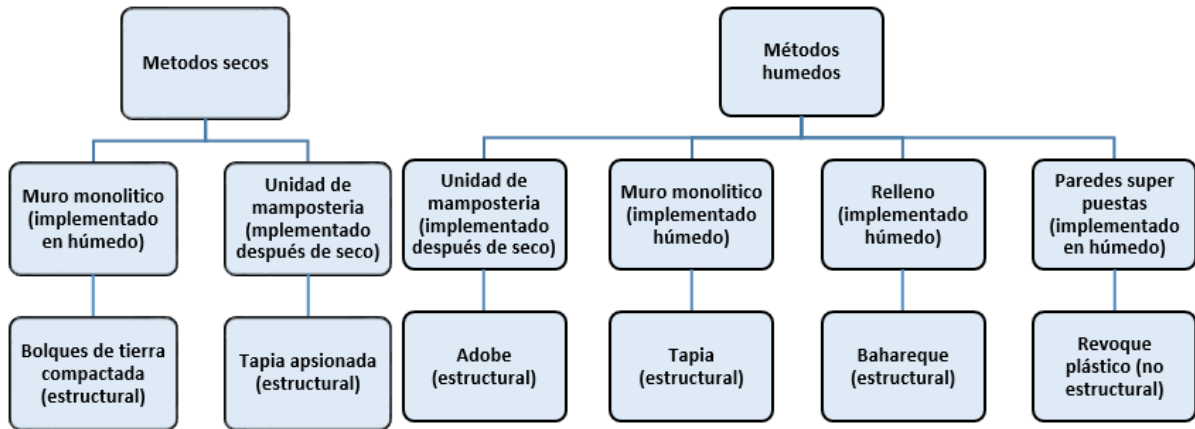
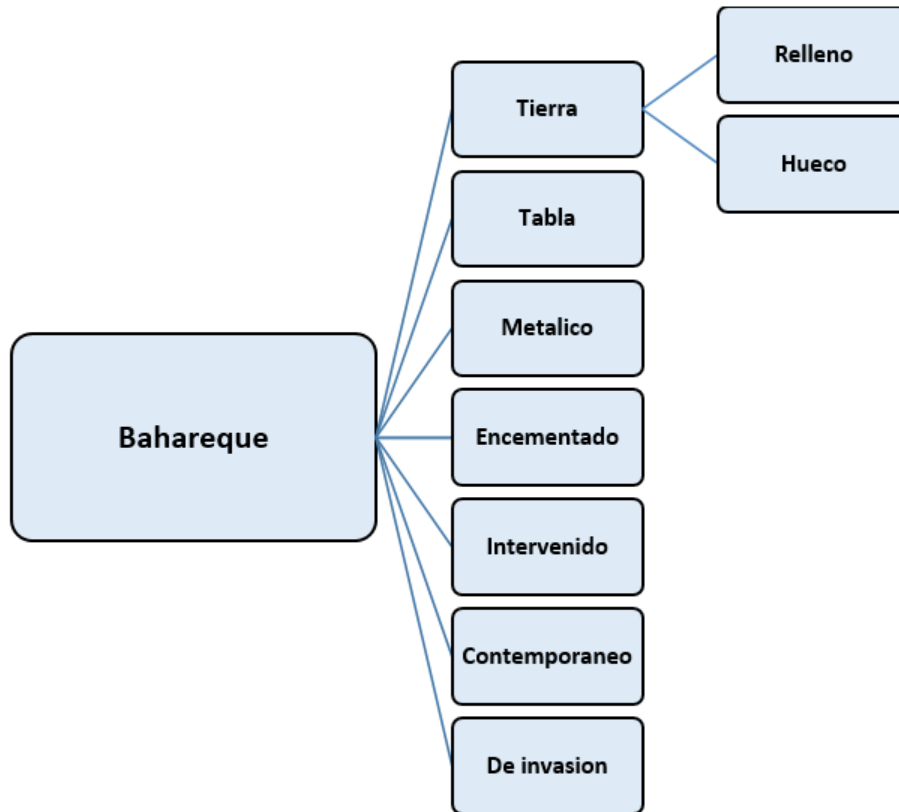


Figura 1 Clasificación de los procesos de construcción con tierra

Nota: modificado de Hamard et al. (2016)

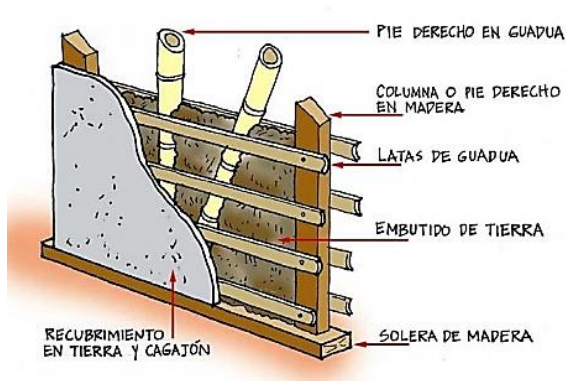
### 2.1.1 Tipos de bahareque

Dentro de los métodos húmedos de construcción en tierra se encuentra el bahareque, es un sistema constructivo compuesto por un esqueleto de guadua o madera, hueco y relleno de suelo extraído de la misma región mezclado con fibras naturales. Los marcos están hechos de pie derecho, izquierdo, central, solera superior, inferior, diagonales y por latas o tiras de guadua aproximadamente de 5 cm de ancho, ubicados longitudinalmente para contener el relleno, entre las tipologías del bahareque se encuentran en la Figura 2 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2002).



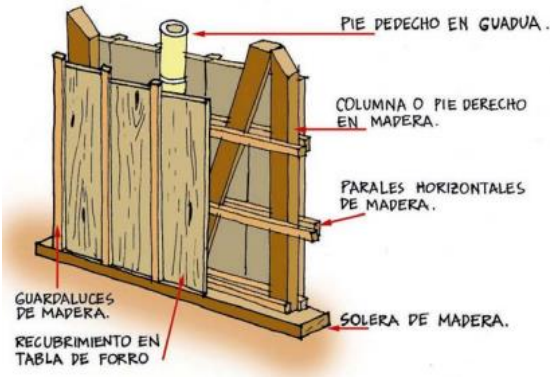
*Figura 2 Tipologías del bahareque  
modificado de Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002)*

A continuación, en las Figuras 3 a 7 se describe la clasificación de cada uno de los sistemas de bahareque en Colombia:



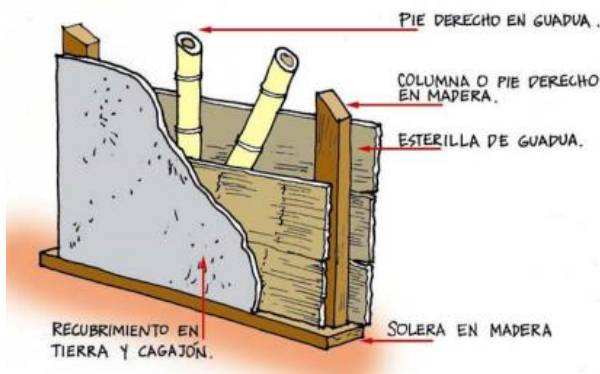
Bahareque de tierra relleno, es un sistema compuesto por madera, guadua, latas de guadua para contener el embutido o relleno de tierra, y con recubrimiento en tierra (Figura 3).

*Figura 3 Bahareque relleno de tierra  
tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002)*



Bahareque hueco, hecho de parales o pie en madera o guadua, no lleva embutido y el recubrimiento es en tablas (Figura 4).

Figura 4 Bahareque de tierra hueco  
tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002)

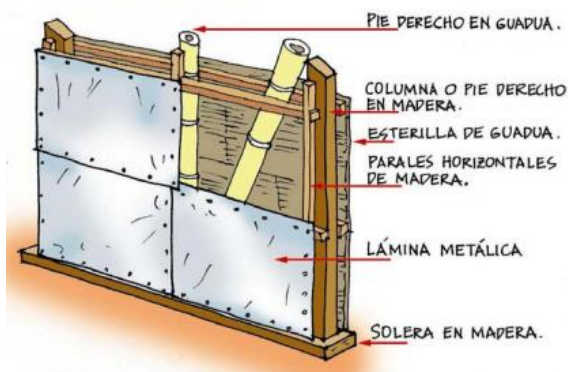


Bahareque en tabla, construido con soleras y pies en guadua o madera, su diferencia es que ubican esterilla de guadua y posterior a ella el recubrimiento lo hacen en tierra y cagajón (

Figura 5).

Figura 5 Bahareque en tabla

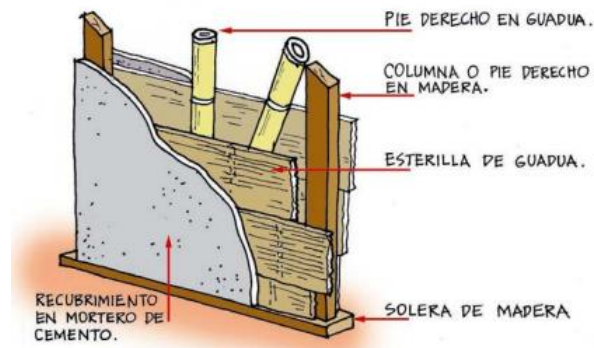
tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002)



El bahareque metálico, técnica de pies en guadua, columnas en madera, esterillas de guadua, con soleras en madera y el recubrimiento con lámina metálica (

Figura 6)

Figura 6 Bahareque metálico  
tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002).



El bahareque encementado, mantiene las mismas configuraciones anteriores, pero sobre la esterilla en guadua se aplica el recubrimiento en mortero de cemento (Figura 7).

*Figura 7 Bahareque encementado*  
tomado de: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002).

### 2.1.2 Materiales para la elaboración del bahareque

De acuerdo con el Servicio Nacional de Aprendizaje (2015), el sistema de construcción conocido como bahareque se caracteriza por un entramado estructural compuesto de madera aserrada o guadua. En términos técnicos, se distinguen la solera superior e inferior, los elementos verticales referidos como pie de amigo o pie derecho, y las riostras, que son elementos diagonales inclinados.

El bahareque embutido se construye empleando latas de guadua, que tienen aproximadamente entre 4 y 5 cm de ancho. Estas latas se clavan horizontalmente con puntillas en ambas caras, dejando una separación de alrededor de 10 cm entre ellas para permitir la introducción de las manos con la mezcla. La composición de la mezcla consiste en arcilla superior al límite plástico, combinada con fibras naturales como el fique, la paja y el pasto, los cuales son cortados sin una especificación. Además, se aplica un revestimiento compuesto de boñiga o una mezcla de cemento y arena. En algunos casos, se utiliza cal como parte del proceso.

El bahareque metálico y de tablas, se arma el esqueleto en madera o guadua de la misma forma, el recubrimiento es con tablas de ancho 30 cm sujetas a cuartones de 5 cm x 10 cm (2" x 4"), el recubrimiento es en láminas de metálicas (de hierro dulce, galvanizadas o de zinc) lisas u ornamentales sujetos al armazón entre madera guadua y cuartones.

### 2.1.3 Proceso constructivo del bahareque

Una vez que se ha seleccionado la guadua y la madera, se procede a realizar una inspección para asegurar que no presenten huecos generados por insectos. Posteriormente, se lleva a cabo un

replanteo para determinar la ubicación de los muros. Se inicia levantando los paralelos o pies, seguido por la colocación de las soleras superior e inferior. A continuación, se instalan las diagonales para su ajuste, las tiras o latas tienen dimensiones aproximadas de 4 a 5 cm de ancho y se dejan espacios entre sí de 8 a 10 cm para permitir la introducción manual de la mezcla; todas las conexiones se hacen con puntillas.

Se prepara la mezcla con material extraído de la zona altamente arcilloso, se mezcla con pasto, fique o paja debidamente cortado y agua, dejándola con alta humedad mezclándola y apisonándola con los pies, para embutirla con las manos en cada espacio, una vez lleno todo el módulo se deja secar alrededor de un mes dependiendo del clima.

En la mayoría de los casos se utiliza un revoque o pañete realizado con una mezcla similar, pero con una cantidad mayor de pasto o fique y boñiga, algunos añaden cal o cemento-arena.



*Figura 8 Construcción de un prototipo de muro en bahareque, por un residente de la zona*

## **2.2 Comportamiento del bahareque y sistemas similares ante cargas horizontales**

Es común que en el diseño sismo resistente, especialmente en las normativas, considere que las partes de las edificaciones que conforman el sistema de resistencia estructural se diseñan para soportar las demandas que la componente sísmica horizontal genera sobre ellas. Por esto, en la presente propuesta se analiza la respuesta de algunos sistemas de construcción en tierra ante cargas horizontales.

### 2.2.1 Pórticos de guadua y bahareque con recubrimiento

Herrera (2008), evaluó experimentalmente un sistema de pórtico en guadua escala 1:1 rigidizado mediante la adición de dos tipos de paneles prefabricados de bahareque y ensayado ante cargas horizontales. Construyó paneles de madera con bahareque sin recubrimiento (EP), con recubrimiento encementado (BP) y recubrimiento con tiras de guadua instaladas en forma diagonal continuas (TP), las medidas de los paneles eran de 0.9 m de base y 2.0 m de altura, estos paneles fueron sometidos a cargas monotónicas (ver Figura 9) a tres ciclos cada panel, en los cuales en el primer ciclo evidencia su carga máxima de 0.260, 0.533, y 0.453 kN con desplazamientos de 80, 120 y 140 mm respectivamente (ver Tabla 1).

Tabla 1 Resumen de los prototipos modificado Herrera (2008)

Muros	$\Delta$	P	K	$\Delta$	P	K	$\Delta$	P	K
	(mm)	(kN)	(kN/m)	(mm)	(kN)	(kN/m)	(mm)	(kN)	(kN/m)
	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Panel sin recubrimiento (EP)	80	0.260	3.16	100	0.223	1.76	120	0.175	0.31
Tiras de guadua (TP)	140	0.453	3.26	160	0.301	2.87	120	0.139	2.02
Bahareque encementado (BP)	120	0.533	5.74	120	0.480	3.97	80	0.242	3.18

Nota:  $\Delta$ : Desplazamiento, P: Carga máxima, K: Rigidez



Figura 9 Módulos de guadua fuente Herrera (2008)

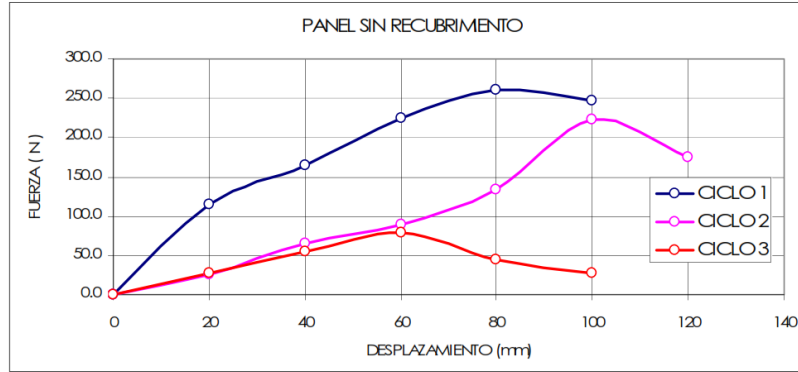


Figura 10 Diagrama fuerza desplazamiento del panel sin recubrimiento fuente Herrera (2008)

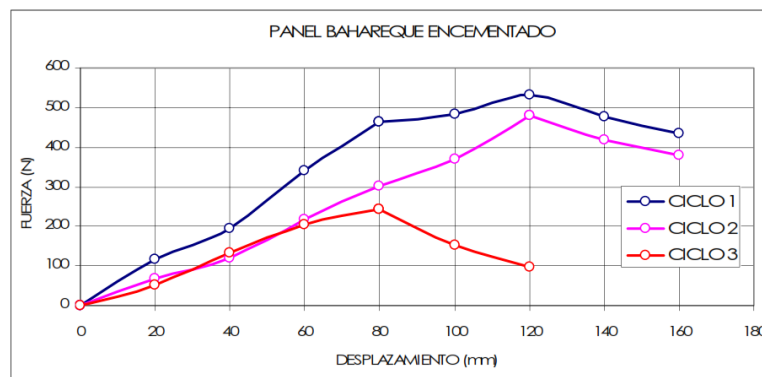


Figura 11 Diagrama fuerza desplazamiento del panel encementado fuente Herrera (2008)

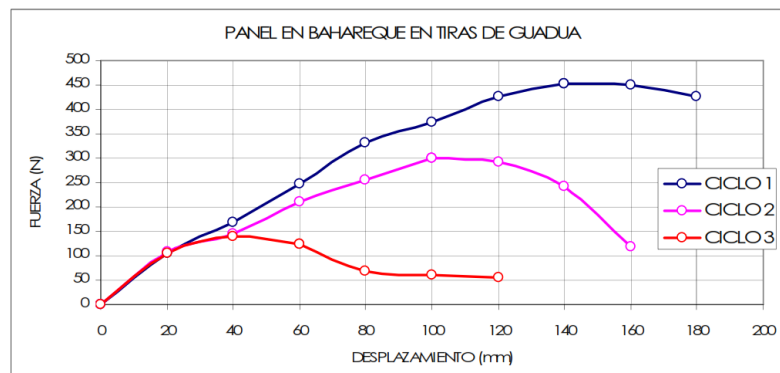


Figura 12 Diagrama fuerza desplazamiento del panel con tiras de guadua fuente Herrera (2008)

El autor encontró que los paneles perdían rigidez ( $K$ ) en cada uno de los ciclos de carga y que la misma disminuye de forma abrupta cuando fallaba la unión, de igual forma el panel BP y TP mejoraron su desempeño significativamente tanto en resistencia como en desplazamiento ( $\Delta$ ), presentando una mejor ductilidad.

## 2.2.2 Pórticos de madera y bahareque tradicionales chinos

Huang et al. (2018), realizaron el análisis en laboratorio de un sistema tradicional de construcción en la antigua China, denominado *Chuan-Dou*, el sistema consiste en conexiones de mortaja y espiga, se ensayaron tres tipos compuestos por pilares redondos entre 150 a 250 mm de diámetro, en este sistema las vigas ingresan en las columnas o pilares dejando espacio entre ellas de 2 a 3 m y entre columnas de 3.5 a 5.5 m. Los módulos que ensayaron fueron 2.5 m de ancho y 3.5 m de alto, uno con palos de bambú con diámetro 5 mm ubicados verticalmente entre los pilares posteriormente rellenaron con arcilla de espesor de 60 mm, otro solo el armazón y otro en vez de relleno ubicaron láminas de madera ligera en ambas caras.(ver Figura 13) Los pilares tenían 45 kN de carga distribuida en 9 kN para cada pilar en dados de concreto, los módulos estaban apoyados directamente sobre concreto para observar la rotación de las columnas.

Realizaron un análisis cíclico donde alcanzaron bajo protocolo de carga según la ASTM E2126-11 procedimiento B, con desplazamientos de 60, 90 y 250 mm, para una carga lateral total de 5.6 kN para el relleno, para los demás módulos se pueden (ver en la Tabla 2).

Tabla 2 Resumen de los módulos modificado Huang et al. (2018)

Módulos	Desplazamiento lateral máximo (mm)	Carga máxima (kN)	Degradación de la rigidez (kN/m)
Marco desnudo (CTF)	250	5.6	5.1 – 21.3
Con relleno (CTFM)	250	11.8	386.6 – 44.5
Con láminas OSB (CTFW-1)	250	15.6	914 – 67.2

Se evidencio que los módulos que contenían relleno mejoraron su capacidad de carga final y la rigidez inicial, los módulos desnudos presentaron un buen comportamiento sísmico en capacidad de deformación de disipación de energía.



Figura 13 Prototipos ensayados fuente Huang et al, (2018)

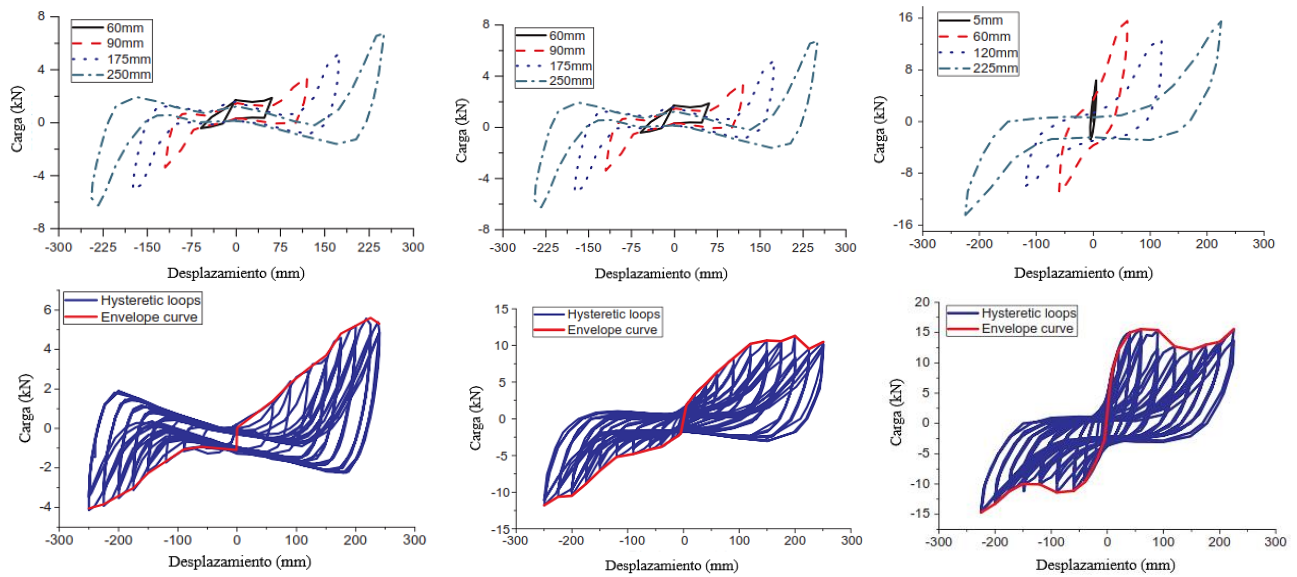


Figura 14 Envoltura y Ciclos de histéresis fuente Huang et al., (2018).

### 2.2.3 Respuesta de diferentes rellenos en muros tradicionales chinos

Liang et al. (2022), evaluaron el efecto que diferentes condiciones de relleno tienen sobre la respuesta del sistema *Chuan-dou*, tradicional en el suroeste de China después de miles de años de producción y vida. Evaluaron la respuesta de un pórtico estándar de una estructura típica de madera de dos pisos con una escala de 1:2, evaluaron la respuesta ante cargas horizontales de diferentes configuraciones: pórticos *Chuan-dou* sin paredes rellenas (PWF), un *Chuan-dou* con muros de madera rellenos (WWF) y un marco de madera *Chuan-dou* con paredes rellenas de ladrillo en la parte inferior y cartón yeso en otras partes (BWF), tal como se ilustra en la Figura 15. Los resultados mostraron que los ensayos del PWF tenían una buena deformación, pero su rigidez y capacidad de carga eran bajas. En comparación con los pórticos PWF, la resistencia lateral y la

rigidez de los WWF y BWF mejoraron, pero la capacidad de deformación compatible de la pared de ladrillo y el pórtico era pobre debido a la débil conexión entre ellos.

El mismo grupo de Guo et al. (2022), estudiaron pórticos tipo Chuan-Dou con diferentes rellenos a escala real en el laboratorio. Probaron cuatro muestras para estudiar la contribución de diferentes rellenos en su comportamiento sísmico. El trabajo experimental incluyó dos pórticos rellenos con tablilla machimbrada, un muro relleno de madera conformados por ocho tablonces verticales y dos horizontales conectados por un sistema similar al machimbre en las cuatro esquinas del muro, y un pórtico con entrepaños de mampostería de arcilla pegados con mortero. Los resultados de las pruebas indicaron que el sistema tiene una ductilidad excepcional al movimiento lateral y una buena capacidad de disipación de energía. Tanto el relleno de muros de madera como el relleno de mampostería de ladrillo aumentan la resistencia a la carga lateral, la rigidez lateral y la disipación de energía del sistema con relación al sistema sin relleno. La contribución de los rellenos de mampostería mejora la capacidad resistente lateral de los pórticos, incluso por encima del efecto de los rellenos con madera.

Ambas investigaciones evidencian el efecto del relleno en la capacidad de carga lateral de los pórticos de madera tipo Chuan-dou tanto en modelos a escala reducida como en escala real. En los trabajos también es evidente que las deformaciones de los rellenos no acompañan los desplazamientos de los elementos del pórtico, vigas y columnas de madera, dando lugar a un comportamiento que puede ser exhibido por muros de bahareque, donde el relleno de tierra no acompañe las deformaciones de los pies y soleras de madera.

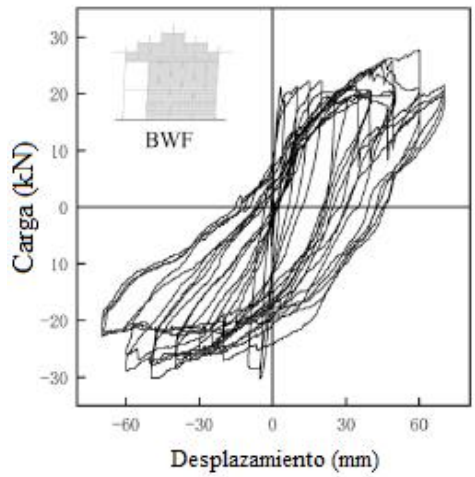
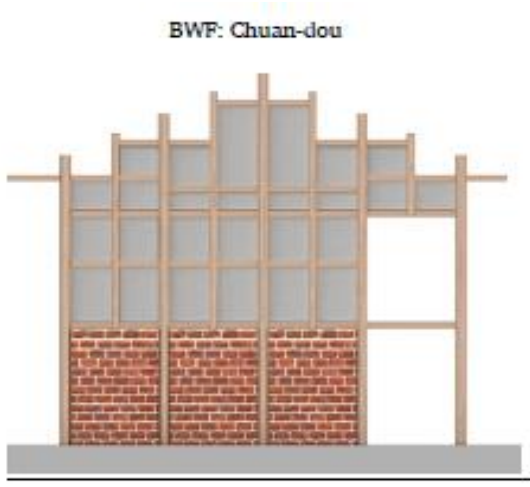
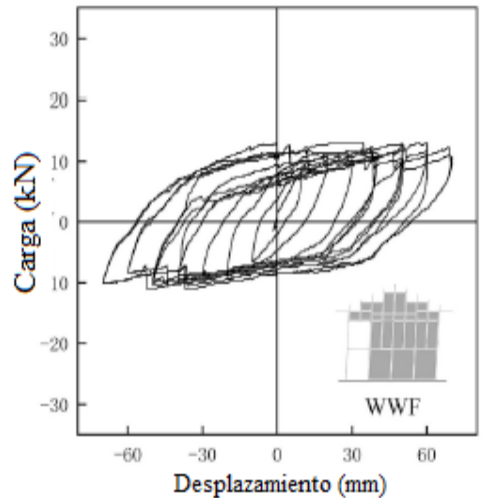
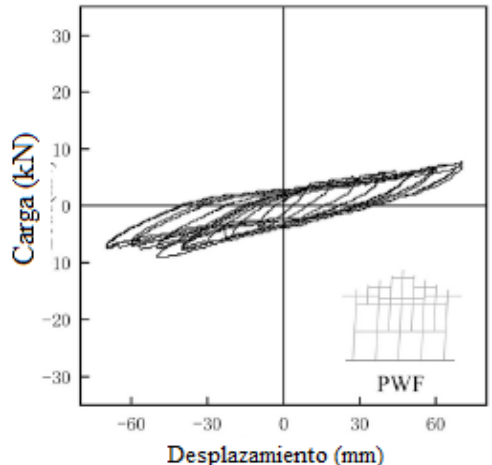
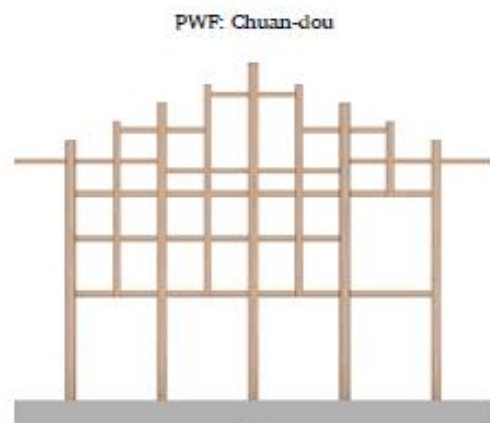


Figura 15 Pórticos y ciclos de histéresis fuente Liang et al. (2022)

Tabla 3 Resumen de los modelos modificado Liang et al. (2022)

Módulos	Desplazamiento lateral (mm)	Carga máxima (kN)	Rigidez Cíclica (kN/mm)
Sin paredes (PWF)	10	3.25	0.36
Con paredes en madera (WWF)	10	+/- 10	0.75
Con paredes en ladrillo y placas de yeso (BWF)	10	17.87	2.47

Liang et al. (2022), realizaron un modelo en estructura de madera a media escala 1:2 donde utilizaron ménsulas *Dou-Gong*, en pórticos viga – columna con uniones de mortaja-espiga cuatro columnas tipo conexión de cola de milano similares a las tradicionales construcciones antes de la dinastía Ming. Se ejecutaron seis prototipos bajo carga pseudoestática con tres niveles de carga, diseño para cargas verticales máximas de 45 kN. Se hicieron dos prototipos, analizando cada nivel seis pruebas en total con 8-7 ciclos aproximadamente. De acuerdo con la respuesta en los módulos, no se presentan daños significativos, se salieron de forma heterogénea las uniones mortaja-espiga, presentaron desprendimiento de fibras en las columnas y una leve rotación. En los ciclos de histéresis no presenta una disipación de energía grande, pero si una capacidad de deformación. La deriva entre pisos fue de 1/22 rad.

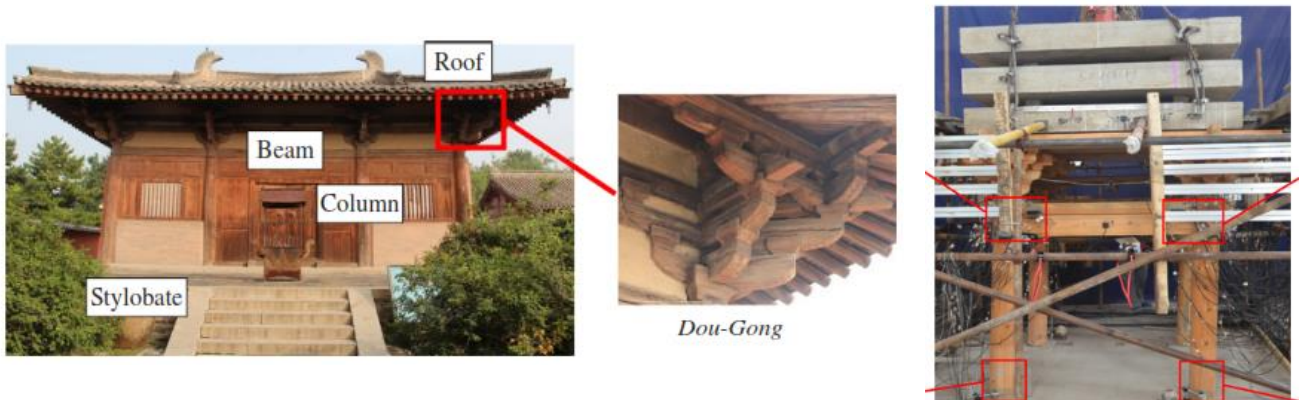


Figura 16 Estructura típica fuente Meng et al.(2018)

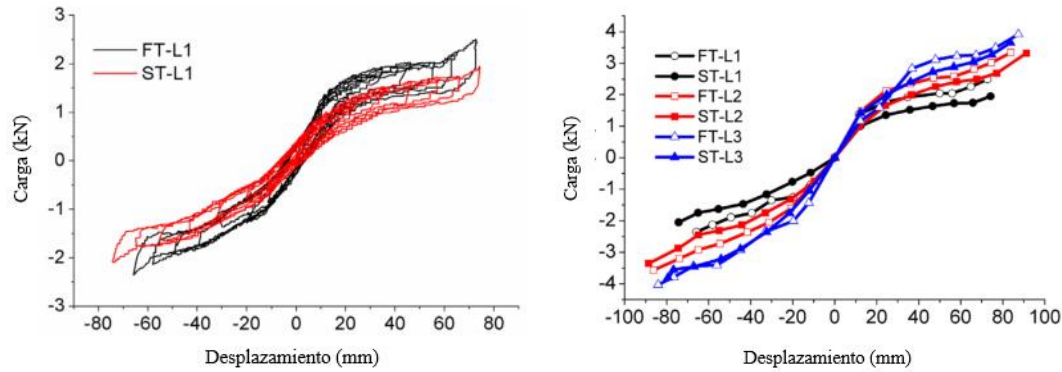


Figura 17 Curva de histéresis nivel 1 y envolvente de los prototipos de Meng et al. (2018)

Tabla 4 Resumen de los resultados modificado de Meng et al. (2018)

Módulos	Desplazamientos laterales máximos (mm)	Carga máxima (kN)	Degradación de la rigidez (kN/mm)
FT-L1 C1-C7	-65.996; 72.931	-2.32; 2.5	96.75; 35.2
ST-L1 C1-C7	-74.049; 74.497	-2.04; 1.95	61.97; 26.84
FT-L2 C1-C8	-86.13; 83.669	-3.57; 3.37	97.7; 41.09
ST-L2 C1-C8	-88.367; 91.499	-3.35; 3.35	81.17; 37.29
FT-L3 C1-C8	-83.893; 87.472	-4,00; 3.96	122.78; 46.03
ST-L3 C1-C8	-79.418; 83.669	-3.78; 3.66	100,74; 45.84

FT-L1: nivel L1, ciclo del 1 al 7.

#### 2.2.4 Bahareque encementado de la zona del eje cafetero colombiano

Silva & López (2000), analizaron muros en bahareque encementado con esterilla de guadua, las uniones fueron con tornillos y láminas metálicas, se construyeron distintos módulos de acuerdo con la ubicación en una casa (con las configuraciones mostradas en la Figura 18 y Figura 19), las medidas eran de base 1.4 m y altura 2.45 m todo en guadua, también fabricaron en madera perimetral con columnas internas en guadua de base 1.2 m y altura 2.4 m, adicional hicieron muros completos de una fachada de una casa con medidas de 2.85 m de base y 2.2 m de alto todo en guadua, los desplazamientos máximos de los módulos más comparativos para el caso que se pretende estudiar (Tabla 5), los ensayos fueron monotónicos arrojando que los muros de bahareque que contienen la diagonal se por comportan mejor, uno de estos presento un incremento en la

resistencia máxima de 37.3 %, los módulos de madera aserrada se comportaron mejor en resistencia debido a las uniones.

Tabla 5 Resultados de módulos modificado Silva & López (2000).

Módulos	Desplazamiento lateral máximo (mm)	Carga máxima (kN)	Rigidez (kN/mm)
Módulo 1A-3	127.36	15.7	0.258
Módulo 2A - 1	63.45	28.94	0.456
Módulo 3A-1	81.28	51.50	0.9456

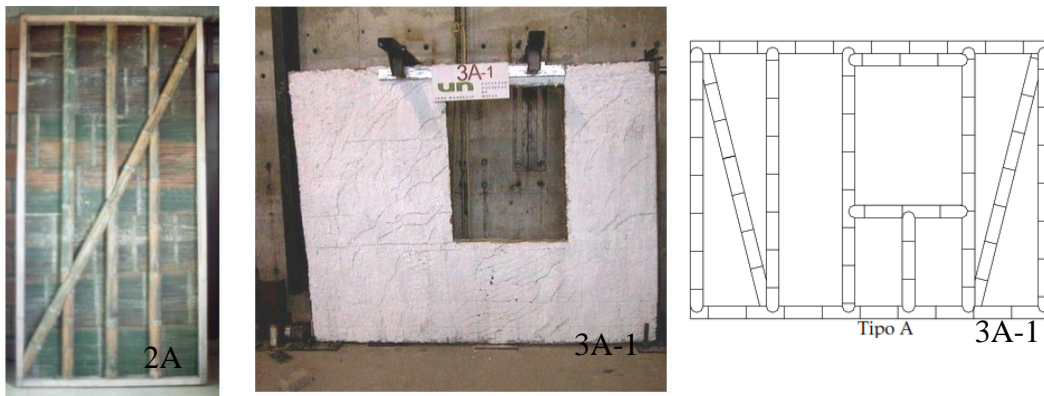


Figura 18 Módulos fabricados fuente Silva & López (2000).

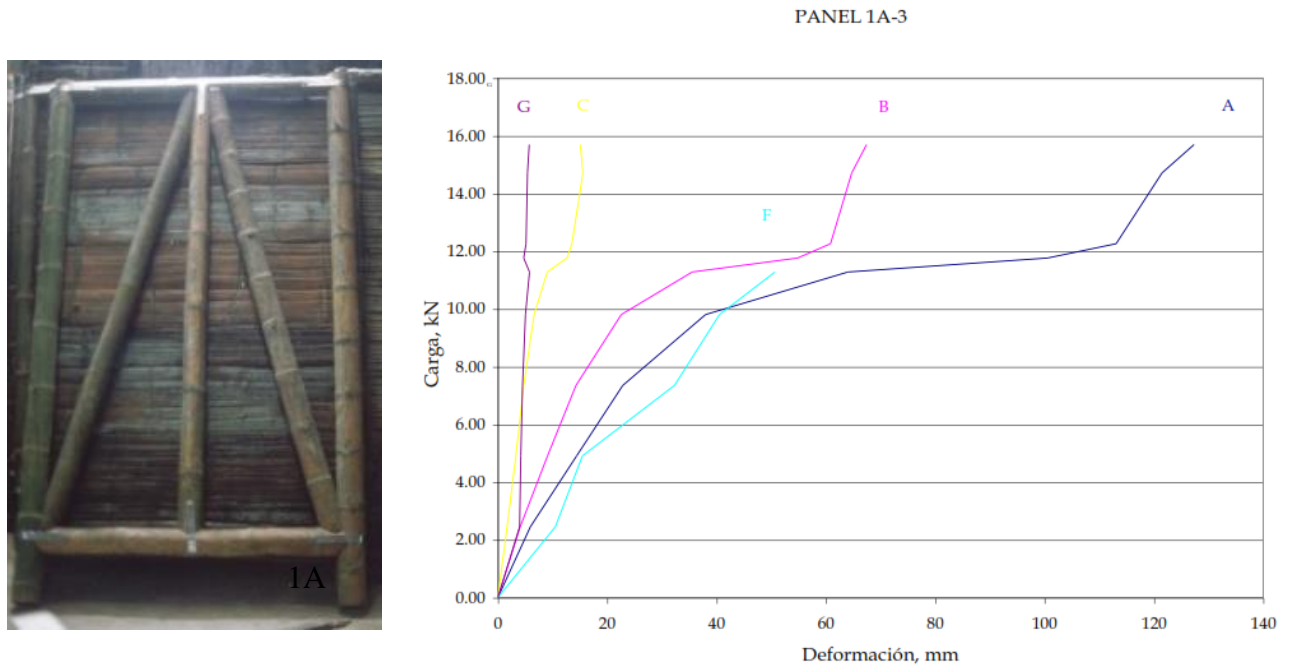


Figura 19 Carga vs deformación del panel Modulo 1A en guadua fuente Silva & López (2000)

### **2.2.5 Respuesta de muros de bahareque de tierra**

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2002), realizó ensayos monotónicos de los muros de bahareque tradicional construidos con la anterior vigencia del Decreto 52 de 2002 por medio del cual se modifica y adiciona el Capítulo E del Decreto 33 de 1998 o NSR-98. Modificación que reglamenta el diseño y construcción de los componentes en bahareque encementado, entendiendo el sistema estructural como una serie de muros que se basan en la fabricación de paredes construidas con un esqueleto de guadua, o guadua y madera, cubierto con un revoque de mortero de cemento aplicado sobre malla de alambre, clavada en esterilla de guadua que, a su vez, se clava sobre el esqueleto del muro, donde se distinguen dos partes: el entramado y el recubrimiento, que se combinan para conformar un material compuesto. El Entramado está constituido por dos soleras o elementos horizontales, inferior y superior, y pie-derechos o elementos verticales, conectados entre sí con clavos o tornillos. Mientras que el recubrimiento es un mortero de cemento aplicado sobre malla de alambre que está clavada sobre esterilla de guadua, o sobre un entablado.

El objeto del trabajo fue observar el comportamiento bajo efectos sísmicos; construyeron muros con medidas de 2.8 m alto y 1.7 m de base, armazones de madera y guadua con recubrimientos en láminas de metal, mortero sobre malla de revoque y tiras con embutido tradicional en tierra, adicionalmente realizaron un modelo en a escala real de dos pisos en madera y guadua con tiras de guadua, simulando el peso real con bloques de arcilla. En la Figura 21 se muestra la respuesta del muro de bahareque tradicional en tierra observando cómo se reducen los ciclos de histéresis a medida que se imponen ciclos de carga.



Figura 20 Módulos fabricados fuente Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).

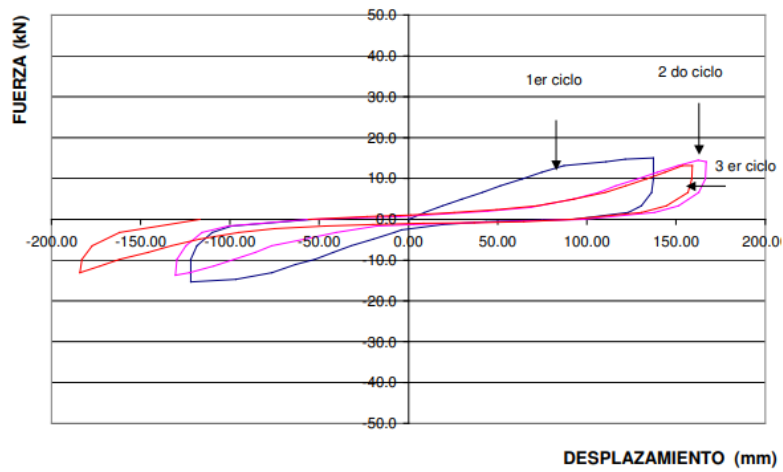


Figura 21 Ciclos de histéresis bahareque embutido fuente Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).



Figura 22 Módulos fuente Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004).

Tabla 6 Resumen de los resultados modificado Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004)

Módulos	Desplazamiento lateral máximo (mm)	Carga máxima (kN)
Muro A-H	132.2	34.4
Muro A-MAm2c	27.9	44.2
Muro C-U	137.3	15

Nota: A-H: Armazón en madera con recubrimiento en metal, A-MAm2c: Armazón en madera con recubrimiento en mortero en dos caras sobre malla de revoque, C-U: Armazón en guadua con recubrimiento en embutido.

### 2.2.6 Muros tradicionales en Rumanía

Dutu et al. (2018), basados en las evidencias de campo que dejaron los eventos sísmicos del 10 de noviembre de 1940 y el 4 de marzo de 1977 sobre las viviendas históricas en Rumania con estructura de madera y rellenos de diversos materiales como ladrillo, piedra y adobe, las cuales no sufrieron daño alguno o de importancia, estudiaron tres tipos de muros de casas tradicionales en Rumanía, compuesta de marcos de madera con diagonales más debajo de la unión superior, un muro relleno de ladrillos de barro unidos con mortero de suelo (S1), otro con el mismo esqueleto pero el relleno en suelo con paja (S2) y el último con latas o tiras con el mismo relleno (S3), tal como se ilustra en la Figura 23. Las conexiones fueron con clavos y las columnas ingresaban en las vigas. La sección transversal de la madera utilizada tenía sección cuadrada de 12 cm de lado, los módulos tenían mediadas de altura 2.4 m y base 3 m, el análisis realizado fue cíclico estático bajo el protocolo de CUREE Caltech, la carga vertical aplicada fue de 26 N, las capacidades máximas obtenidas se evidencian en la Tabla 7. Los autores observaron en los muros S1 y S2 una alta capacidad de deformación (deriva cercana al 5%, tal como se ilustra en la Figura 24), así como un asentamiento de los muros, debido al agrietamiento del mortero de barro y la fácil caída de los elementos que los hace vulnerables en la dirección fuera del plano.

Tabla 7 Resumen de los módulos modificado Dutu et al.(2018)

Módulos	Desplazamiento máximo (mm)	Carga máxima (kN)	Rigidez inicial (kN/rad)
Marco S1	127.2	29	1375
Marco S2	147.12	15	1886
Marco S3	126.48	30	1911

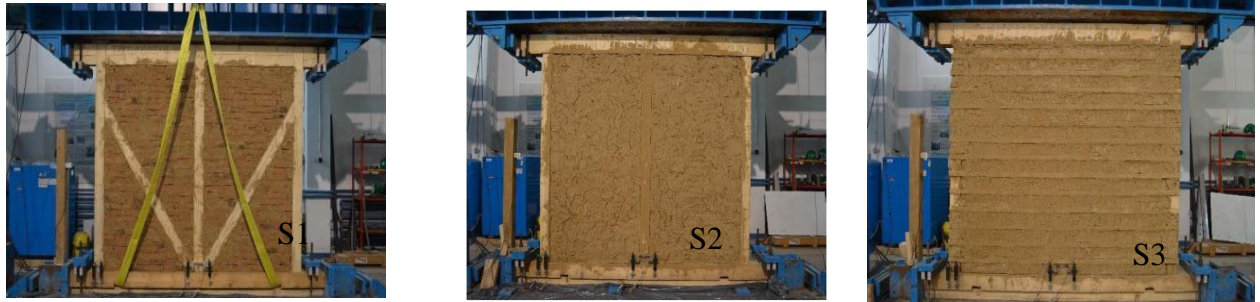


Figura 23 Espécimen realizados fuente Duđu et al. (2018)

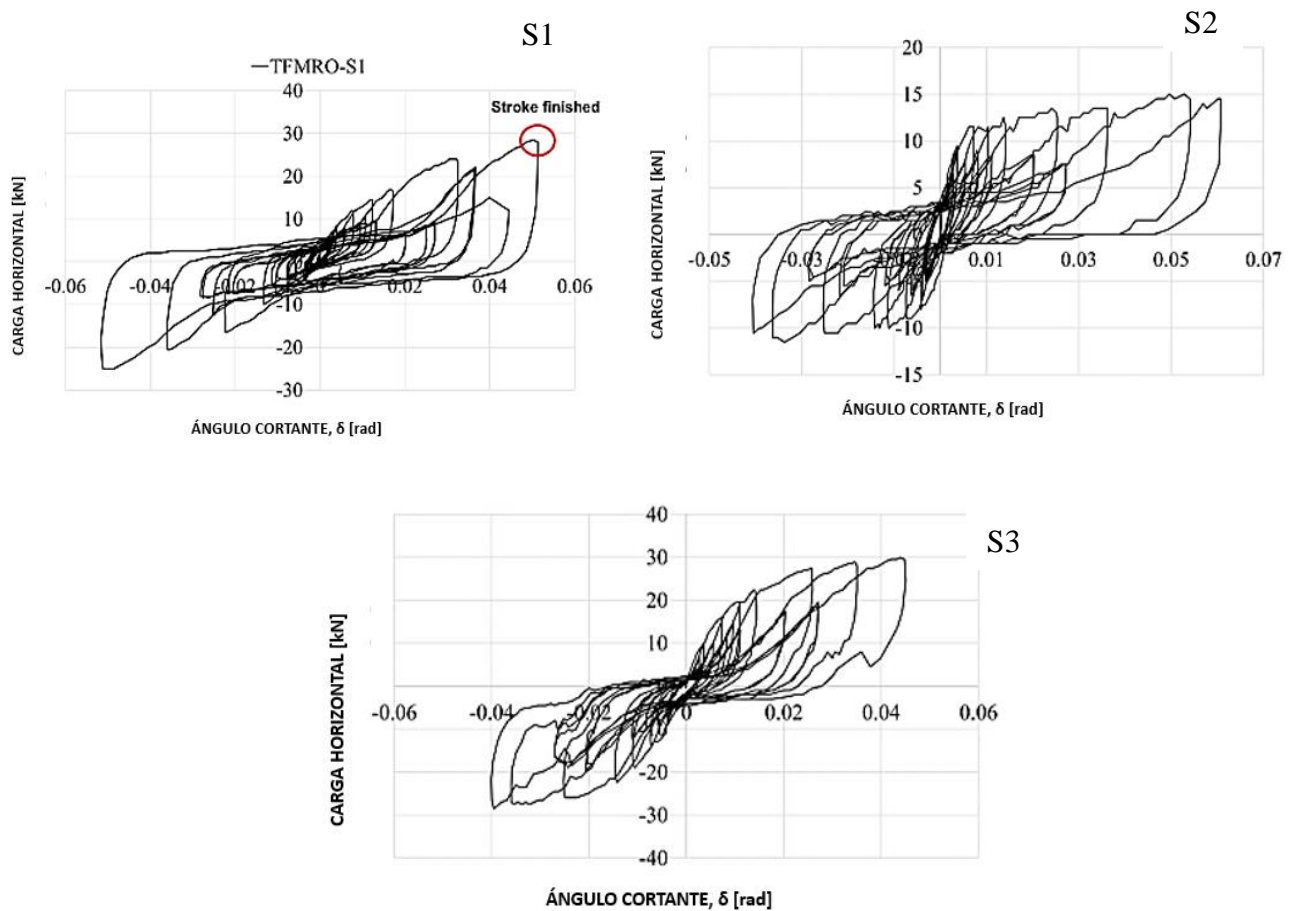


Figura 24 Ciclos de histéresis de los módulos fuente Duđu et al. (2018)

Entre las observaciones importantes el recubrimiento en mampostería sale del plano debido al desplazamiento presentado en la zona superior y el mortero se agrietó a raíz de la construcción del material, debido a la carga axial se limita el levantamiento de la solera inferior. En el muro de suelo y paja se evidencian más las grietas por el comportamiento del material, pero no presenta un comportamiento significativo fuera del plano y se levanta 2 mm en la zona inferior; el muro en

bahareque también se agrietó y presentó separación del material más en la solera superior y levantamiento de hasta 18 mm en la solera inferior.

Dutu et al. (2020), realizaron el proyecto TRAROM en Rumania que busca revivir la arquitectura tradicional de casas con entramados de madera en nuevas viviendas. A través de detalles constructivos innovadores y el uso de materiales locales, se busca mejorar el sistema constructivo y adaptarlo a las necesidades actuales. Se analizó el comportamiento sísmico de los muros según la norma EN12512, los especímenes probados en el proyecto se seleccionaron basándose en una práctica propuesta por los miembros del proyecto. Se eligieron por su similitud con las casas tradicionales, su facilidad de fabricación, la opción de ensamblarlos en el lugar de construcción o en una fábrica y el uso de materiales fácilmente disponibles como se muestran en la Figura 25. La carga utilizada cíclica en el ensayo fue aproximadamente 45 kN, se midieron los desplazamientos por medio de 7 transductores y 3 de rotación.

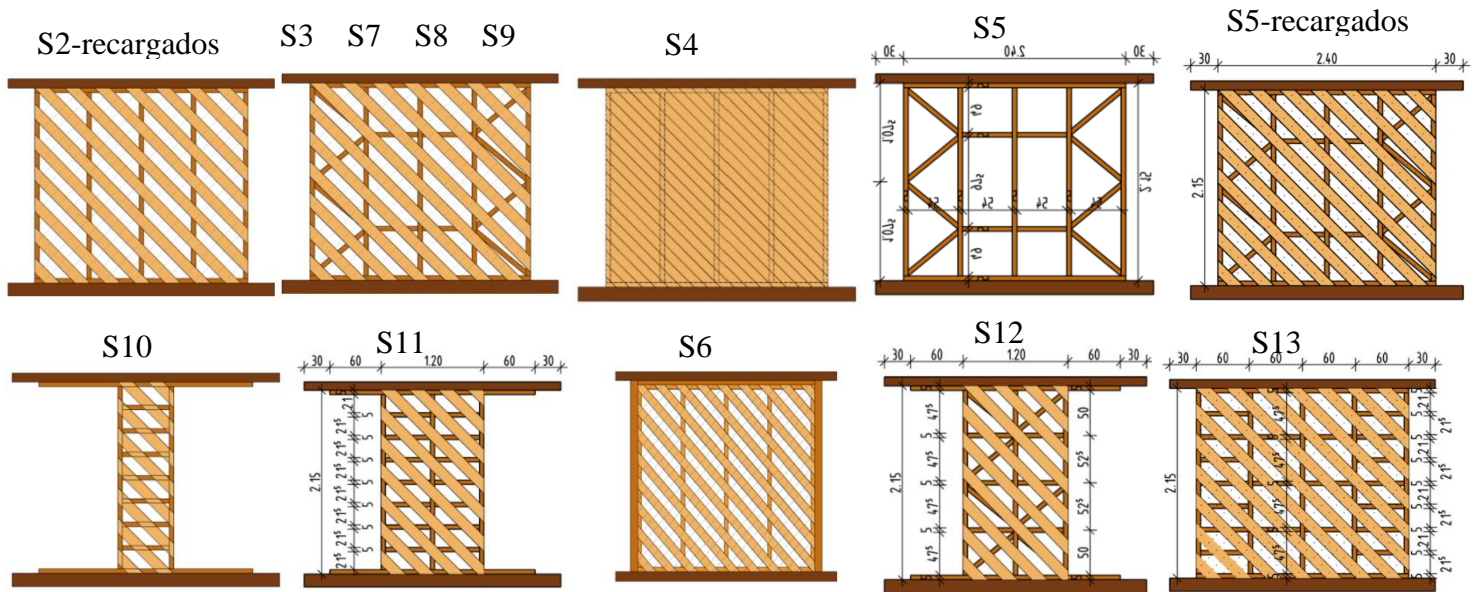


Figura 25 Especímenes realizados fuente Dutu et al. (2020)

Al analizar la resistencia y rigidez de los muros, se encontró que los especímenes 3, 4 y 6 demostraron una capacidad máxima de aproximadamente 80 kN, los especímenes 7 a 9, a pesar de tener una configuración similar a 3, alcanzaron un valor levemente superior a 60 kN. Entre los daños significativos está el daño por corte de clavos atornillados, desprendimiento de los tabloncillos cerca de la diagonal principal del entramado de madera, pandeo de las columnas

secundarias, entre otros. Algunos módulos llegaron hasta 60 mm, otros hasta 80 mm o hasta 114 mm.

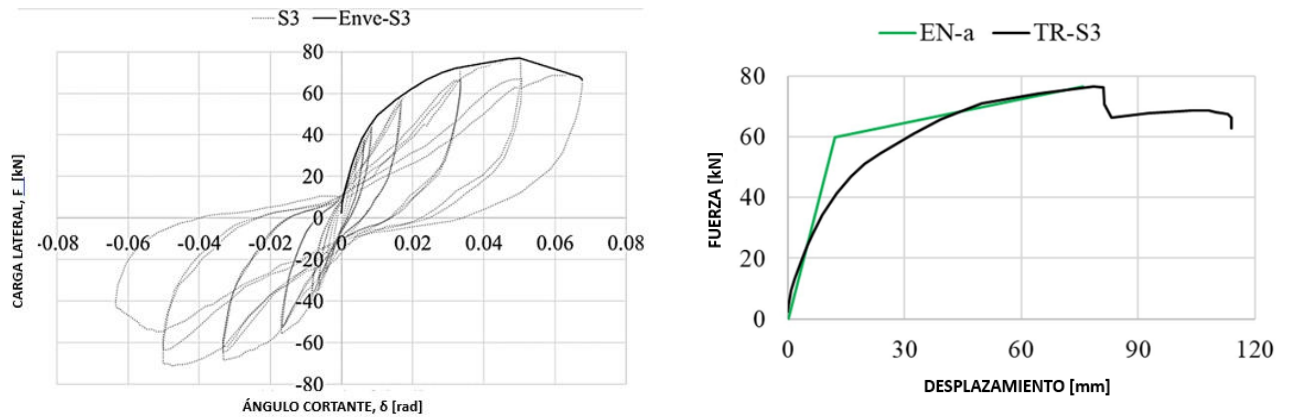


Figura 26 Ciclo de histéresis de espécimen 3, fuente Duřu et al. (2018)

Tabla 8 Resumen de los módulos modificado Dutu et al. (2020)

Módulos	Desplazamiento máximo (mm)	Carga máxima (kN)	Rigidez inicial (kN/mm)
S2	79.3	17.3	1.4
S2-rec	112.4	42.3	3.2
S3	113.9	76.8	5.1
S4	113.7	75.8	4.4
S5	78.4	4.5	0.2
S5-rec	112.8	15	0.7
S6	100.1	75	5.0
S7	62.5	65.5	3.7
S8	61.4	54	5.5
S9	60.3	56	6.4
S10	85.6	8.8	0.8
S11	79.0	28	1.4
S12	84.5	26.5	2.4
S13	32	46.3	6.0

Nota: S5-rec, prototipo S5 recargado

### 3 MATERIALES Y METODOS

En este capítulo se describen los materiales empleados para la construcción de los muros, el protocolo experimental, la disposición de sensores y el proceso constructivo de los elementos finalmente ensayados.

#### 3.1 Materiales

Este trabajo está enfocado en bahareque de tierra compuesto por armazones de madera aserrada y combinaciones con guadua con y sin relleno de suelo adicionado con fibras naturales, a continuación, se describen cada uno de los materiales empleados.

##### 3.1.1 Suelo empleado en el relleno

La muestra estudiada se obtuvo en un lote ubicado en la avenida Cañasgordas con carrera 122, situado en la zona 4E Abanico de Pance del proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali (2005), localizada al sur de la ciudad, se caracteriza por la presencia de una pequeña capa de materiales limosos no mayor a 4m de espesor, un estrato muy duro compuesto de gravas y cantos medianamente compactos, matriz soportados.

Todo el material muestreado corresponde a un limo elástico con arena (MH) de acuerdo con el sistema de clasificación unificada de suelos (SUCS), él mismo se muestreó en estado alterado con muestras de bolsa y saco. A partir de las muestras alteradas se determinaron en el laboratorio las propiedades índices y las características de compactación.

*Tabla 9 Propiedades índices del suelo empleado en el relleno de tierra.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Humedad natural	37.9 %
Gravedad específica	2.71
Porcentaje de finos	80.3 %
Límite Líquido	58.8 %
Límite Plástico	38.5 %
Índice de Plasticidad	20.4 %
Límite de Contracción	35.1 %
Humedad óptima	26.29 %
Peso unitario seco máximo compactado	14.12 kN/m <sup>3</sup>

## Granulometría

El ensayo de granulometría determina la distribución de tamaños de los granos del suelo, con el fin de obtener las proporciones de grava, arena, limos y arcillas, mediante el paso de tamices para tamaños grande y suspensión de partículas en agente flocculante para tamaños pequeños. Las gravas se encuentran a partir del diámetro de 4.75 mm, las arenas desde 0.075 mm a 4.75 mm, los limos desde 0.002 mm hasta 0.075 mm y las arcillas con diámetros inferiores a 0.002 mm.

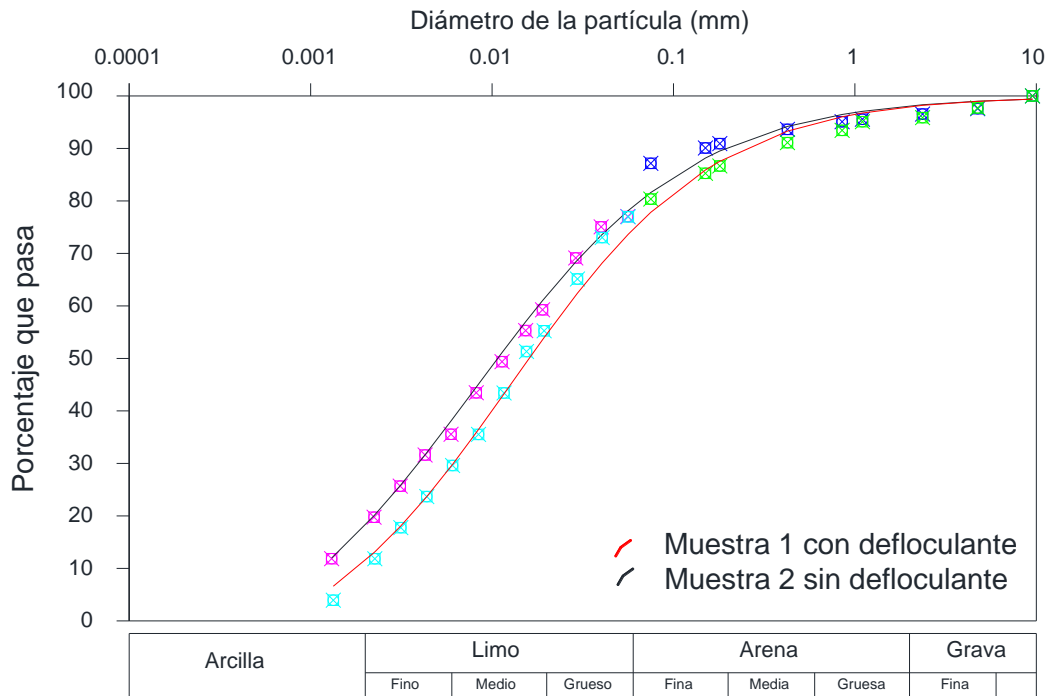


Figura 27 Distribución granulométrica

La Figura 27, ilustra la distribución granulométrica de los suelos, tanto la muestra 1 como la muestra 2 predomina el suelo fino específicamente limos, con un 61.6 % y 64.69 % respectivamente.

El índice de agregación consiste en comparar la proporción de partículas finas como lo es la arcilla y los limos, que están presentes en la muestra antes y después de disgregarlas.

$$IA_{granulometria} = \frac{\text{Masa de partículas finas disgregadas}}{\text{Masa total de partículas finas antes de disgregar}} \times 100$$

Ecuación 1

$$IA_{granulometria} = \frac{160.8}{174.4} \times 100 = 92.2\%$$

$$IA_{hidrometria} = \frac{T_{sin\ dispersante}}{T_{con\ dispersante}}$$

Ecuación 2

$$IA_{hidrometria} = \frac{1440}{480} = 3$$

Para un  $IA_{granulometria}$  grande, indica que las partículas finas estaban unidas a partículas más grandes y para un  $IA_{hidrometria}$  con valores superiores a 1, revela que las partículas presentaron una tendencia a agruparse en flóculos, lo que retrasaba su sedimentación.

### Masa unitaria seca máxima

El ensayo de masa unitaria seca máxima relaciona la densidad seca máxima versus humedad óptima, se desarrolla mediante la compactación de capas con variación de humedad, en un volumen determinado Instituto Nacional de Vías INVIAS (2013).

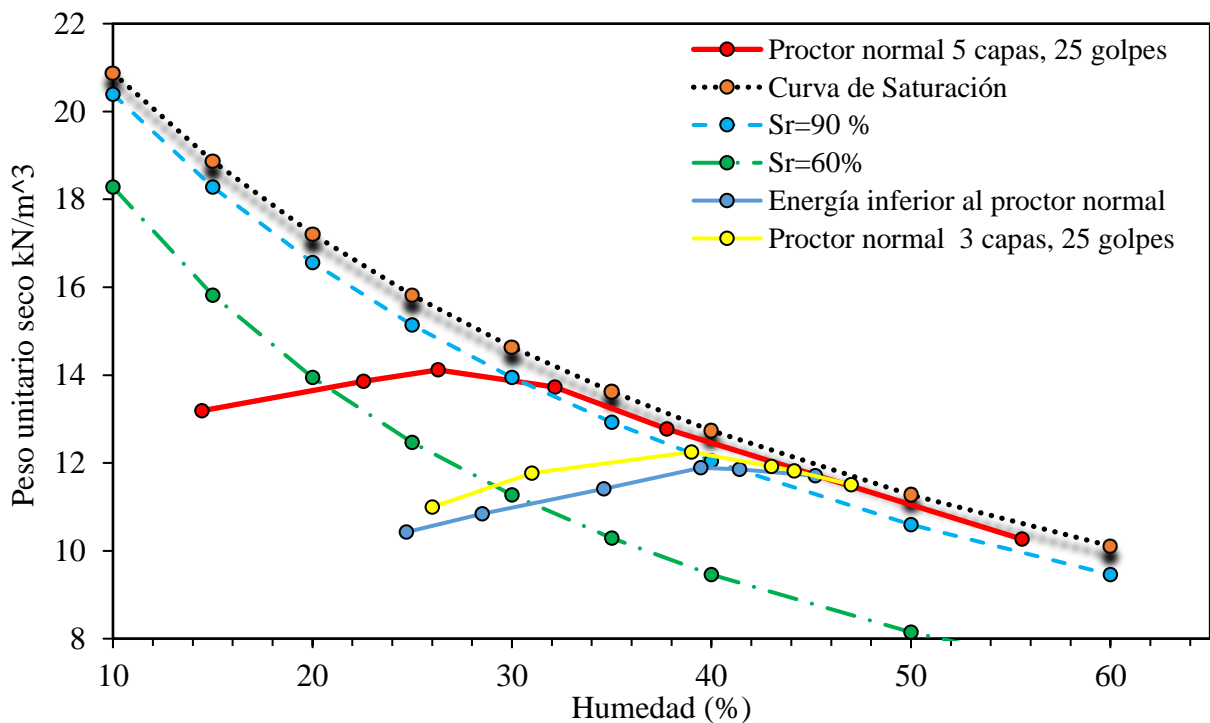


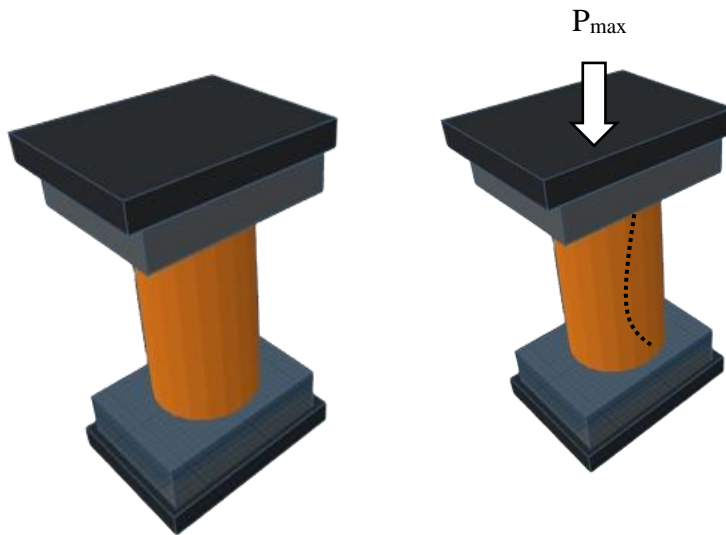
Figura 28 Masa unitaria seca máxima vs humedad

Se llevaron a cabo tres análisis bajo compactación normal, utilizando diferentes métodos de compactación: uno con tres capas compactadas con 12 golpes, uno más con tres capas compactadas con 25 golpes, y finalmente otro con cinco capas compactadas con 25 golpes. El primer método

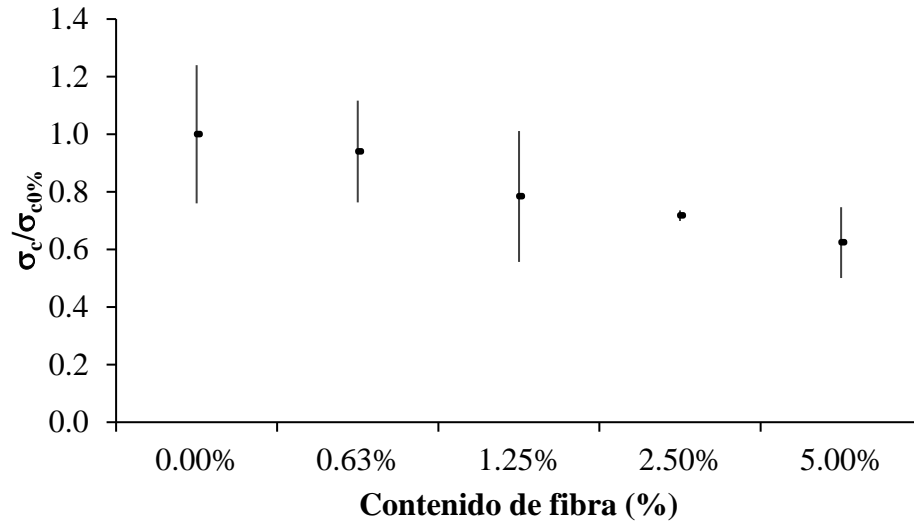
reveló que a medida que se reduce el número de golpes y el espesor de las capas, la densificación del material disminuye. En el segundo método, al aumentar el número de golpes, se observó una distribución de partículas más uniforme, lo que resultó en una reducción del volumen de vacíos. Por último, en el tercer método, al reducir la altura de las capas, se logró una disminución tanto en el número de partículas como en el volumen de vacíos, lo que facilitó una distribución más homogénea del material compactado. En la curva de saturación al aumentar el porcentaje de humedad identifica la humedad óptima para cada una de las muestras.

### ***Ensayos de resistencia a la compresión inconfiada***

Este método permite evaluar la resistencia a la corte no drenada de suelos finos al aplicar una carga axial en un área determinada con una tasa de deformación controlada ASTM-D2166-06 (2007). De esta manera, se obtiene la resistencia a la compresión, como parámetro fundamental para entender la resistencia al corte del suelo empleado como relleno de los muros de bahareque en función del contenido de fibras y otras variables.



*Figura 29 Esquema grafico del ensayo de resistencia a la compresión inconfiada*



*Figura 30 Esfuerzo a compresión normalizado de las muestras con longitud 2.5 cm*

Se realizaron análisis de muestras con variaciones en la humedad de acuerdo con la Tabla 10 a diferentes longitudes de 1.25, 2.5, 5 y 10 cm y porcentajes de fibras. Para longitudes de fibra 2.5 cm los esfuerzos a compresión como se muestra en la Figura 30, no presentaron un aumento significativo, esto puede ser atribuido al porcentaje de fibra adicionado pues su distribución en la probeta puede generar planos de falla. Sin embargo, con el 1.25 % su resistencia a pesar de que disminuye a cargas de compresión, ante cargas de corte generaron un incremento como se muestra en la Figura 33. Cabe resaltar que los resultados mostrados son normalizados con respecto a esfuerzo de compresión con 0 % de adición de fibras.

*Tabla 10 Variación de humedad y fibras*

<b>Porcentajes de humedad (%)</b>	<b>Porcentajes de fibras (%)</b>
<b>50</b>	5 - 2.5 - 1.25 - 0.625 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2
<b>53</b>	5 - 2.5 - 1.25 - 0.625 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2
<b>56</b>	5 - 2.5 - 1.25 - 0.625 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2
<b>60</b>	5 - 2.5 - 1.25 - 0.625 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2

Ahora bien, para longitudes de 5 cm, en la Figura 31 el aumento de fibra presenta un valor promedio más alto, así como los coeficientes de desviación estándar, esto sugiere que las muestras presentaron una mejor distribución del esfuerzo a compresión, y que la adición de estas longitudes con porcentajes hasta el 5% proyectan resistencias hasta 3 veces mayor que el esfuerzo sin fibra.

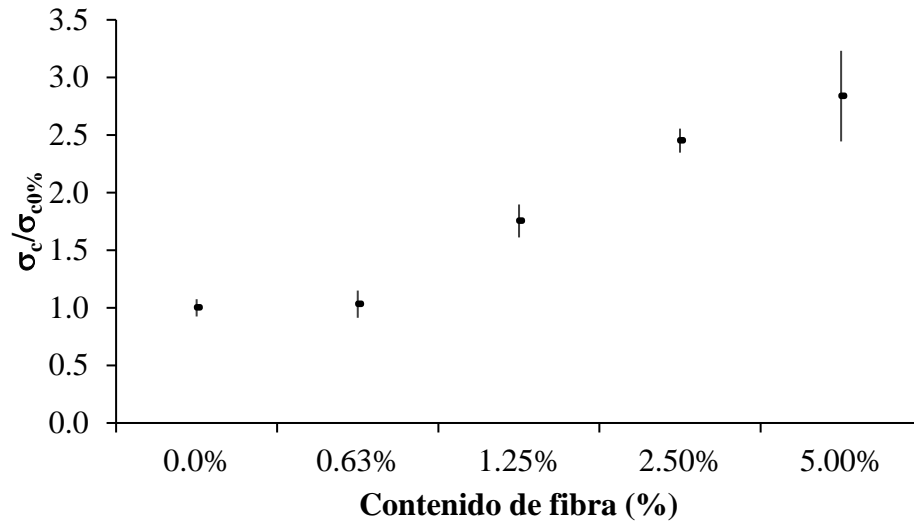


Figura 31 Esfuerzo a compresión normalizada de las muestras con longitud 5 cm

### ***Ensayo de tracción indirecta***

El ensayo de compresión diametral consiste en la aplicación de una carga a lo largo de la muestra la cual fue fabricada con el diámetro siendo dos veces la altura, a una velocidad de 1.2 mm/min; elaboradas con mezclas de suelo variando los porcentajes de humedad, cantidades de fibras y longitudes de fibras naturales. Estas se fabricaron de manera manual siguiendo el proceso de construcción de los muros de bahareque relleno ASTM-C496/C496M-17 (2008).

El esfuerzo a tracción indirecta se calculó por medio de la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{2 * P_{max}}{\pi * D * e}$$

*Ecuación 3*

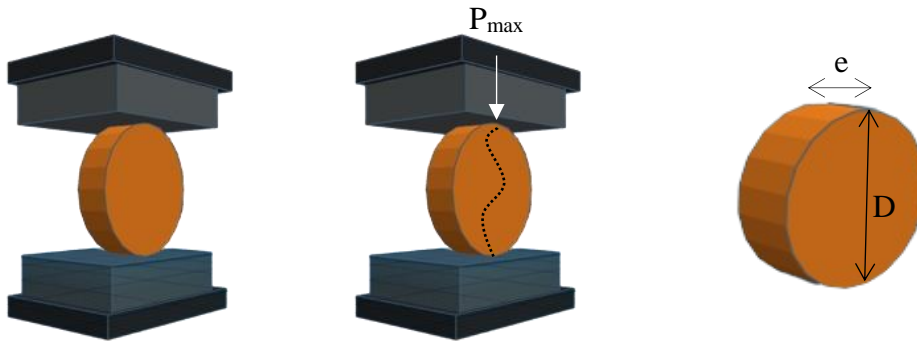


Figura 32 Esquema del ensayo a compresión diametral

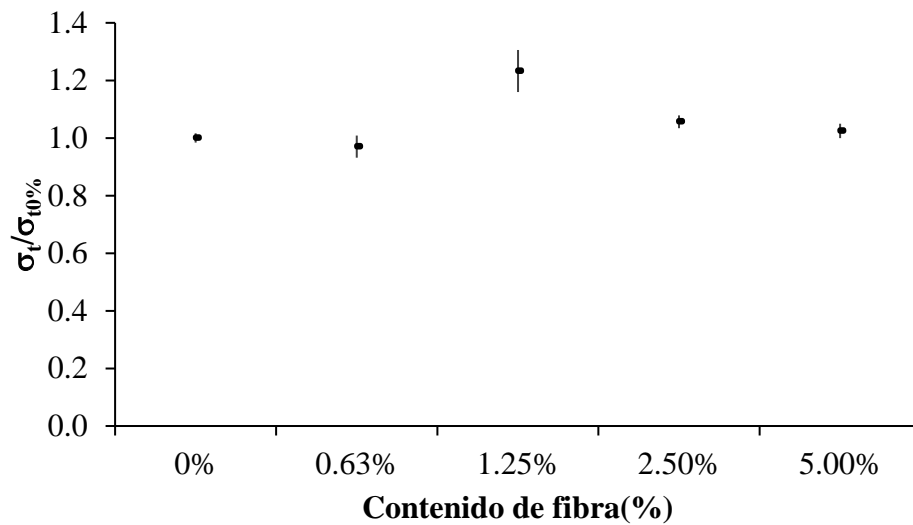


Figura 33 Esfuerzo a tracción normalizada de las muestras con longitud 2.5 cm

Al igual que se realizaron las probetas a compresión, se hicieron las muestras a tracción, con variación de los porcentajes de humedad, longitud de fibra y porcentajes de fibras naturales como se evidencia en la Tabla 11. En comparación a la resistencia a la compresión los valores de resistencia a la tracción fueron más bajos. Para la longitud de 2.5 cm en la Figura 33 la resistencia a la tracción de los porcentajes de 0.63, 2.5 y 5 % de fibra no genero un incremento con respecto al 0 % de fibras, mientras que para el 1.25 % pudo incrementar hasta el 23 %. Por lo tanto, si se analiza con la longitud de 5 cm en la Figura 34, se puede ver que el efecto de una longitud mayor en una probeta de diámetro y altura pequeña no exhibe un aumento por su distribución, por lo que los resultados de 5 cm de longitud no logran ser representativos.

Tabla 11 Variación de porcentajes de humedad y fibras

Porcentajes de humedad (%)	Porcentajes de fibras (%)
50	5 - 2.5 - 1.25 - 0.63 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2
53	5 - 2.5 - 1.25 - 0.63 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2
56	5 - 2.5 - 1.25 - 0.63 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2
60	5 - 2.5 - 1.25 - 0.63 - 1 - 0.5 - 0.25 - 2

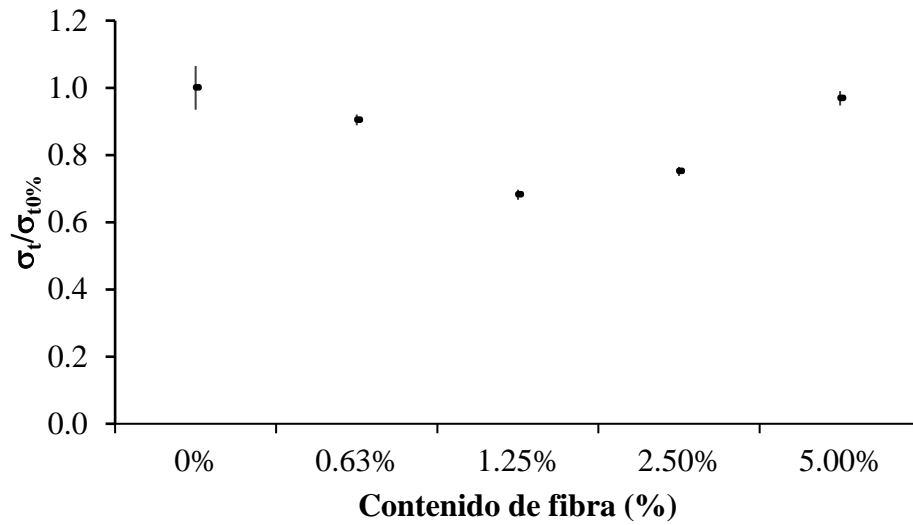
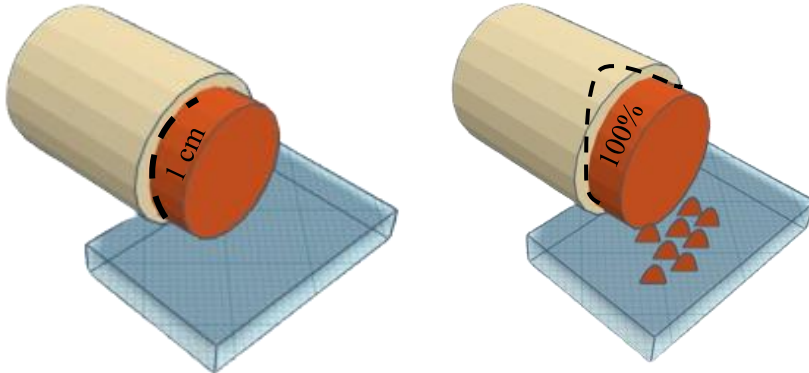


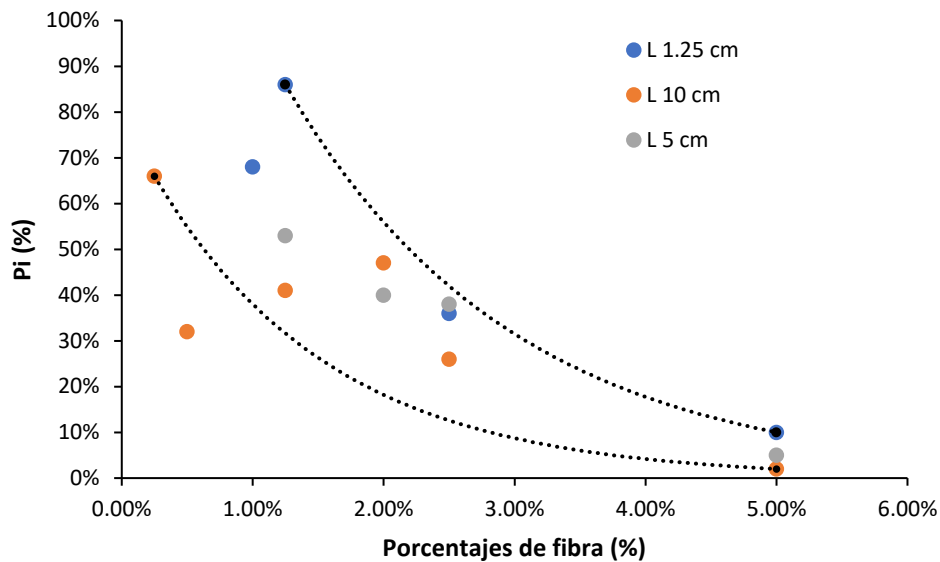
Figura 34 Esfuerzo a tracción normalizada de las muestras con longitud 5 cm

### ***Determinación de pérdida de masa por inmersión***

Este ensayo consistió en la determinación la pérdida de masa por inmersión en el agua de una muestra, se realizó de acuerdo con la norma DNER-ME 256 (1994), en el cual consistía separar aproximadamente 1 cm, introducirla en agua y obtener el porcentaje de pérdida del material, para las muestras realizadas, se variaron los porcentajes de humedad, porcentajes de fibras y longitudes de fibras naturales, compactadas manualmente.



*Figura 35 Esquema del ensayo de pérdida de masa por inmersión*



*Figura 36 Valores de pérdida de masa por inmersión de acuerdo con las longitudes de las fibras con humedad del 50 %*

La mayor parte de las muestras con humedades superiores al límite plástico o cercanas al límite líquido presentaron un índice de pérdida de masa por inmersión ( $P_i$ ), de acuerdo con la Ecuación 4, superior al 100 %, excepto las muestras con un 1 % de contenido de fibras y 60 % de humedad

en longitudes de 1.25 cm, 5 cm y 10 cm. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede evidenciar que con porcentajes de fibra de 5 % se genera menos pérdida de material.

$$P_i = \frac{M_d \times 100}{M_o}$$

*Ecuación 4*

*M<sub>d</sub>* = Masa del suelo seco desprendida del espécimen.

*M<sub>o</sub>* = Masa correspondiente a 1 cm después de la compactación.

### 3.1.2 Fibras naturales usadas

Para el proyecto, se empleó una fibra natural proveniente del Valle del Cauca, específicamente del Municipio Jamundí, en el corregimiento La Estrella. Esta fibra pertenece a la familia Poaceae, género *Andropogon*, especie *Andropogon glomeratus*.



*Figura 37 Planta obtenida de la zona, Andropogon glomeratus*

La humedad de la fibra tuvo un promedio de 29 %. La fibra que se utilizó en los muros se cortó de forma manual siguiendo las técnicas usadas por la comunidad, una vez cortada se revisó la distribución de longitudes como se evidencia en la Figura 38 y Figura 39, los tamaños en la fabricación de los prototipos presentan una variación significativa, que abarca un amplio rango de 2 cm a 20 cm. Sin embargo, la mayoría de las muestras tiende a concentrarse en el intervalo de 5 a 10 cm, reflejando una distribución notable hacia este rango. Además, los dos prototipos muestran diferencias abruptas en sus dimensiones: mientras que el primero se agrupa principalmente entre

2 y 5 cm, el segundo lo hace en el rango de 10 a 20 cm. Estas diferencias demuestran una distribución no homogénea de los tamaños, destacando una agrupación sin un control uniforme en las dimensiones de la fibra de los prototipos.

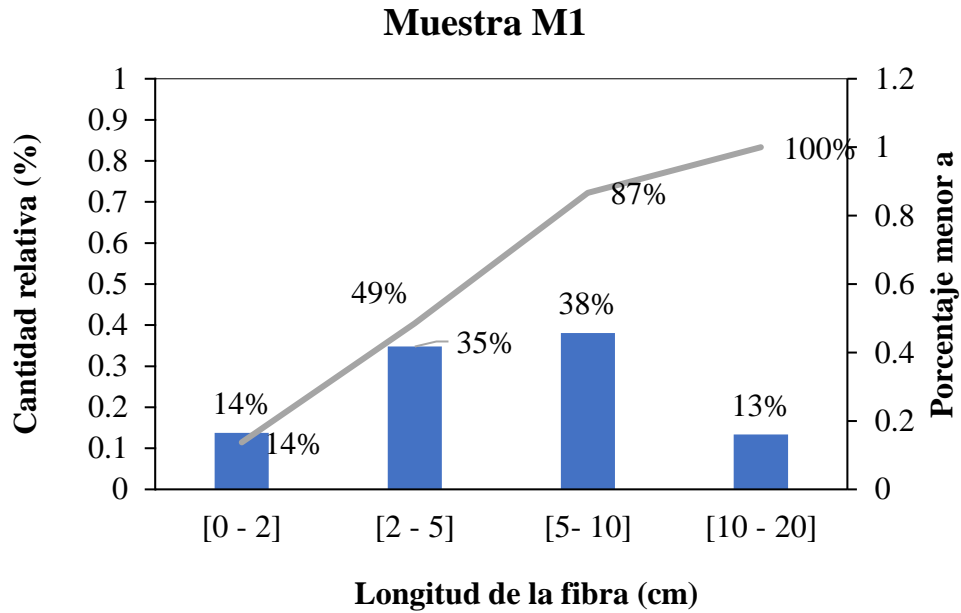


Figura 38 Cantidad de fibras utilizadas para los muros muestra 1

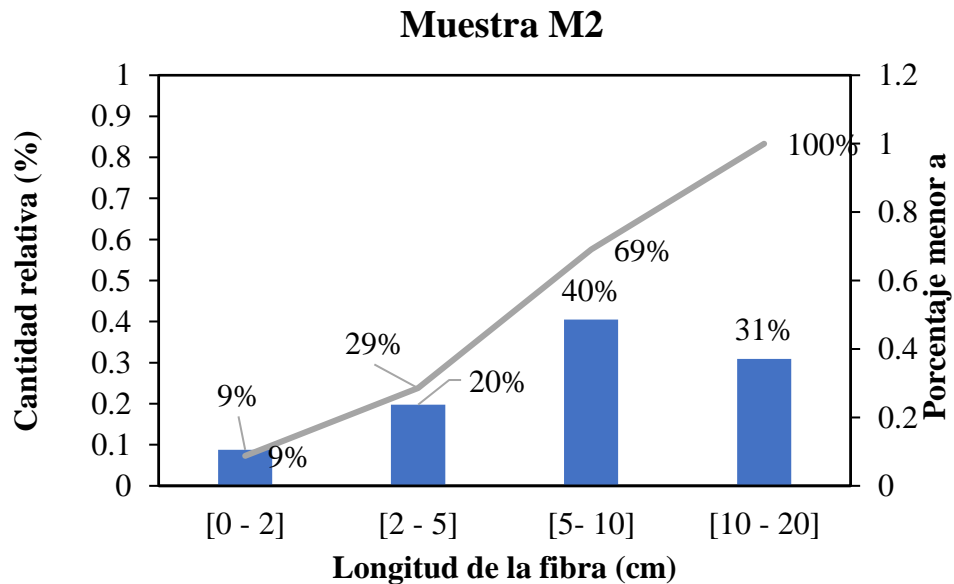


Figura 39 Cantidad de fibras utilizadas para los muros muestra 2

### 3.1.3 Madera y guadua

La guadua utilizada en los modelos se adquirió en el municipio de Jamundí y fue empleada sin recibir ningún tratamiento de inmunización, a pesar de que los diámetros son variables se procuró manejar guaduas con diámetros aproximados de 10 cm.

En la totalidad de los modelos se empleó madera aserrada en la solera superior e inferior. Dos de los muros incorporaron también madera aserrada en los pies y las diagonales como se verá más adelante. La madera fue almacenada inicialmente en el laboratorio antes del ensamblaje de los muros, sin embargo, como se consiguió guadua de la zona algunas presentaron biodeterioro y otras no como se muestra en la Figura 41, la humedad natural promedio fue de 12 % con un coeficiente de variación muestral del 11 %, evidenciando una disminución progresiva de la humedad respecto a las horas transcurridas de acuerdo con la Figura 40.

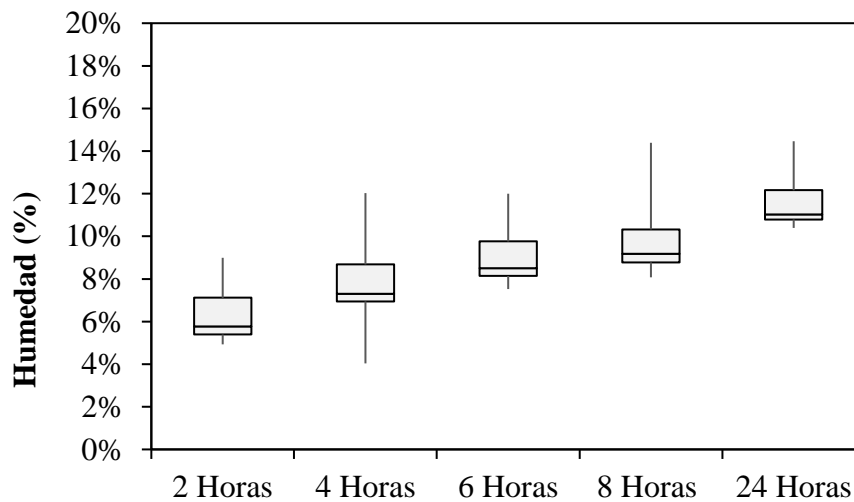


Figura 40 Humedad de la guadua



Figura 41 Guadua con y sin biodeterioro

Se realizaron ensayos a compresión de la guadua, de acuerdo a la norma ISO 22157 (2019), en el cual se tomaron referencias de muestras con biodeterioro y muestras en buen estado, teniendo en cuenta su altura (L) como dos veces el diámetro externo ( $2*DE$ ) o diez veces el espesor de la pared de la guadua ( $10*Ri$ ) como se ilustra en la Figura 42.

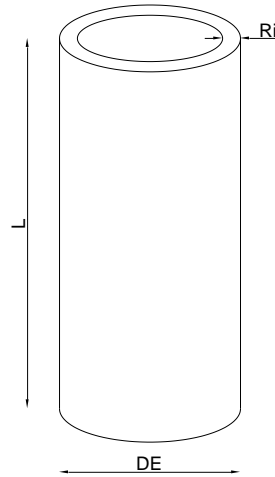


Figura 42 Esquema de guadua

Para el esfuerzo a compresión en la Figura 43 se evidencio que las muestras con  $2*DE$  tiene más resistencia que las probetas que tienen  $10*Ri$ , las muestras de  $2*DE$  presentaron mayor dispersión en los datos que las muestras con deterioro y en cuanto al módulo de elasticidad no presentan un aumento significativo las de  $2*DE$  en comparación a las muestras de  $10*Ri$ , de la misma forma  $10*Ri$  muestra valores mayores por encima de la media.

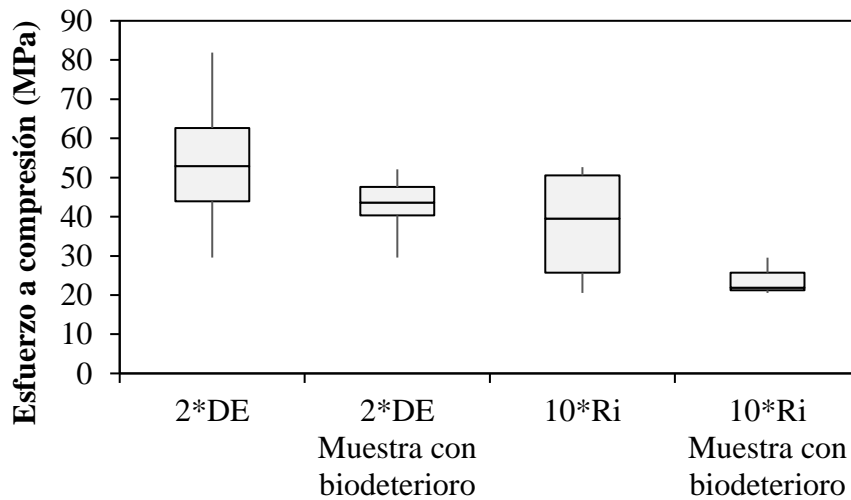


Figura 43 Resistencia a la compresión uniaxial

Las muestras calculadas con 2\*DE presentaron un módulo de elasticidad superior en comparación con las de biodeterioro, lo que indica una mayor capacidad de carga. De manera similar, las muestras de 10\*Ri sin biodeterioro también mostraron un rendimiento comparable. Además, las muestras 2\*DE presentaron una mayor dispersión en los datos obtenidos como se evidencia en la Figura 44.

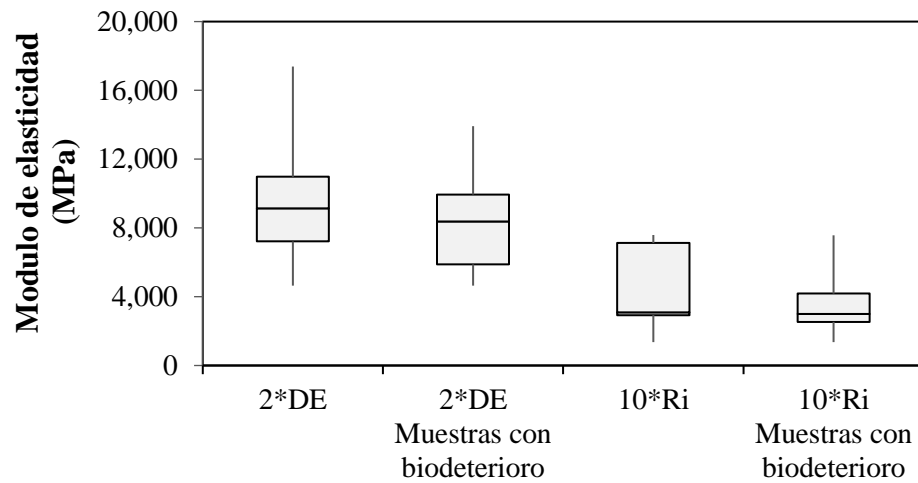


Figura 44 Modulo de elasticidad paralela a la fibra de la guadua

Para densidad de la guadua se obtuvo un promedio de  $508.3 \text{ kg/m}^3$ , con una desviación estándar de  $55.9 \text{ kg/m}^3$  y un coeficiente de variación muestral 11 %.

Finalmente se realizaron ensayos de humedad la madera (pino), donde se evidencio que presenta un aumento de humedad gradualmente, con un promedio a las 24 horas de 13 %, como se observa en la Figura 45. Adicional con un coeficiente de variación muestral de 4 %.

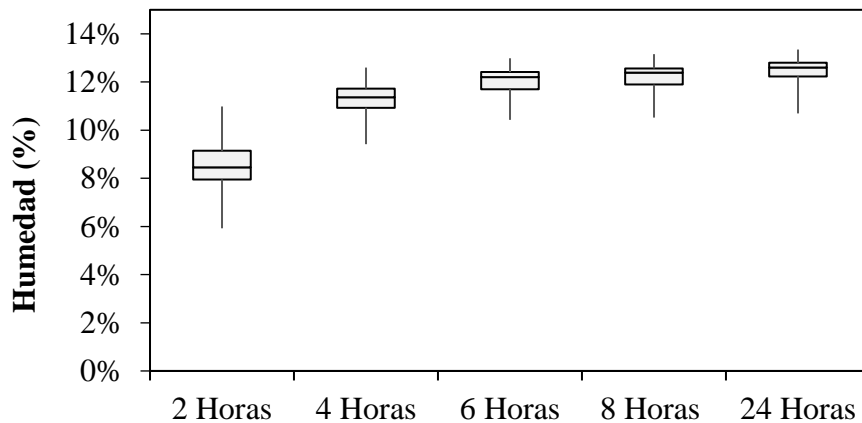


Figura 45 Humedad de la madera

## **4 Campaña experimental**

En el presente capítulo se describirá los hallazgos realizados de los registros de campo y estudios realizados para tomar como base los muros a analizar y sus diferentes composiciones.

### **4.1 Tipología de muros**

En las visitas realizadas, se llevaron a cabo diversas acciones para comprender las características y técnicas de construcción empleadas en la comunidad de la vereda La Estrella del Corregimiento de San Vicente, ubicada en el municipio de Jamundí.

Durante la inspección de campo, se fabricaron réplicas en miniatura de muretes, proporcionando así una representación de las construcciones existentes en la zona. La obtención de muestras de casas preexistentes se convirtió en un recurso valioso que permitió un análisis detenido de los materiales utilizados, las técnicas de construcción y la calidad de los acabados. Este proceso facilitó una evaluación detallada del suelo, las fibras naturales utilizadas y la proporción del agua en las construcciones.

Se identifican diferentes estilos de construcción, bahareque relleno y latas, guadua con esterilla de guadua, bahareque relleno con madera y latas, se observó una casa que datan de hace 50 años, como una construida hace aproximadamente 2 años, que sirvió como modelo para la construcción de los prototipos del presente proyecto. Un muro se encontraba unido por dos paneles, conformados de madera tipo pino para los pies derechos, izquierdos, diagonales, centrales y soleras superiores e inferiores. El relleno era suelo mezclado con fibras y el pañete presentaba una mayor cantidad de fibra. En las áreas donde posiblemente la mezcla se separó de la madera, utilizaron poliuretano expandido para sellar los espacios.

En las imágenes que se presentan a continuación, se pueden observar las diversas casas de la zona.



*Figura 46 Vivienda típica con madera aserrada y latas de guadua.*



*Figura 47 Casa construida de guadua y esterilla de guadua.*



*Figura 48 Vivienda en bareque relleno y latas*



*Figura 49 Vivienda en bahareque relleno con madera y latas*

De acuerdo a los diferentes estudios realizados, partiendo de la Tipificación de los sistemas constructivos patrimoniales de “Bahareque” en el paisaje cultural cafetero de Colombia por Muñoz Robledo (2010), donde describen algunas dimensiones, especificaciones y materiales. A su vez con Herrera (2008), que analizó paneles sin recubrimiento, encementado y con tiras de guadua, Huang et al. (2018) ,muros de madera con relleno (CTFM) y módulos encementados de Silva & López (2000). Para todos prototipos a estudiar se tomó una base promedio de 2.2 m y de alto 2.2 m, el cual unía dos paneles de 1.1 m, solera superior e inferior en madera con sección transversal de 10 cm x 5 cm (3.94” x 1.97”)

Con base en las observaciones realizadas en el terreno y en la información recopilada de los artículos, se diseñaron y construyeron cinco prototipos, cada uno con diferentes características, pero a todos se les ubicó una viga de sobrecarga en madera y dos vigas metálicas tipo W, para un peso total aproximado entre 1.9 a 2 kN con el fin de representar la carga de la cubierta sobre el muro.

Durante las visitas realizadas se observó que las casas estaban construidas sobre una base de rocas. Para representar este efecto se decidió anclar la solera inferior a una viga de concreto utilizando dos tornillos y una platina como refuerzo. Además, se perforó la solera en un panel y se aseguró con un tornillo, arandela y neopreno para evitar cualquier presión indebida sobre la misma; cabe resaltar que en este proyecto no se estudió los efectos de la cimentación.

La Tabla 12 relaciona la nomenclatura de los módulos que se usaran a lo largo del documento.

*Tabla 12 Abreviaturas de los prototipos*

GS	Guadua skeleton	Esqueleto de guadua
TSH	Timber skeleton horizontal strips	Esqueleto de madera con tiras de guadua horizontales
GSH	Guadua skeleton horizontal strips	Esqueleto de guadua con tiras de guadua horizontales
GSHS	Guadua skeleton with horizontal strips and filling with soil mixture	Esqueleto de guadua con tiras de guadua horizontales y relleno
TSHS	Timber skeleton with horizontal strips and filling with soil mixture	Esqueleto de madera con tiras de guadua horizontales y relleno.

El espécimen de la Figura 50 se le llamara *Guadua skeleton (GS)* La configuración geométrica está dada por dos paneles que comparten el pie central, el cual mide 2.2 m de ancho por 2.2 de alto, pies y diagonales en guadua de 10 cm aproximadamente, solera superior e inferior en madera aserrada con espesor de 5 cm y la viga de sobre carga, este prototipo no incluye latas de guadua ni relleno.

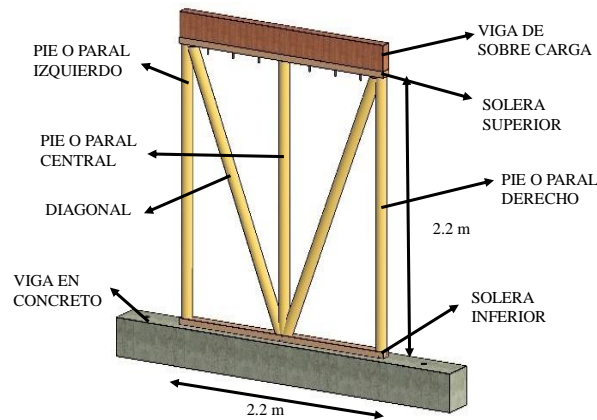


Figura 50 Prototipo GS, muro con pies de guadua sin latas ni relleno.

Al modelo de la Figura 51, se le llamara *Timber skeleton horizontal strips (TSH)* está compuesto por pies en madera aserrada con dimensiones aproximadamente de 10 cm x 10 cm, con latas ubicadas horizontalmente, fabricadas de guadua instaladas cada 9 a 10 cm de luz entre ellas, los anchos de latas fueron en promedio de 4 a 5 cm y el espesor de ellas vario entre 1 a 2 cm. Solera superior e inferior en madera aserrada con espesor de 5 cm por 10 cm de ancho, la viga de sobre carga y no incluye relleno.

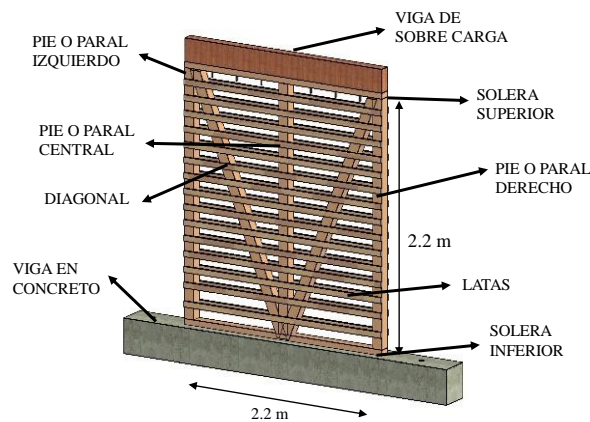


Figura 51 Prototipo TSH, muro con pies en madera aserrada con latas, sin relleno

El muro de la Figura 52, está compuesto por *guadua skeleton horizontal strips (GSH)*, tres pies y diagonales en guadua de aproximadamente 10 cm de diámetro, latas en guadua instaladas horizontalmente, instaladas cada 9 a 10 cm de luz entre ellas, los anchos de latas fueron en promedio de 4 a 5 cm y el espesor de ellas vario entre 1 a 2 cm. Solera superior e inferior en madera de espesor 5 cm. Solera superior e inferior en madera aserrada con espesor de 5 cm por 10 cm de ancho, la viga de sobre carga y no incluye relleno.

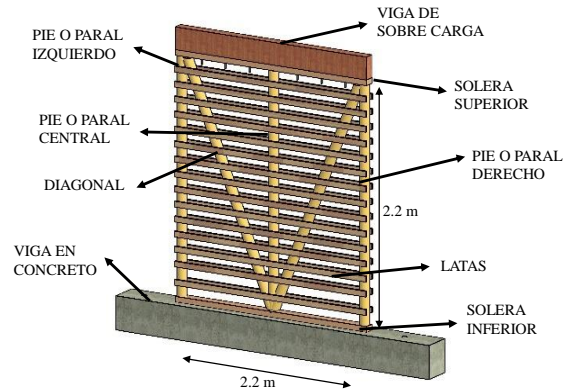


Figura 52 Prototipo GSH, muro con pies en guadua con latas, sin relleno

Al prototipo de la Figura 53, se llamará *Guadua skeleton with horizontal strips and filling with soil mixture (GSHS)* estuvo dada por tres pies y diagonales en guadua de aproximadamente 10 cm de diámetro, con latas en guadua instaladas horizontalmente cada 9 a 10 cm de luz entre ellas, los anchos de latas fueron en promedio de 4 a 5 cm y el espesor de ellas vario entre 1 a 2 cm. Solera superior e inferior en madera aserrada con espesor de 5 cm por 10 cm de ancho, la viga de sobre carga y con relleno de suelo.

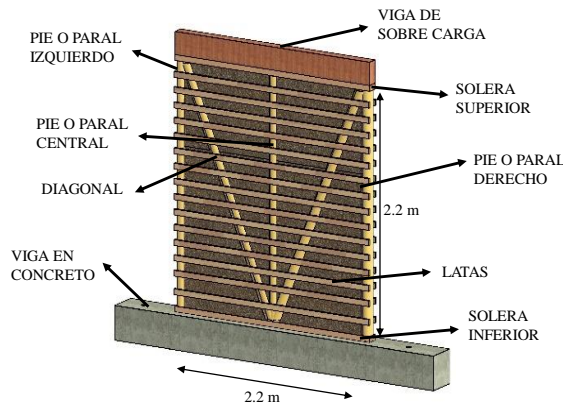


Figura 53 Prototipo GSHS con pies en guadua latas y relleno

Al modelo de Figura 54, se le llamará *Timber skeleton with horizontal strips and filling with soil mixture (TSHS)* está compuesto por pies en madera aserrada con dimensiones aproximadamente de 10 cm x 10 cm con 5 cm de espesor, con latas ubicadas instaladas horizontalmente cada 9 a 10 cm de luz entre ellas, los anchos de latas fueron en promedio de 4 a 5 cm y el espesor de ellas vario entre 1 a 2 cm, con relleno de suelo.

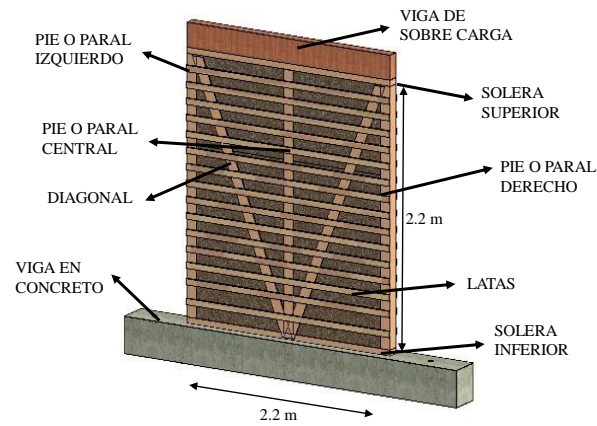


Figura 54 Prototipo TSHS con pies en madera aserrada, latas de guadua y relleno

## 4.2 Conexiones

Siguiendo los lineamientos que utilizan en campo, se extrapolo la fabricación al laboratorio, toda la guadua y madera se cortó previamente y se armó antes de llevar al laboratorio, las uniones en la parte inferior y superior de las diagonales a los paraleles se realizó con corte pico de flauta.

Para las conexiones las puntillas se ubicaron en las guaduas a 2 cm de la base inferior o superior (Figura 55a-c-d), con puntilla de acero de 3", clavadas con el mismo ángulo de tal forma que no difieran en los prototipos (Figura 55b), en el pie central de la guadua se clavaron 3 und en cada cara y 2 und en cada cara para las diagonales y 4 und para los pies derechos e izquierdos, 1 und en cada extremo.



*Figura 55 Detalle del proceso constructivo de las conexiones de las puntillas*

En el caso de la madera aserrada en la solera inferior y superior se clavaron puntillas de 4 ” para garantizar la longitud de agarre de las soleras y los parales, fueron 4 und en cada paral (Figura 56h) y 2 und para las diagonales que une con los parales (Figura 56d).

Para la instalación de las latas se realizaron dejando espacios entre ellas de alrededor de 9 a 11 cm (Figura 56a), estas fueron clavadas con puntilla en todos los parales y diagonales con puntilla de 2 ½” (Figura 56f).



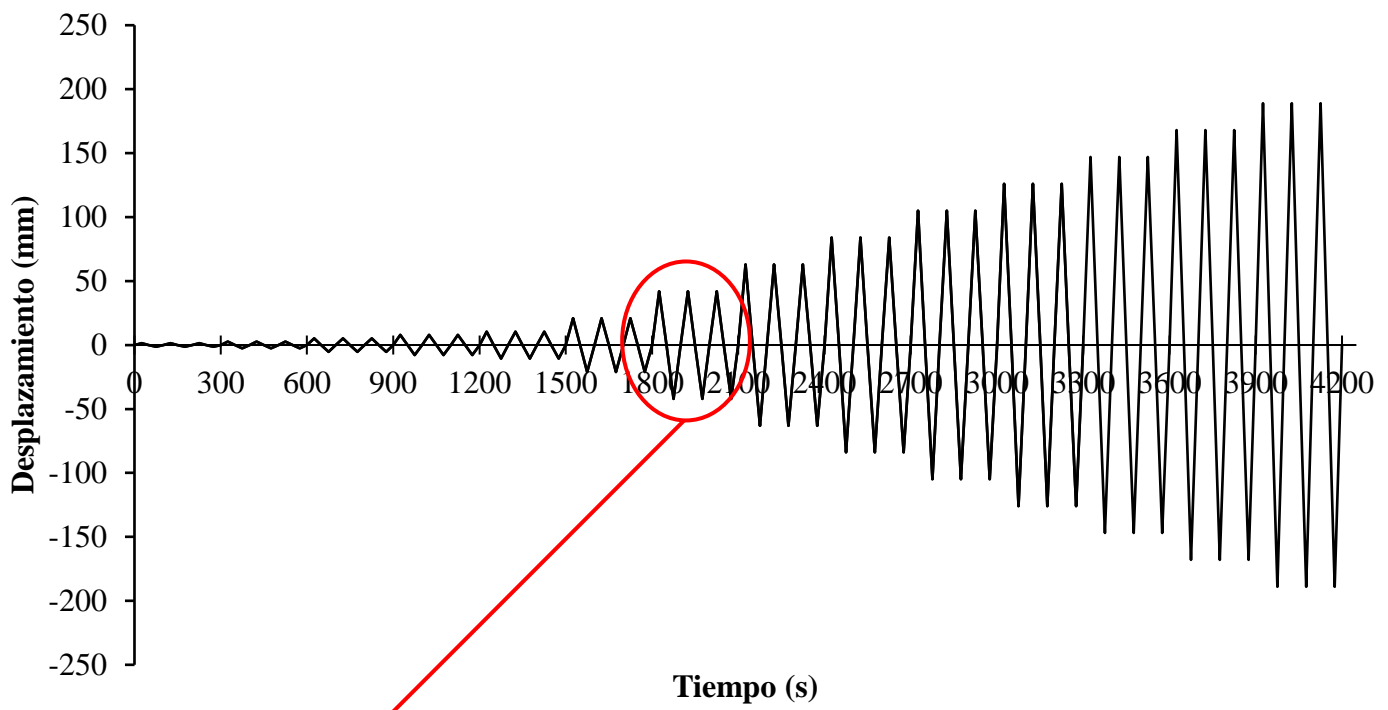
*Figura 56 Detalle constructivo de la conexión de puntillas en madera*

### 4.3 Protocolo de carga

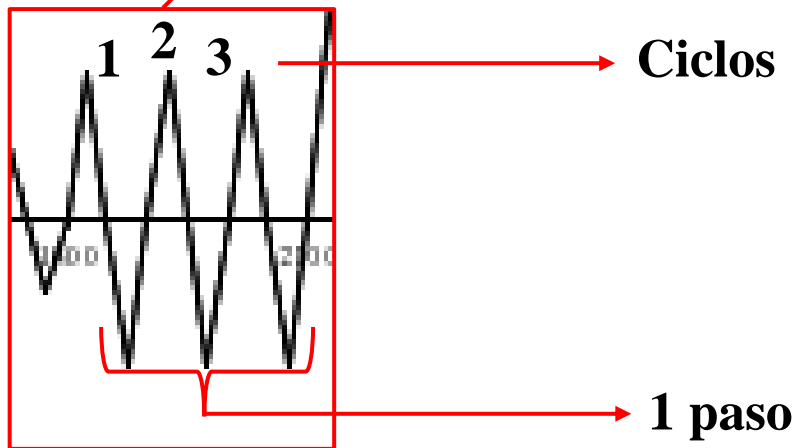
Para el protocolo de carga se realizó tomando como referencia el procedimiento de la ASTM E2126-11 (2012), método de prueba B tal como se muestra en Figura 57 procedimiento de carga controlado por desplazamiento que implica ciclos de desplazamiento agrupados en fases a niveles de desplazamiento crecientes, una frecuencia de  $f= 0.01$  Hz, un periodo de  $T=100$  s y una amplitud máxima de 42mm, se calcula el protocolo asumiendo una deriva máxima objetivo 6%, esta se obtuvo con base a la bibliografía descrita anteriormente, donde utilizaron marcos de madera y guadua similar al del presente documento.

*Tabla 13 Desplazamientos vs deriva para el protocolo de carga*

<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Deriva (%)</b>
1,25	0,0625%
2,5	0,1250%
5	0,2500%
7,5	0,3750%
10	0,5000%
20	1%
40	2%
60	3%
80	4%
100	5%
120	6%
140	7%
160	8%
180	9%
200	10%



*Figura 57 Protocolo de carga*



#### 4.4 Ubicación de sensores

El actuador que se utilizó para los modelos fue de 250 kN y los sensores que se utilizaron fueron LVDT con recorridos de más o menos 25 mm, 50 mm, 100 mm y 150 mm, con frecuencia de 10 Hz, los sensores de 50 mm se ubicaron en los pies derechos e izquierdos, central en la zona inferior de forma vertical (Figura 58 S1, S4, S5), los sensores de 25 mm de forma vertical en la solera inferior (Figura 58 S3, S2), en el pie central a los 1.1 m se ubicó otro sensor con recorrido de 100 mm (Figura 58 S6) y por último a los 2.1 m de altura se ubicó el sensor con mayor desplazamiento de 150 mm (Figura 58 S7).

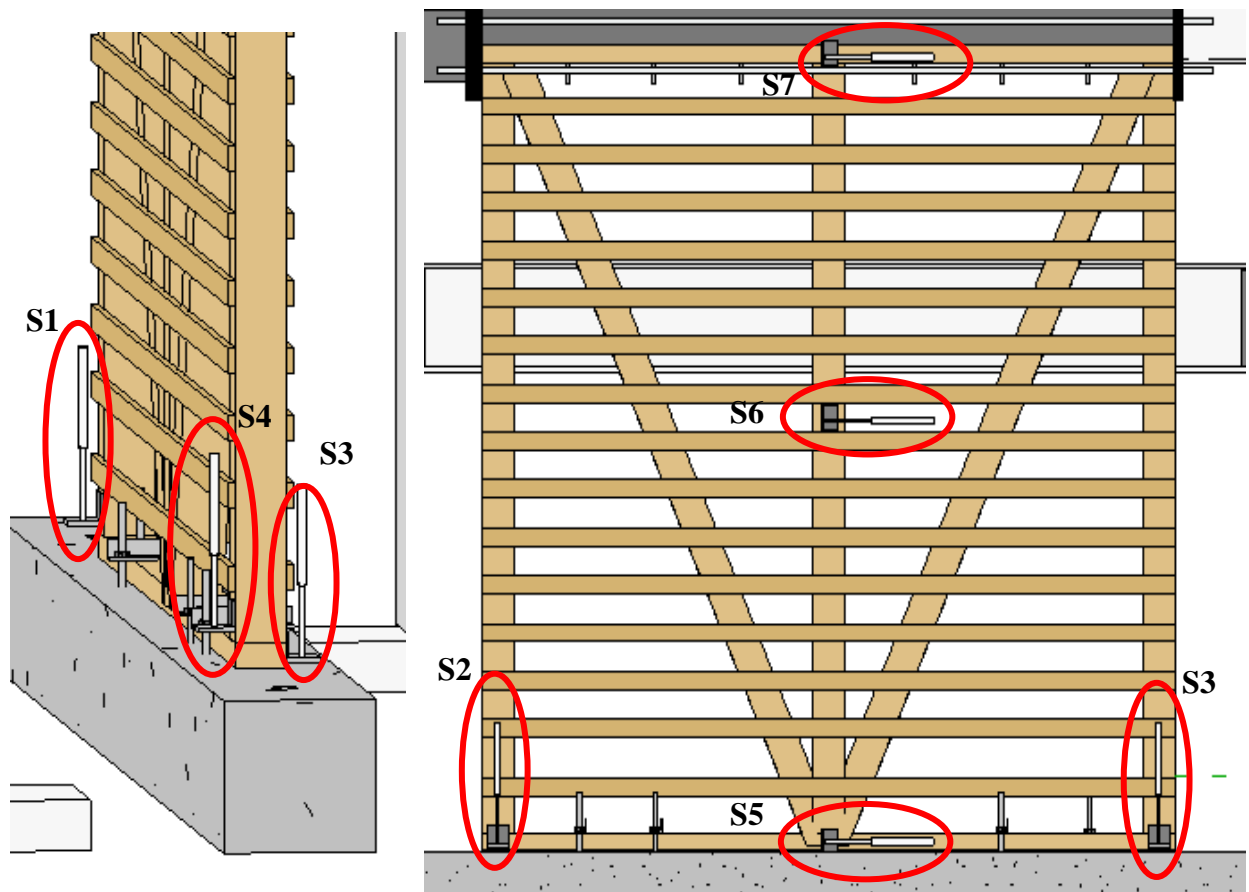
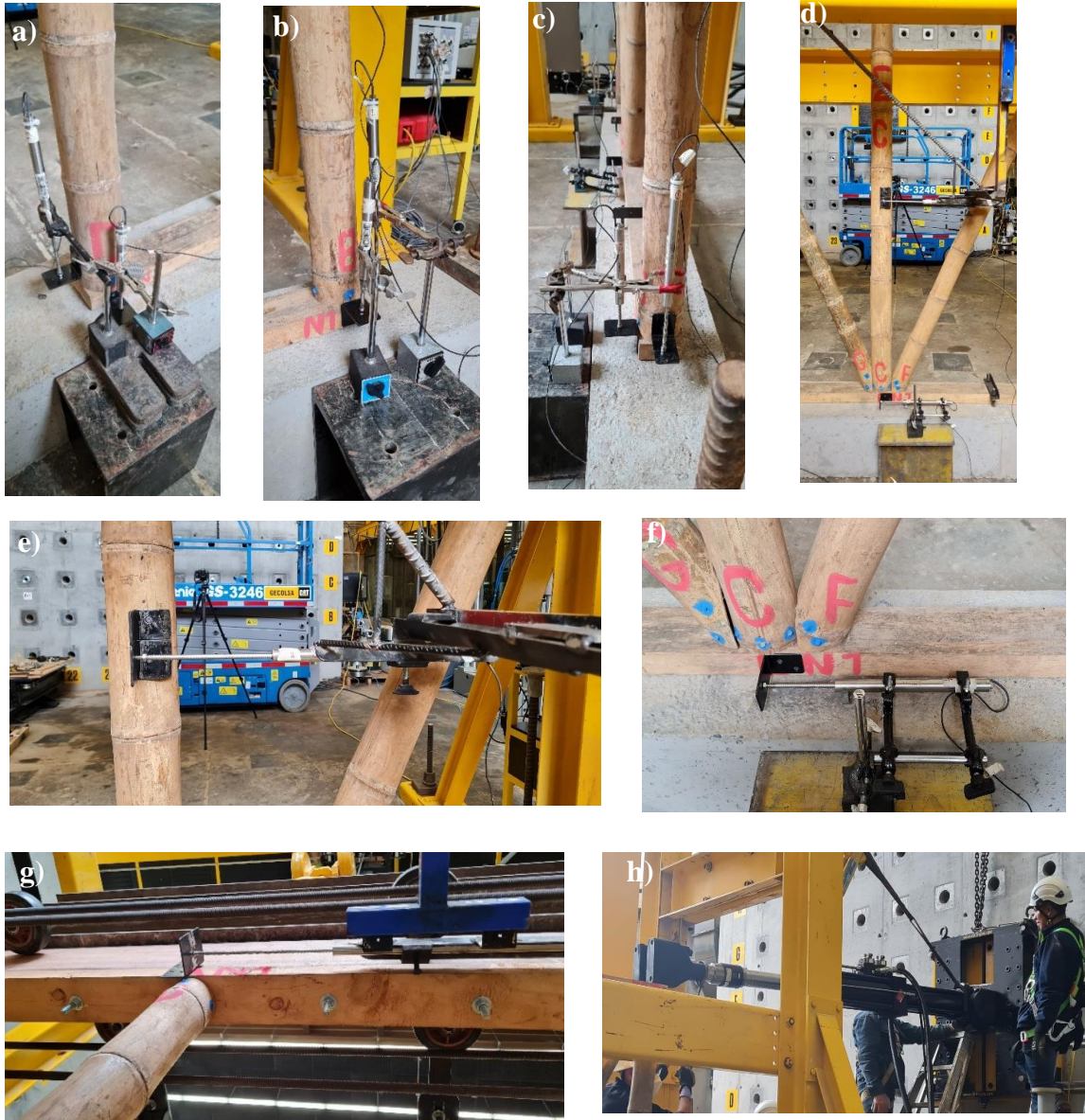


Figura 58 Ubicación de los sensores



*Figura 59 Ubicación de los LVDT'S y actuador en los muros*

Con la lectura de los sensores se tomaron los desplazamientos en cada punto, cabe resaltar que los sensores se retiraron en cierto momento del ensayo con el fin de no llegar al desplazamiento máximo del mismo. Para el muro *GS*, el desplazamiento máximo que se registró en la solera superior fue de 84.9 mm y -84.5 mm como se puede ver en la Figura 60.

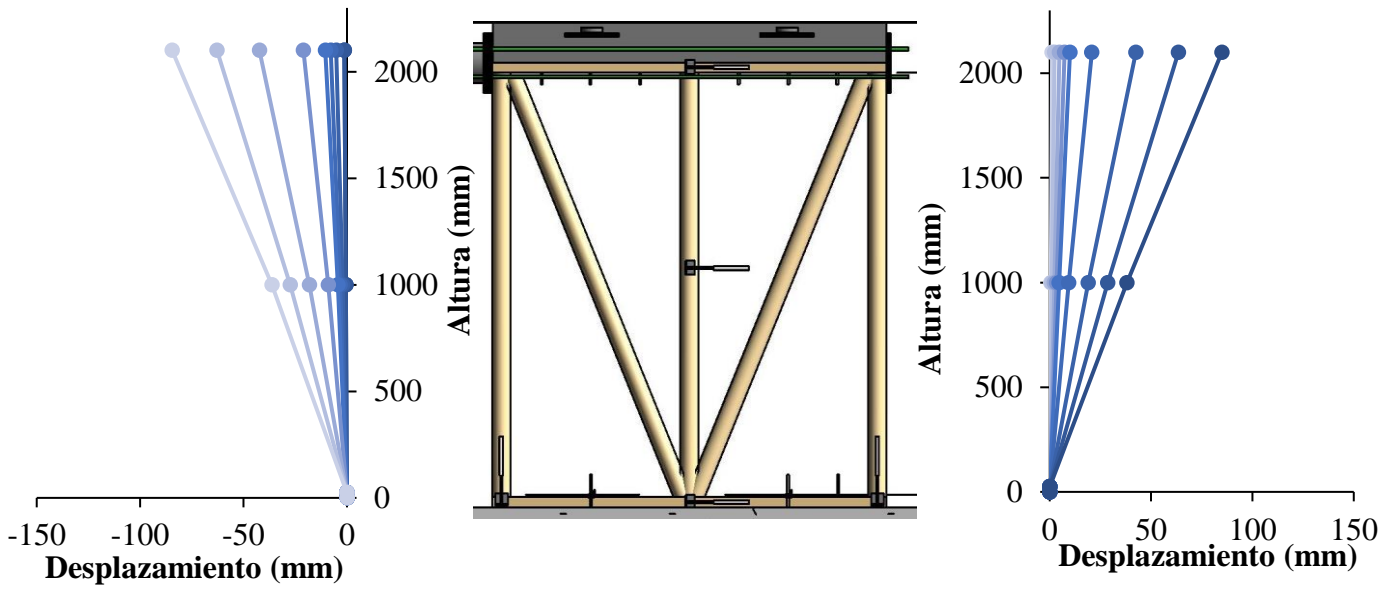


Figura 60 Perfil de desplazamientos laterales muro GS

Para el espécimen TSH, se obtuvo un desplazamiento de 106.2 mm y -103.3 mm, como se puede ver en la Figura 61

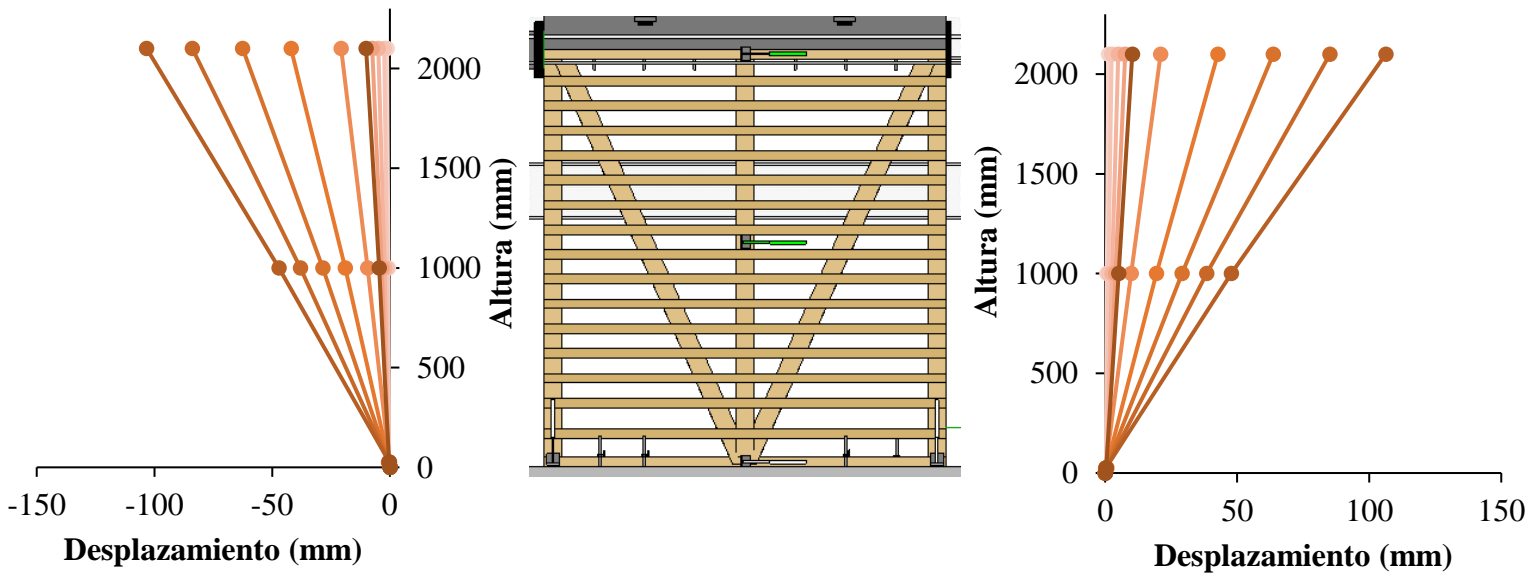


Figura 61 Perfil de desplazamiento lateral del prototipo TSH

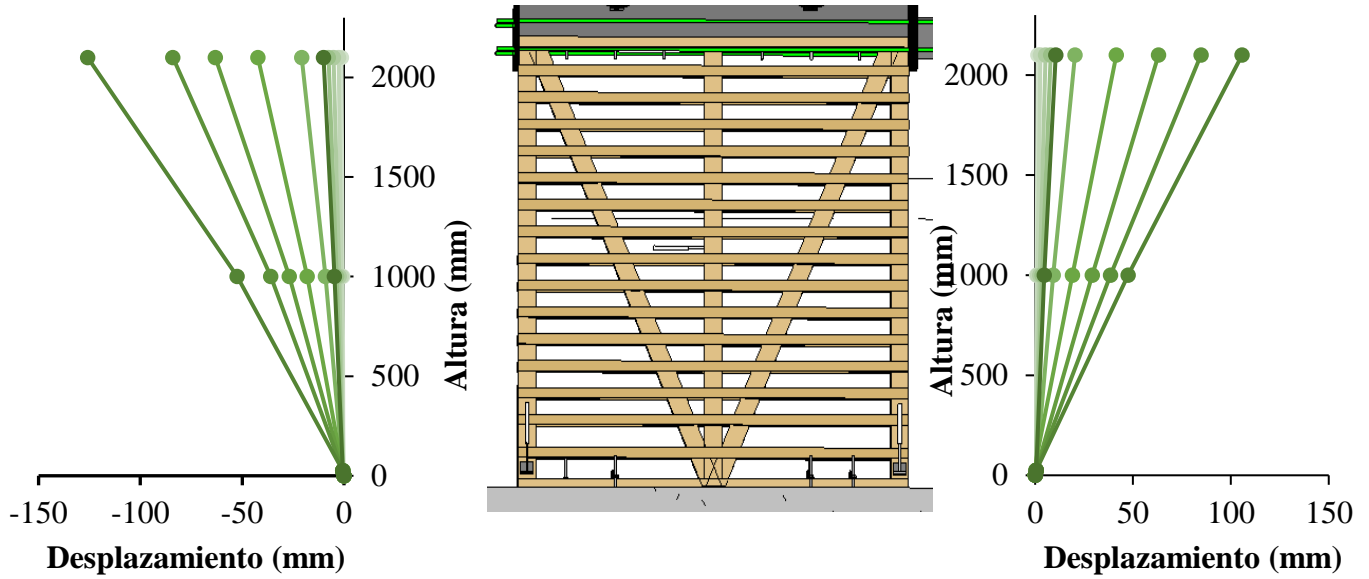


Figura 62 Perfil de desplazamiento lateral del prototipo GSH

En el muro *GSH* el desplazamiento que se presentó fue de -125.9 mm y 105.7 mm como se observa en la Figura 62.

El prototipo *GSHS* el desplazamiento en la solera superior con el sensor antes de retirarlo fue de -103.9 mm y 102.9 mm como se observa en la Figura 63.

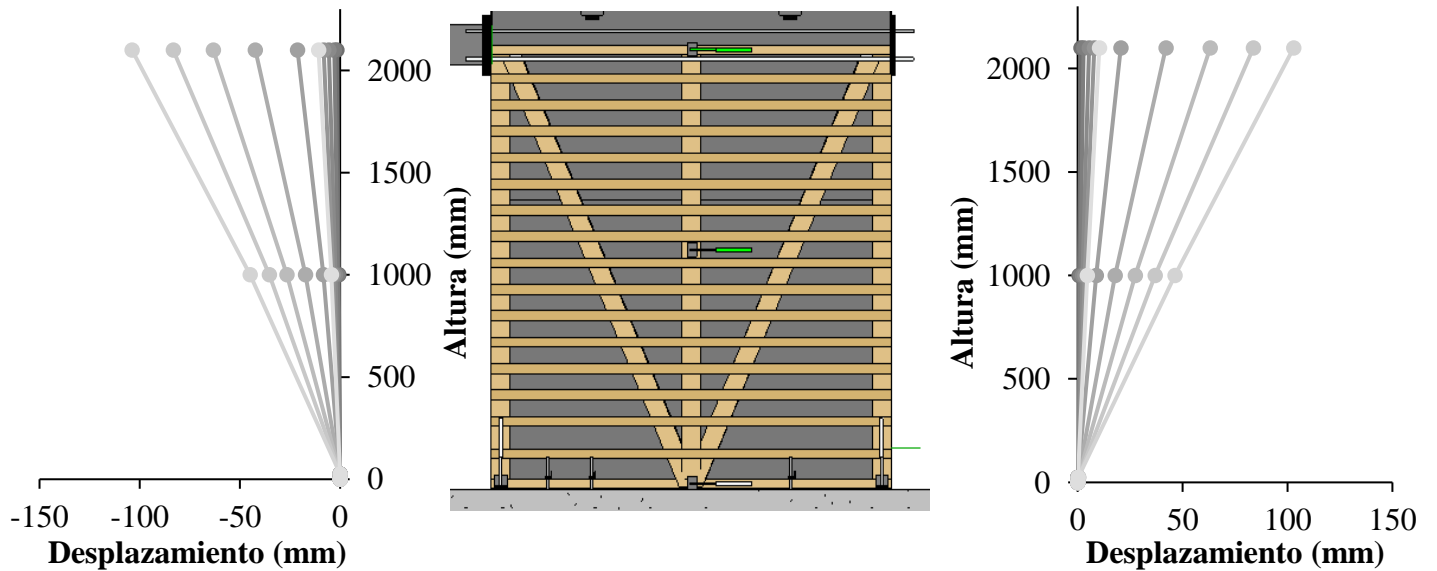


Figura 63 Perfil de desplazamiento lateral del muro GSHS

Para el modelo *TSHS* de la Figura 64 en la solera superior antes de retirar el sensor registro un desplazamiento de 127.8 mm y -125.3 mm, pero a la altura de 1.1 m en el pie central registro 73.1 mm y -71.8 mm.

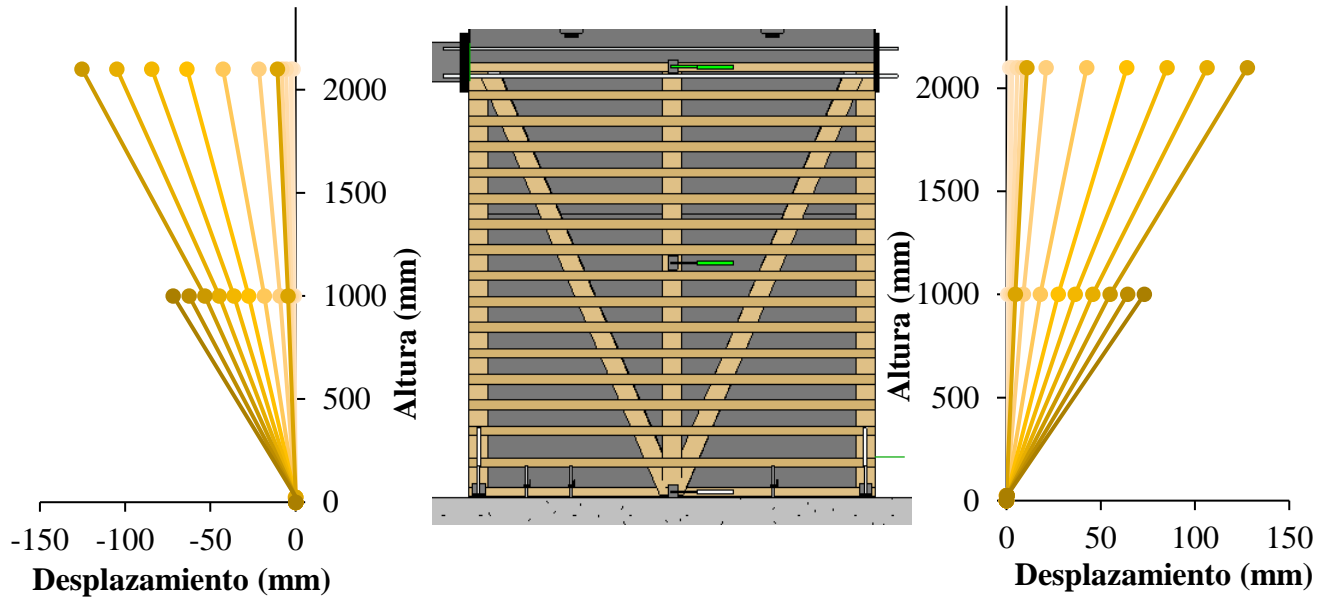


Figura 64 Perfil de desplazamiento del modelo *TSHS*

## 5 RESULTADOS Y ANALISIS

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos y los análisis de estos, organizados de acuerdo con las condiciones de cada configuración de los muros ensayados. Los resultados son presentados en función de los ciclos de histéresis, las envolventes de los ciclos de histéresis, degradación de la rigidez, disipación de energía y relación de amortiguamiento equivalente.

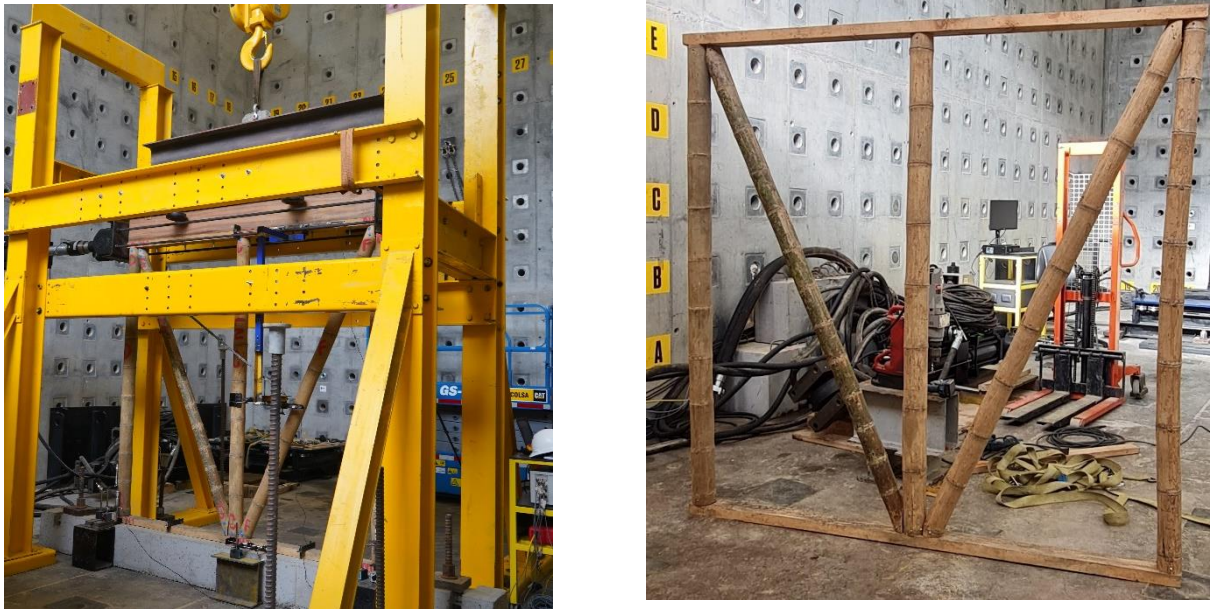
Como consecuencia del protocolo de carga se obtuvo una respuesta histerética, de acuerdo con Garcia & Fierro (2005) es el comportamiento de los materiales estructurales cuando se ven sometidos a deformaciones o esfuerzos alternantes que están fuera del rango lineal o elástico, ante una sollicitación ya sea de fuerza o de deformación impuesta. Una gran parte de la energía que es capaz de disipar el material estructural en el rango inelástico de respuesta se asocia con el área comprendida dentro de los ciclos de histéresis.

Las conexiones entre los elementos estructurales, realizadas mediante clavos y amarres con guadua, mostraron un comportamiento dependiente del tipo de material. En los prototipos con guadua, se observó una mejor rigidez inicial debido a la alta resistencia a la flexión de la guadua, mientras que las conexiones de madera presentaron deslizamientos más pronunciados pero un poco más resistente.

Durante los ensayos cíclicos, los muros presentaron fallas típicas como el agrietamiento diagonal en las zonas de mayor demanda de esfuerzos cortantes y el levantamiento parcial de la solera inferior. Los muros con relleno de mezcla de tierra mostraron una mayor capacidad de disipación de energía antes de presentar fallas críticas, mientras que los prototipos sin relleno exhibieron fallas tempranas en las conexiones.

## 5.1 Muro GS

A continuación, se muestra el montaje del muro GS esqueleto de solo guadua sin latas y sin relleno.



*Figura 65 Montaje GS, esqueleto con pies de guadua sin latas ni relleno.*

De acuerdo con el protocolo de carga, se seleccionó el tercer ciclo de cada paso, considerando que los dos primeros ciclos se utilizarían para la adecuación del sistema. Con base en esto, se llevó a cabo el ensayo cíclico del prototipo GS, se obtuvo la curva de fuerza-desplazamiento. Esta curva presentó bucles estrechos con una disipación de energía limitada y una capacidad de deformación moderada, como se observa en la Figura 66. El ensayo se extendió hasta el paso 9, alcanzando una deriva máxima del 1.96%. La envolvente de todos los ciclos mostró un comportamiento relativamente lineal en los primeros ciclos de carga, como se aprecia en la Figura 67.

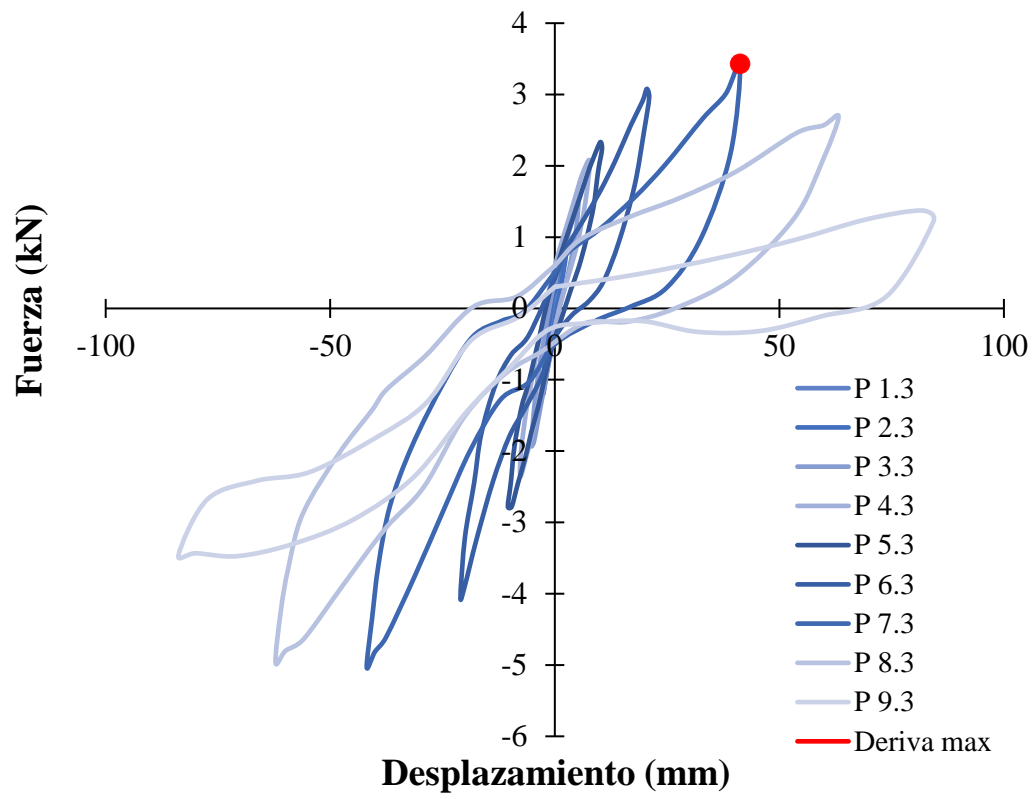


Figura 66 Ciclos de histéresis del muro GS

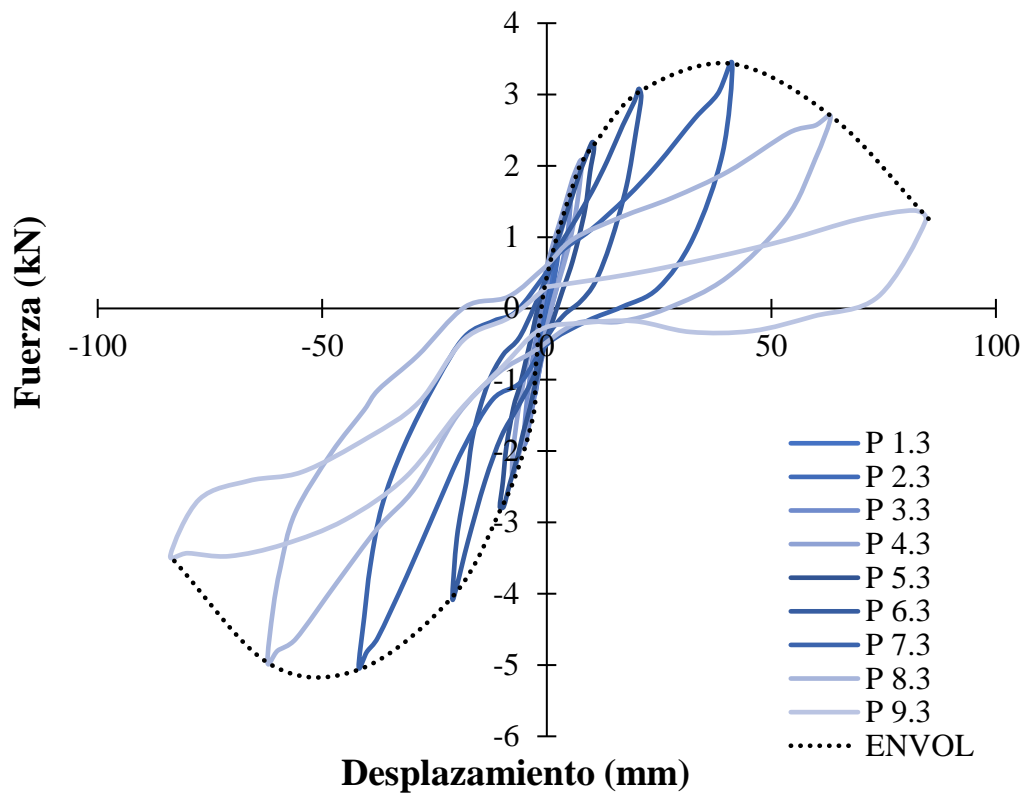


Figura 67 Envoltente de los ciclos de histéresis muro GS

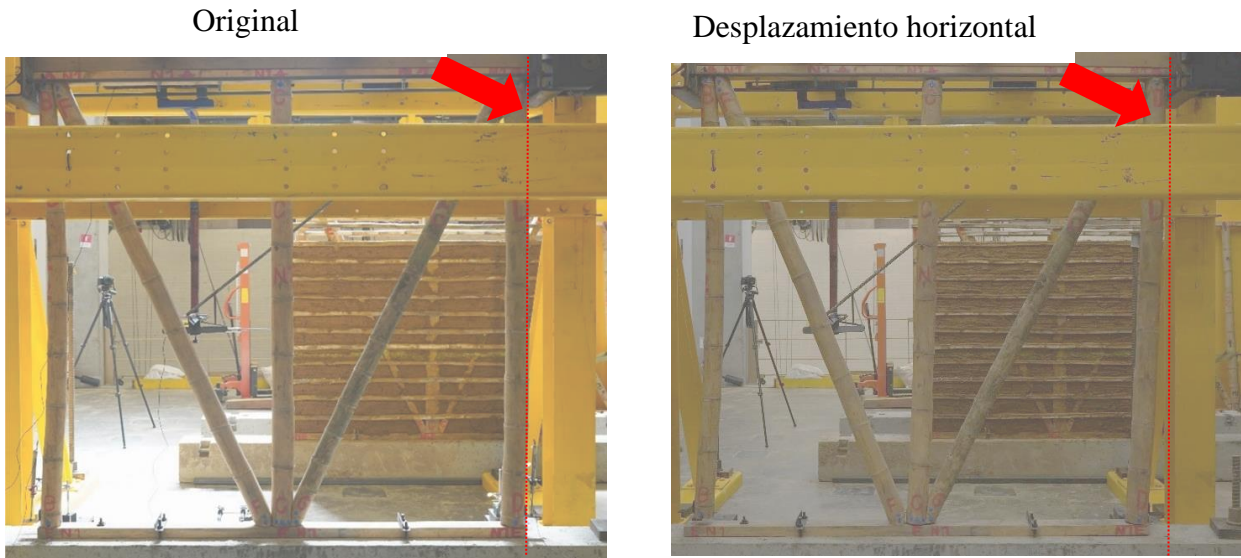
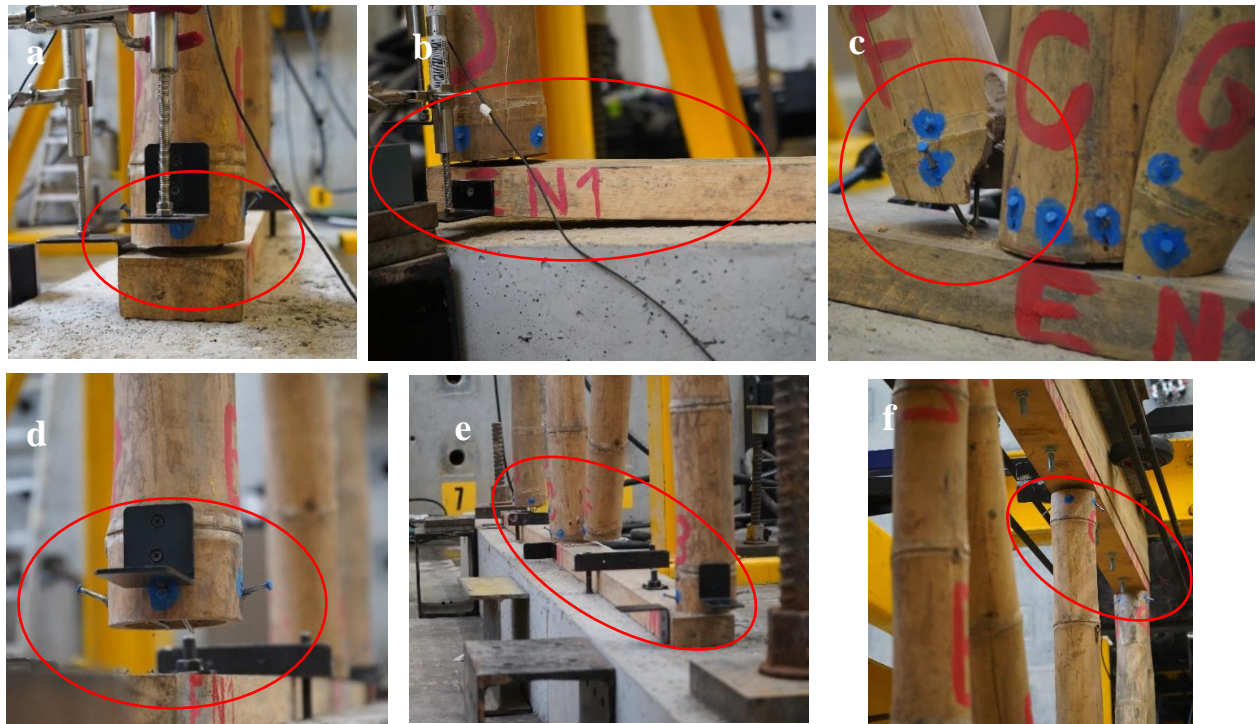


Figura 68 Desplazamiento horizontal antes y después del ensayo

En la Figura 68 se puede observar el muro antes de comenzar el ensayo y después de finalizarlo, mostrando el desplazamiento del prototipo GS. A pesar de que se intentó llevar el

modelo a la destrucción, no se logró, como se puede ver en la Figura 69. Inicialmente, se produjo un desprendimiento de los paralelos izquierdo y derecho en las puntillas (Figura 69a-d). Posteriormente, la solera inferior se levantó de la viga de concreto (Figura 69b), seguida por el paralel central, que expulsó parcialmente las puntillas y la diagonal (Figura 69c-e). En cada ciclo de carga, las puntillas se salían, pero durante el ciclo de descarga volvían a encajar en la sección de madera, hasta que finalmente los paralelos se salieron de su eje (Figura 69d-e).



*Figura 69 Fallas del prototipo GS*

## 5.2 Muro TSH

En la Figura 70 se puede ver el montaje del ensayo del muro en madera con latas de guadua (TSH), de acuerdo con el protocolo de carga se tuvo en cuenta el tercer ciclo de cada paso, este muro se llevó hasta el paso 11 y presento una deriva máxima de 2.93 % teniendo en cuenta que hasta ese punto disminuye la carga. En la curva fuerza-desplazamiento de la Figura 71 muestra unos bucles más amplios, lo que quiere decir que tienen mayor ductilidad y capacidad para soportar desplazamientos al tiempo que absorbe energía más eficiente. En la Figura 72 se puede observar la envolvente de los ciclos con una tendencia más lineal.



*Figura 70 Montaje prototipo TSH, esqueleto con pies de en madera con latas sin relleno.*

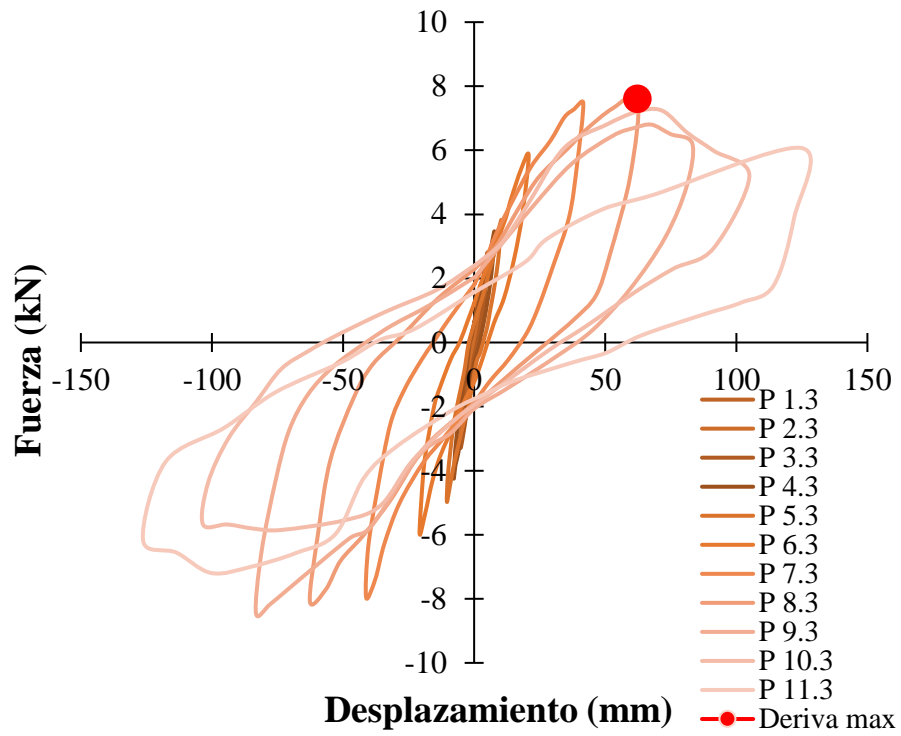


Figura 71 Ciclo de histéresis muro TSH

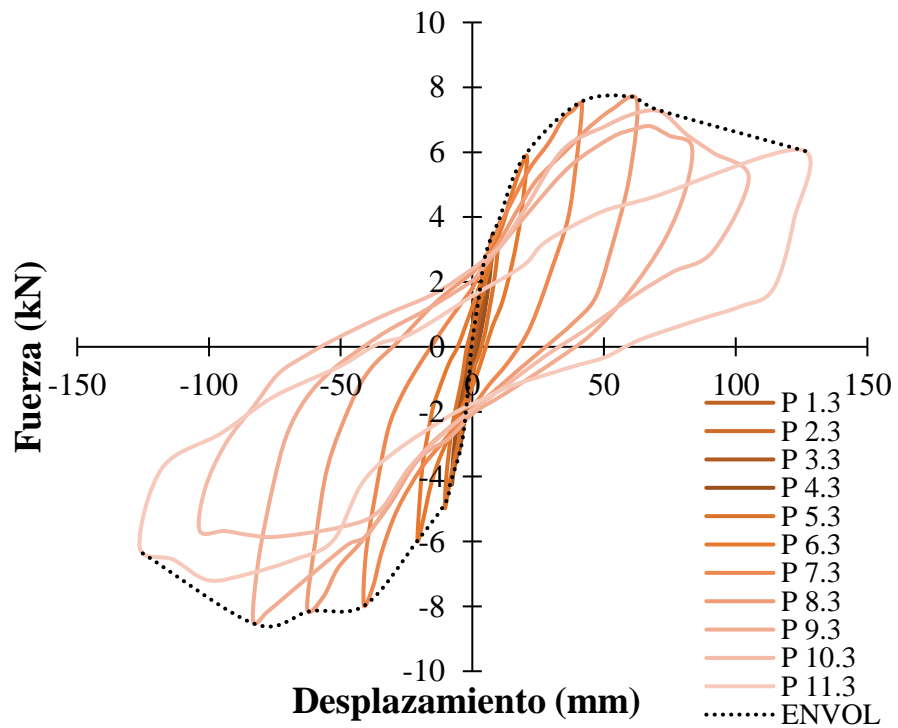
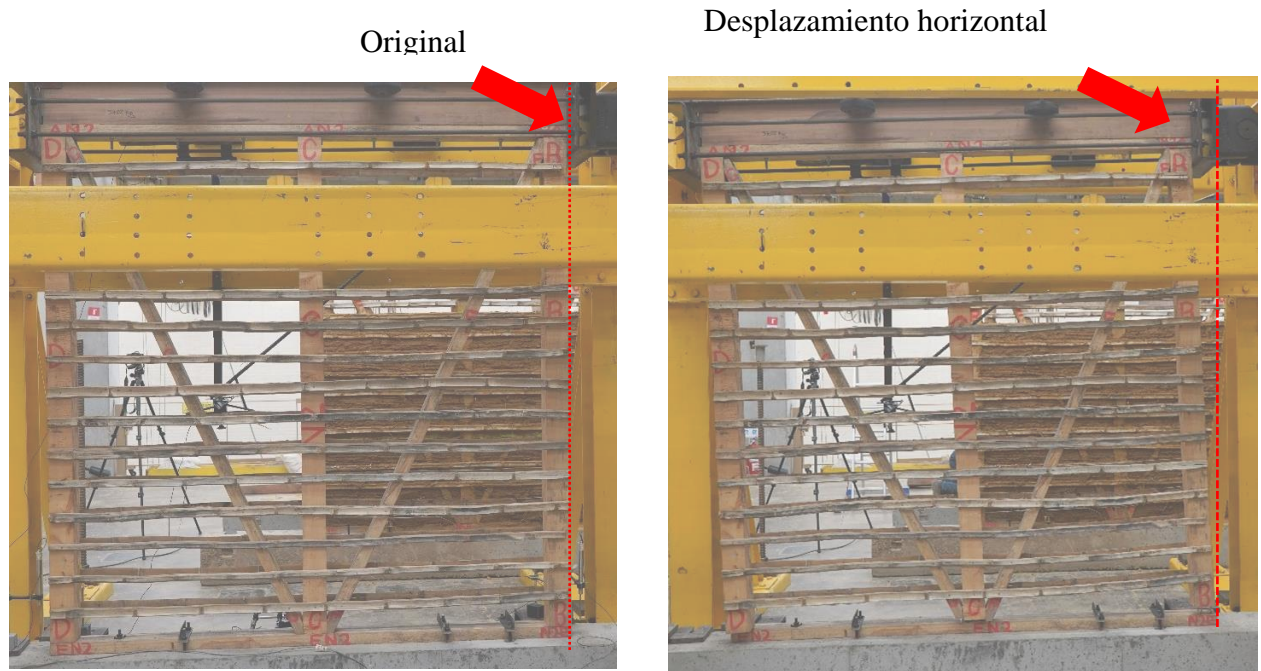


Figura 72 Envoltente de los ciclos de histéresis TSH



*Figura 73 Desplazamiento horizontal de los muros después del ensayo*

De acuerdo con la Figura 73, se pueden observar las condiciones del muro antes y después del ensayo, destacando el desplazamiento horizontal que se produjo. Entre las fallas más representativas, se evidenció el levantamiento de los parales (Figura 74a-c). Durante el ciclo de carga, las puntillas se desprendieron, pero en el ciclo de descarga volvieron a encajar en el paral, ya que habían sido clavadas desde la solera inferior hacia el mismo (Figura 74d-e). También se identificó una fisura en la lata (Figura 74f). Finalmente, el ensayo se llevó a cabo hasta que se observó un desprendimiento total de la solera inferior de los parales (Figura 74g-h).



*Figura 74 Fallas del muro TSH*

### 5.3 Muro GSH

En la Figura 75 se observa el montaje del muro con parales, diagonales en guadua y latas de guadua BSH el cual llego hasta el paso 11 del tercer ciclo de histéresis como se puede ver en la Figura 76 el cual alcanzo una deriva máxima de 4 %, lo que logro un desplazamiento significativo sin que se produjera colapso de la carga. La curva esfuerzo – deformación muestra bucles histéricos con estrangulamiento, fenómeno conocido como pinching, lo que indica que el muro pierde rigidez y resistencia ante cargas cíclicas. De la misma forma se obtuvo la envolvente de los ciclos de histéresis en la Figura 77, la cual evidencia la deformación plástica del muro e indica que, tras la aplicación de cargas, el muro no regresa completamente a su estado original, lo que implica que se han producido cambios permanentes en su configuración geométrica y en sus propiedades mecánicas.



*Figura 75 Montaje del prototipo GSH, esqueleto con pies de guadua con latas y hueco*

La representación visual en la Figura 78 destaca desplazamiento horizontal que presento el muro antes y después del ensayo (la línea punteada color roja). Los daños del prototipo al terminar el ensayo no fueron diferentes a los anteriores muros, las fallas se generaron por las uniones (Figura 79a-c) las puntillas se desprendieron, el paral derecho se soltó en su totalidad (Figura 79c) y la solera inferior presento una fisura (Figura 79e-f).

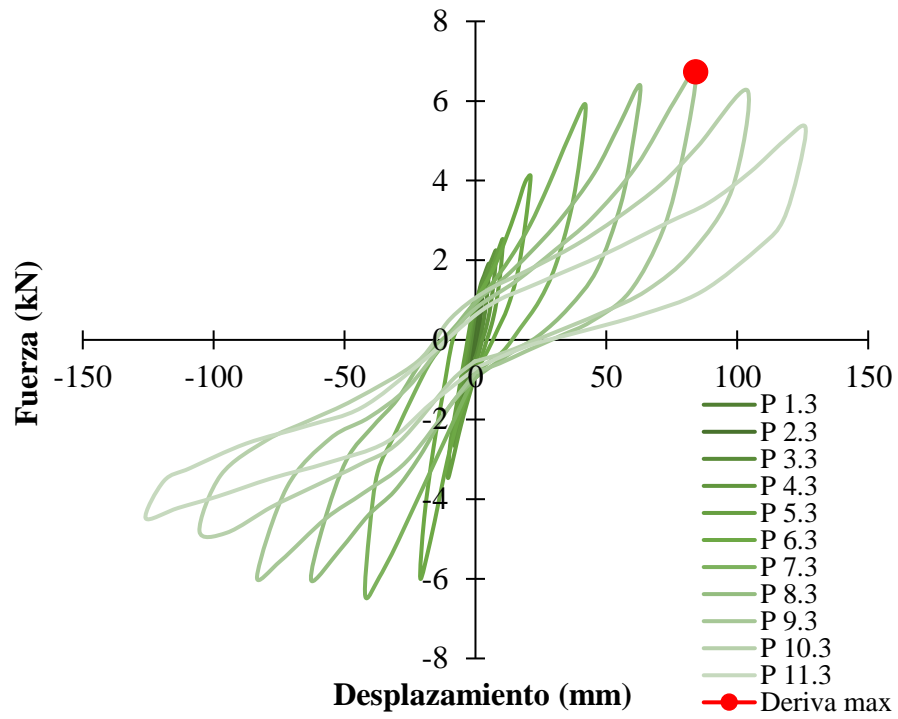


Figura 76 Ciclo de histéresis prototipo GSH

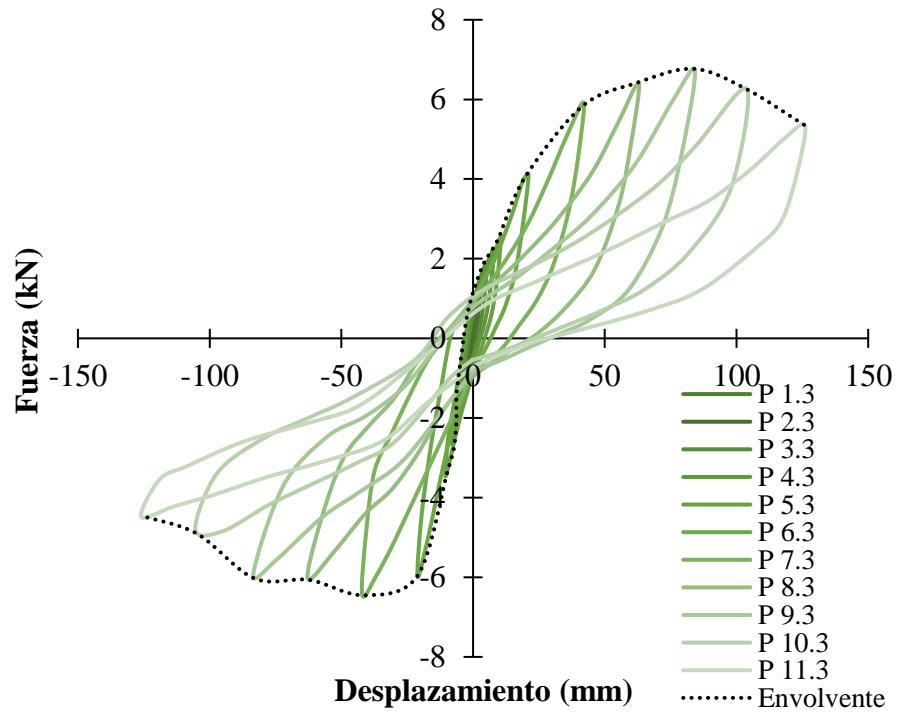


Figura 77 Envolvente del prototipo GSH

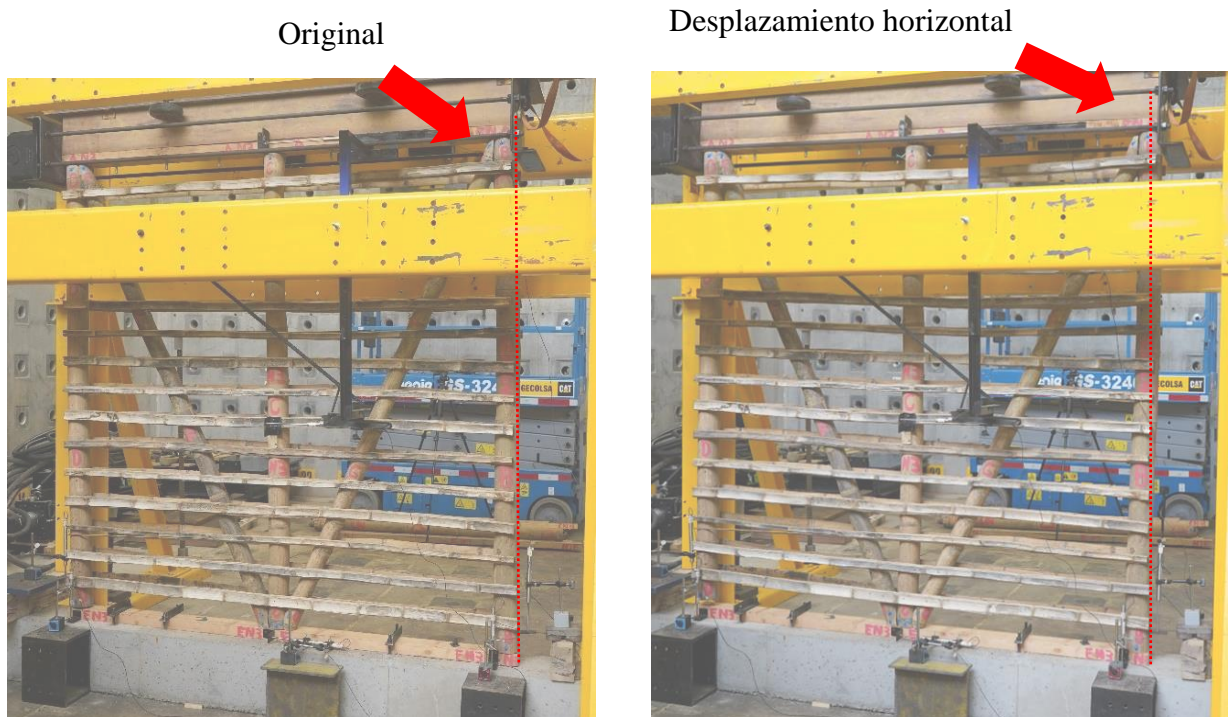


Figura 78 Desplazamiento horizontal del prototipo GSH



Figura 79 Fallas del prototipo GSH

## 5.4 MURO GSHS

Para el muro GSHS paralelos, diagonales y latas en guadua con relleno, el cual se realizó en tres capas (Figura 80). Para realizar el ensayo del muro se esperó más de un mes para que se secaran por completo, esto produjo una contracción del relleno el cual se dejó así. De la misma forma se utilizó el mismo protocolo de carga y se tomó el tercer ciclo de cada paso.



*Figura 80 Montaje del espécimen GSHS esqueleto con latas de guadua y relleno de tierra.*

El prototipo presentó una deriva máxima del 4 % antes de que se produjera el colapso de la carga, logrando alcanzar el tercer ciclo hasta el paso 10, tal como se refleja en la Figura 81. Al analizar la curva esfuerzo-deformación, se observan bucles estrechos que indican una baja disipación de energía y una pérdida de capacidad de carga en cada ciclo. Aunque el fenómeno de pinching persiste, se evidencia que el relleno proporciona una resistencia adicional, resultando en un incremento de rigidez después de alcanzar la zona plástica. Esto se ilustra claramente en la envolvente de los ciclos de histéresis presentada en la Figura 82.

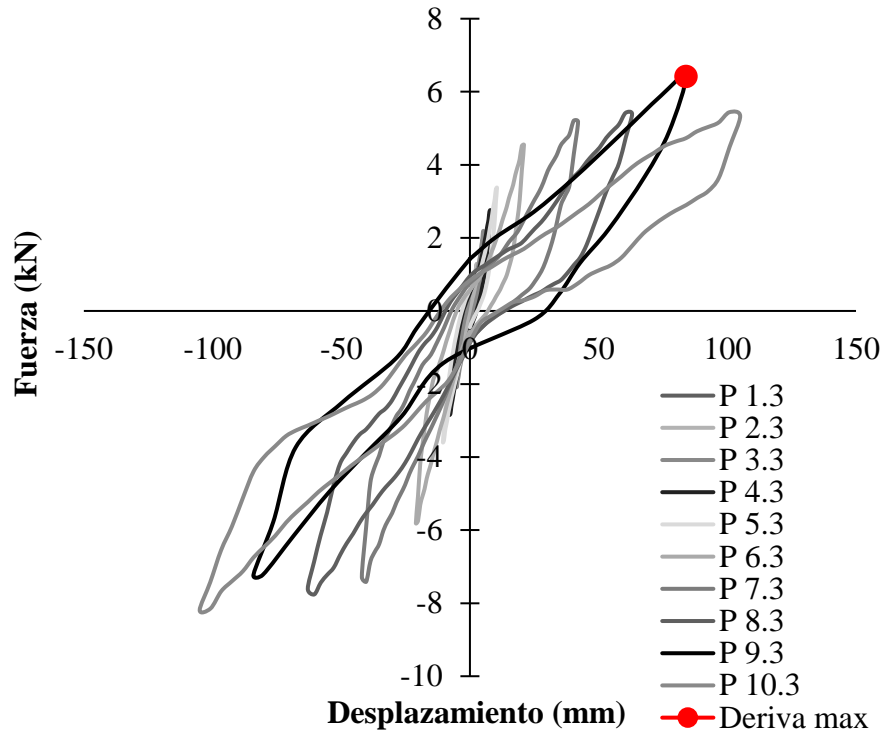


Figura 81 Ciclo de histéresis del prototipo GSHS

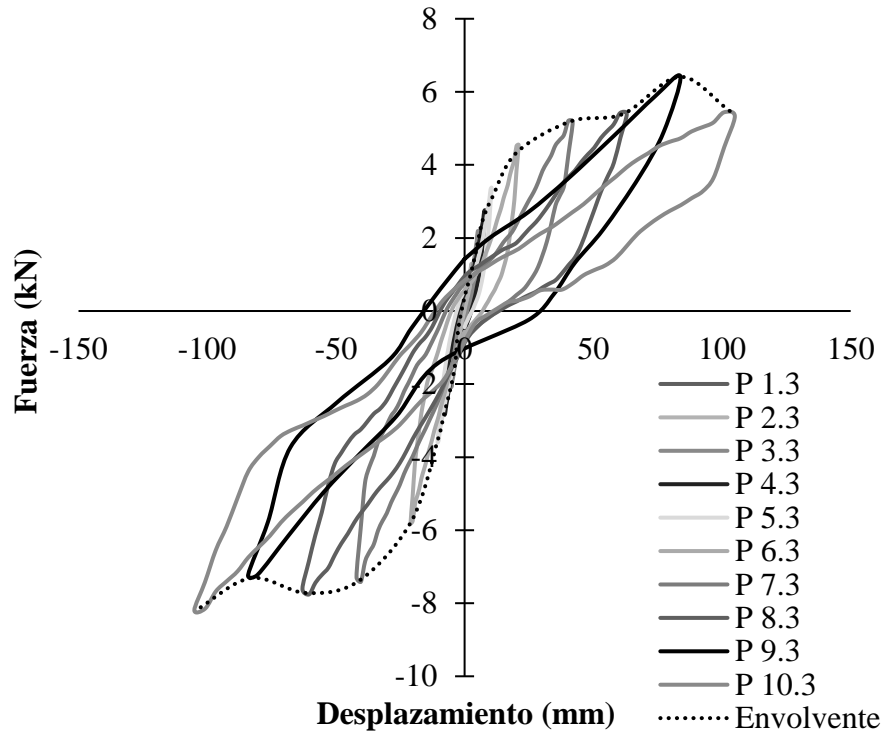
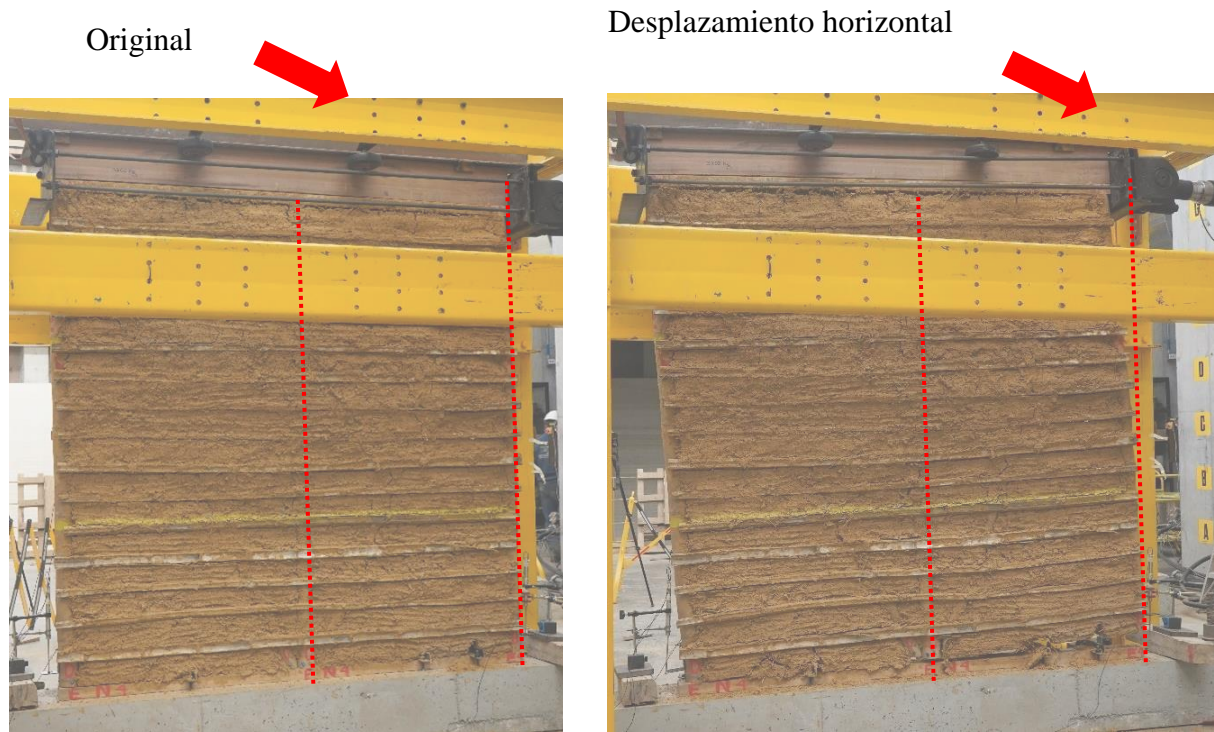


Figura 82 Ciclo de histéresis con envolvente del prototipo GSHS

Al observar la Figura 83 la línea punteada se puede ver el desplazamiento horizontal del muro antes y después del ensayo, al igual que los muros anteriores no se destruyó, pero presentó fallas similares, se levantó el paral de la solera inferior (Figura 84e), se generaron fisuras en el relleno (Figura 84b-i), se hicieron más visibles las separaciones entre el relleno y el esqueleto (Figura 84g-h), la expulsión de puntillas (Figura 84d-f) y por último desprendimiento del relleno (Figura 84c).



*Figura 83 Desplazamiento horizontal del muro GSHS*

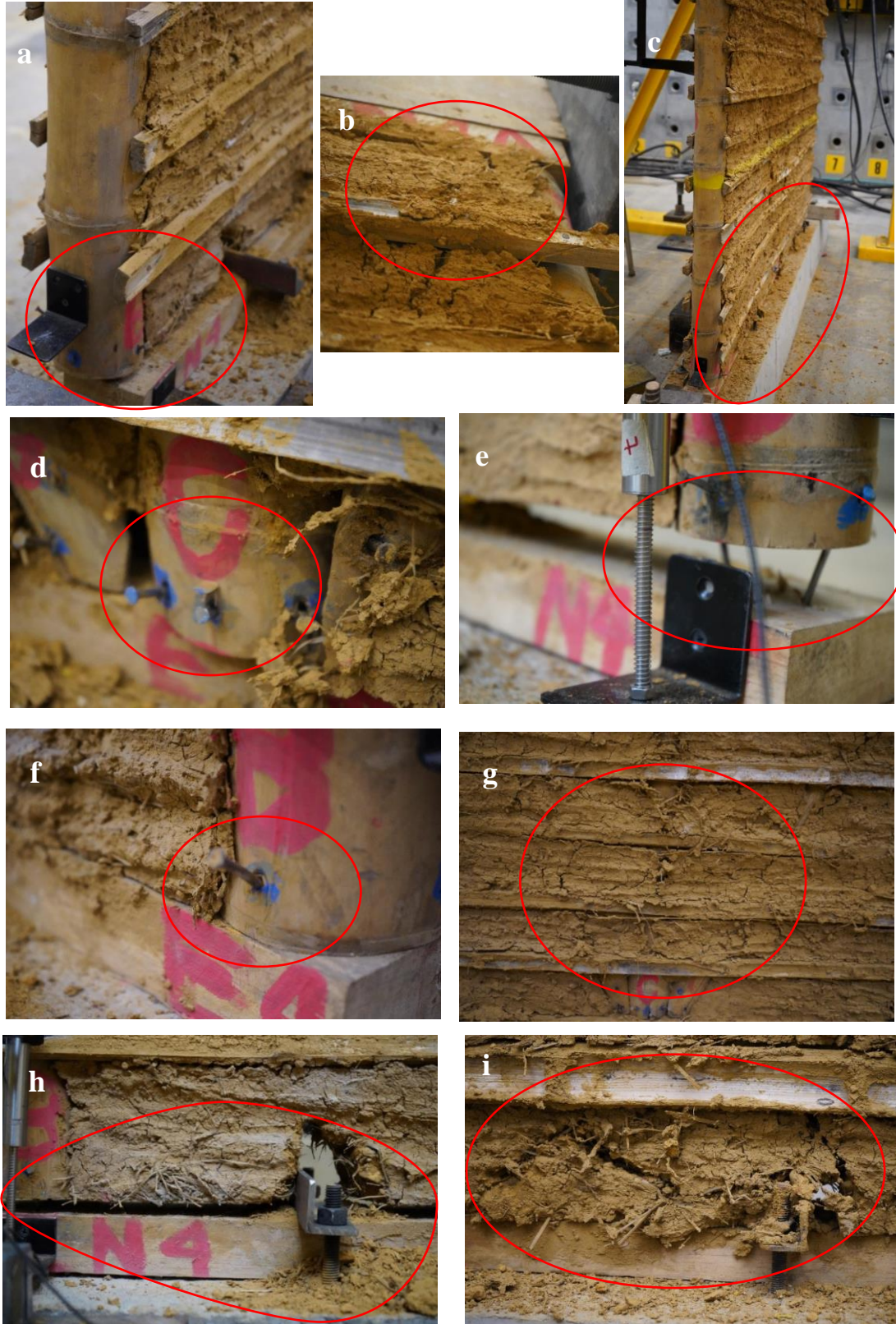


Figura 84 Falencias del prototipo GSHS después del ensayo

## 5.5 Muro TSHS

Para el muro de parales, diagonales en madera con latas de guadua y relleno de tierra (TSHS). El relleno se construyó en tres capas, para el desarrollo del ensayo se esperó hasta que se secase completamente el muro, en el proceso de secado hubo contracción del material sin embargo no presento desprendimiento de este, Al igual que los prototipos anteriores se tuvo en cuenta el mismo protocolo de carga.



*Figura 85 Montaje del muro TSHS en madera con latas de guadua y relleno de tierra*

Los ciclos de histéresis del muro (Figura 87) TSHS exhiben un comportamiento cíclico más estable, caracterizado por bucles amplios que mejoran notablemente la capacidad de disipación de energía, lo que refleja una mayor ductilidad. El relleno contribuye al rendimiento estructural bajo carga cíclica, resultando en un aumento significativo del desplazamiento acompañado de una reducción gradual de la rigidez. La curva esfuerzo-deformación (Figura 86) muestra un incremento de fuerza hasta alcanzar 6.7 kN, lo que corresponde a una deriva máxima del 3.9%. Sin embargo, a partir de este punto, se observa una disminución de la fuerza de 0.6 kN, junto con un aumento en el desplazamiento, lo que se traduce en un comportamiento residual que continúa hasta llegar a una deriva de 7.9%.

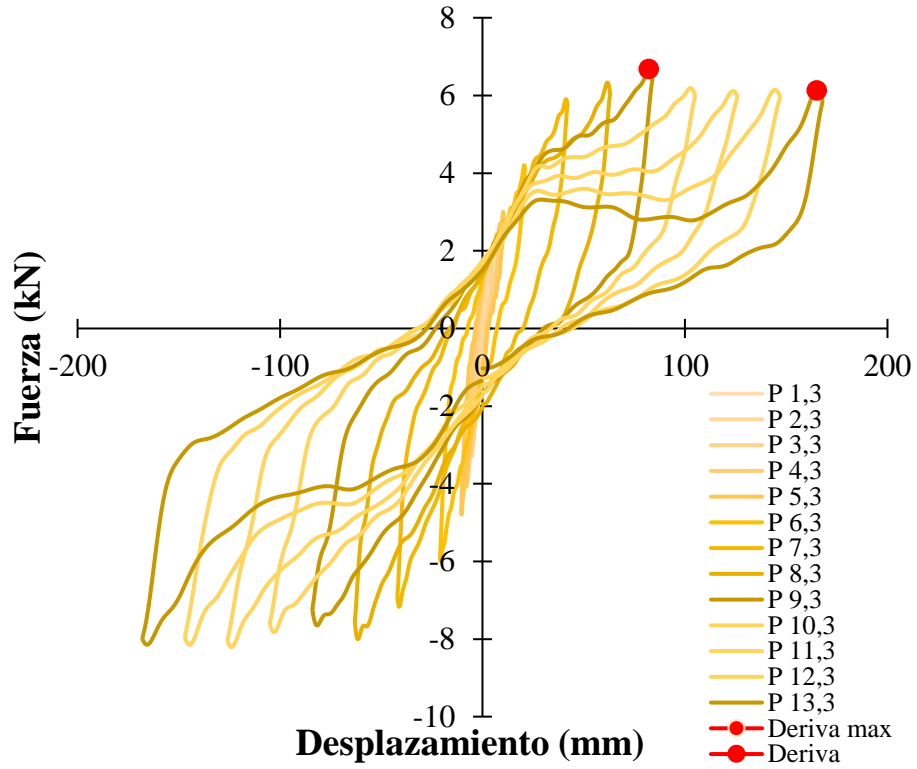


Figura 86 Ciclo de histéresis muro TSWS

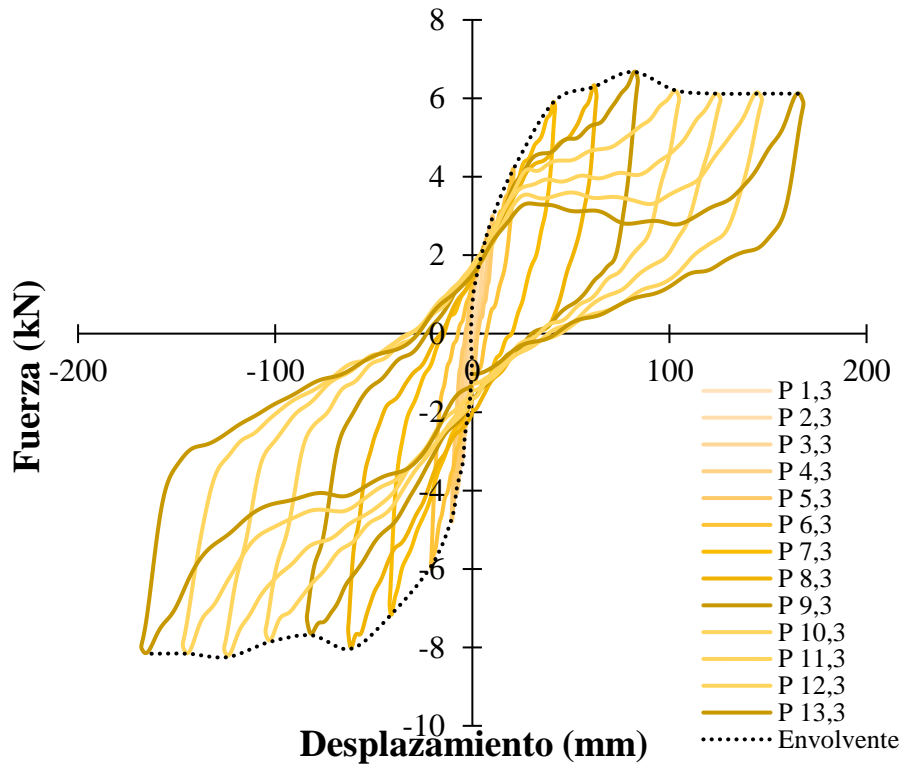
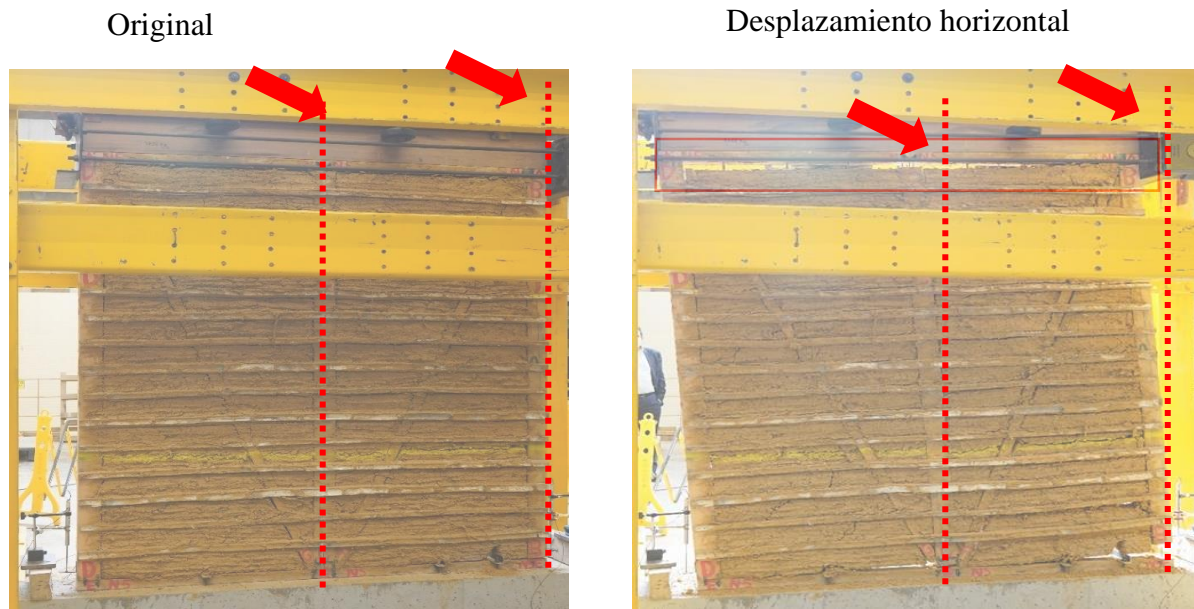


Figura 87 Ciclo de histéresis con envolvente del muro TSWS



*Figura 88 Desplazamiento horizontal del muro TSHS*

Como se observa en la Figura 88, la línea punteada muestra el desplazamiento antes y después de finalizar el ensayo.

Durante el ensayo se identificaron varias fallencias, entre las que destacan las fisuras, el desacople de las latas (Figura 90 a-e-f) junto con el desprendimiento del relleno del esqueleto (Figura 90d-e) (Figura 89b-c-d). También se observó un retiro parcial de las puntillas (Figura 90g) y dado que el relleno se construyó en capas se hicieron más evidentes tras el ensayo (Figura 89a-d), el desprendimiento de la solera inferior fue mínimo comparada con los otros prototipos (Figura 89e). Cabe resaltar que el muro al momento de las fallas anteriormente descritas emitió sonidos que provienen de la madera y latas.



*Figura 89 Fallas del prototipo TSHS*



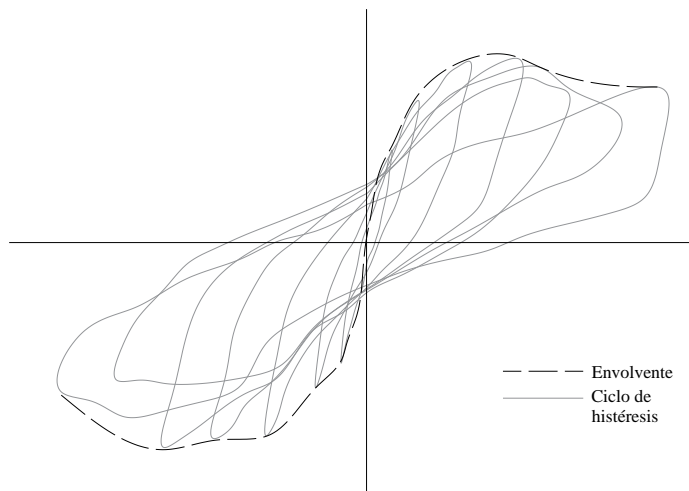
*Figura 90 Falencias del prototipo TSHS*

## 5.6 Efectos de la configuración y relleno de tierra en los prototipos

En este capítulo se abordarán los análisis de las envolventes de los ciclos de histéresis, la degradación de la rigidez, disipación de energía y el amortiguamiento equivalente de todos los muros.

### *Envolvente de histéresis*

Es la representación gráfica que ilustra el comportamiento estructural ante cargas cíclicas, la envolvente es la curva que conecta los puntos máximos de deformación en cada ciclo de carga y descarga.



*Figura 91 Envolvente del ciclo de histéresis*

### *Degradación de la rigidez*

La degradación de rigidez se refiere a la disminución de la capacidad de un material o estructura para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas. Esta degradación se puede entender como la relación entre la carga aplicada y la deformación resultante: a medida que la rigidez disminuye, la estructura se vuelve más susceptible a fallas inesperadas o extremas, y se calcula con la Ecuación 5 Huang et al. (2018).

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+U_i| + |-U_i|}$$

*Ecuación 5*

$P_i$  = Carga máxima en cada ciclo

$U_i$  = Desplazamiento maximo en cada ciclo

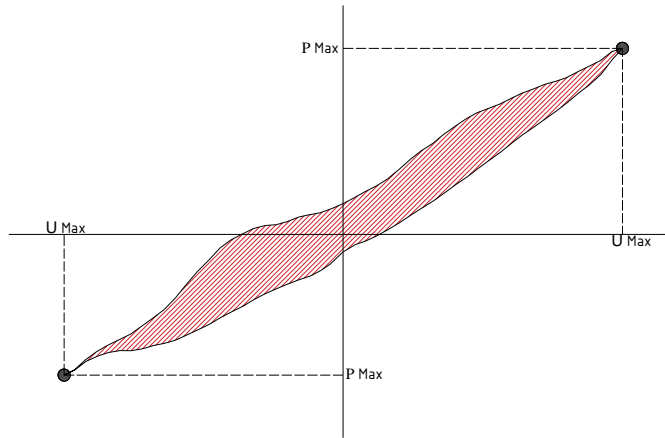


Figura 92 Esquema degradación de rigidez de un ciclo

### **Disipación de energía**

Es la acumulación de energía disipada de un material o estructura sometido a cargas cíclicas, la cual corresponde al área bajo la curva de los ciclos de histéresis Garcia & Fierro (2005).

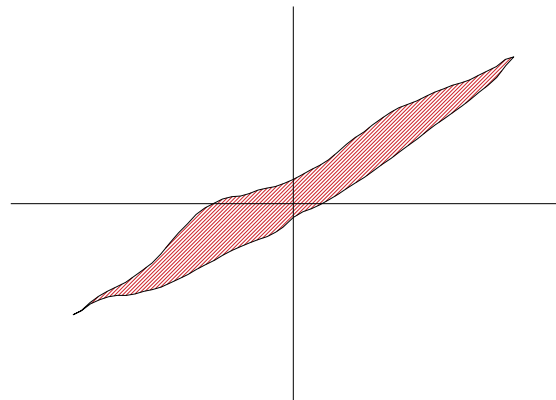


Figura 93 Disipación de energía de un ciclo

### **Relación de amortiguamiento equivalente (EVDR)**

Es la cantidad de energía disipada en comparación con la energía total aplicada durante un ciclo de carga. Como se muestra en la Figura 94 la energía disipada corresponde al área interna del ciclo en color rojo y la energía total aplicada como el área del triángulo que genera la fuerza y el desplazamiento máximo en color negro. La cual se calculó con la ecuación 6.

$$h_e = \frac{E_d}{2\pi * E_p}$$

Ecuación 6

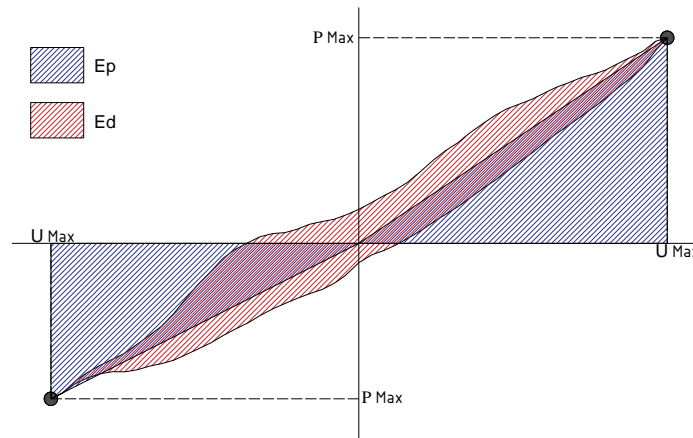


Figura 94 EVDR de un ciclo, modificado de Ali et al. (2012)

En la Figura 95 se comparan los prototipos el esqueleto de guadua GS, esqueleto en guadua con latas GSH y esqueleto de guadua con latas y relleno GSHS.

El muro GS muestra una degradación de la rigidez más pronunciada en comparación con los otros tipos (Figura 95b). Esta rápida pérdida de rigidez sugiere que el diseño y la integración de elementos horizontales son críticos para mantener la estabilidad y resistencia. La mínima no linealidad bajo cargas iniciales observada indica que comienza a experimentar deformaciones significativas con el aumento de desplazamientos (Figura 95a). Por otro lado, los muros GSHS y GSH muestran un comportamiento más lineal en sus respuestas estructurales. Esto sugiere que su diseño permite una mejor distribución de las cargas y una mayor capacidad para absorber deformaciones sin comprometer su integridad (Figura 95a). A medida que se incrementa el desplazamiento, la ligera degradación de estos muros indica una mayor ductilidad y capacidad de absorción de energía (Figura 95c), lo que es beneficioso en situaciones de carga dinámica. Ahora bien, la EVDR (Figura 95d), exhibe que a medida que la rigidez disminuye la relación de amortiguamiento crece para el muro GS, mientras que para el muro GSH fluctúa debido al incremento de rigidez aparente atribuido al aporte de las latas y el GSHS su EVDR es más estable a medida que se presenta mayor desplazamiento producto al aporte del relleno. De acuerdo con lo anterior los elementos horizontales tipo latas y el relleno en los muros ha demostrado tener un impacto significativo en el comportamiento estructural.

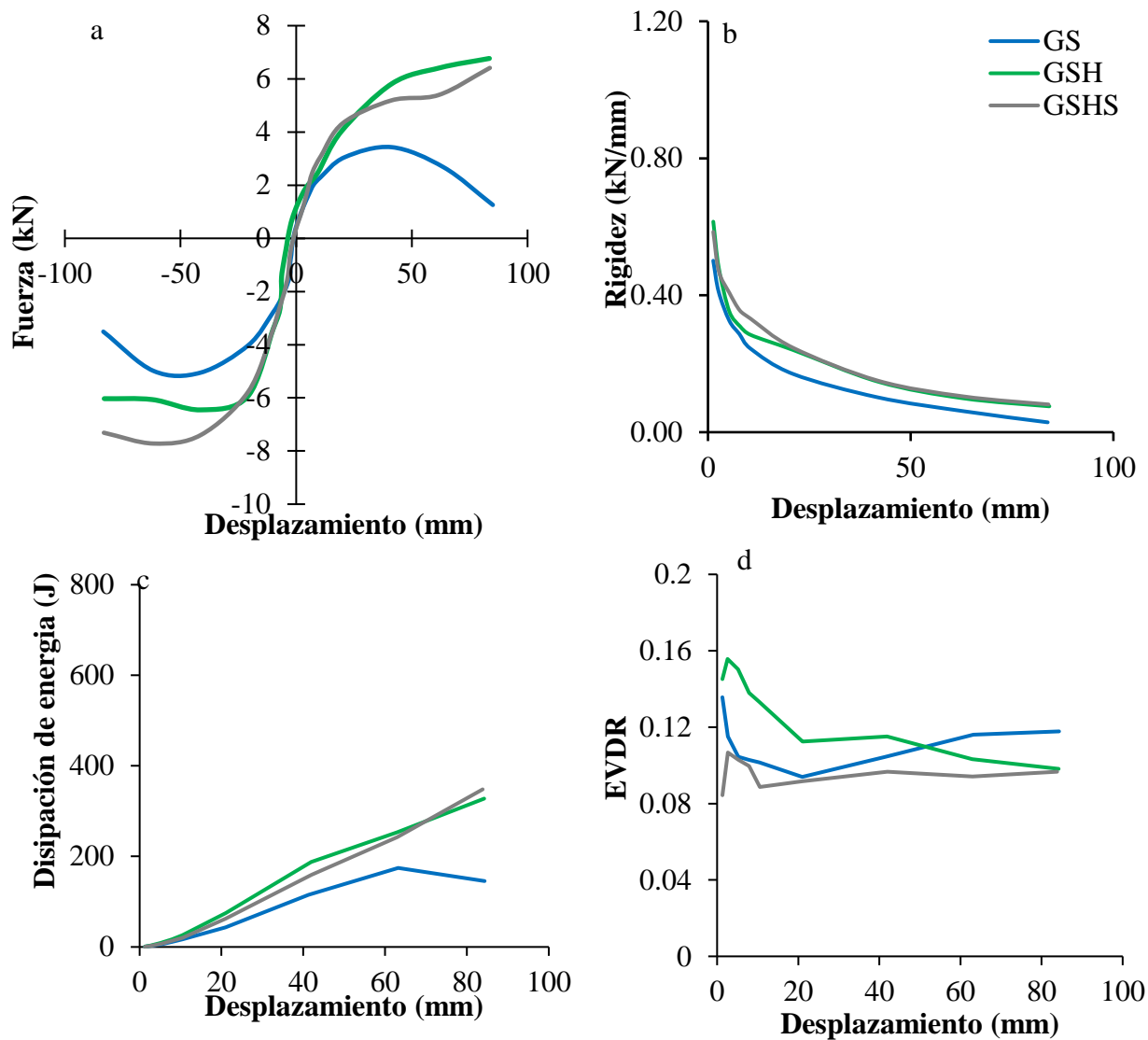


Figura 95 a) Envoltura de los ciclos de histéresis b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente

En la Figura 96 se comparan los muros de madera, el esqueleto de madera con latas TSH y el esqueleto de madera con latas y relleno de tierra TSHS. El muro TSH presenta una tendencia lineal más dominante, lo que implica que el muro puede soportar cargas sin deformaciones significativas, esto es favorable para situaciones de carga estática o cíclica leve. Sin embargo, a medida que avanza el ciclo de carga, se observa una degradación gradual de la rigidez y la resistencia del muro. Este comportamiento sugiere que, aunque el muro TSH es capaz de manejar esfuerzos iniciales de manera efectiva, su capacidad para resistir cargas adicionales disminuye con el tiempo, lo que puede resultar en un fallo estructural si se aplican cargas excesivas. En comparación, el TSHS se

evidencia una leve degradación de rigidez, pero sin falla inmediata esto aporta mayor ductilidad, más absorción de energía y mantiene desplazamientos mayores, en concordancia con el EVDR el TSH presenta un mayor incremento producto de su pérdida de rigidez abrupta mientras que el TSHS presenta fluctuaciones menores en el EVDR a medida que crece el desplazamiento. Lo anterior evidencia que el aporte del relleno es significativo bajo cargas cíclicas.

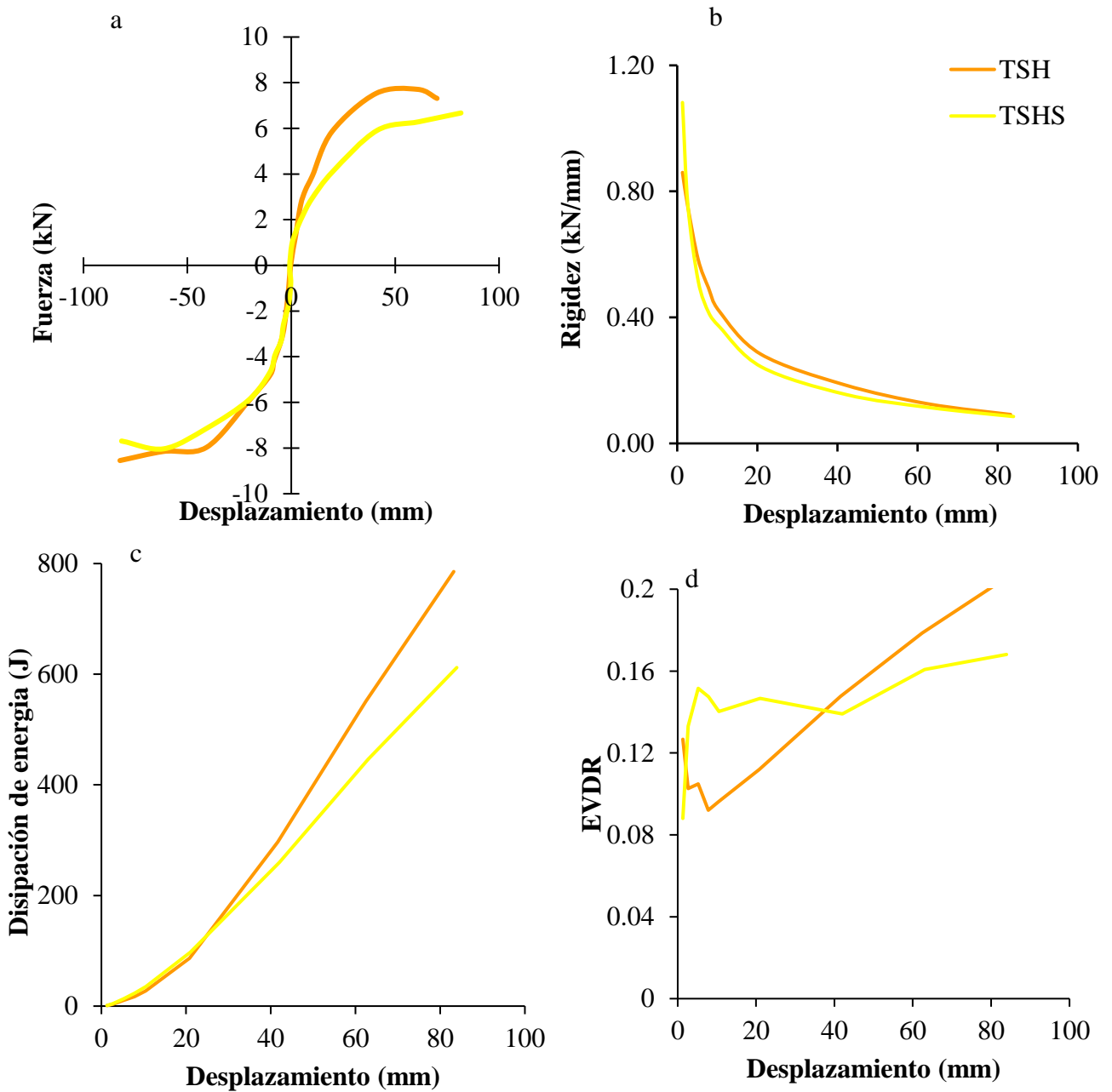


Figura 96 a) Envolturas de los ciclos de histéresis b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente

En la Figura 97 se comparan los muros de guadua con latas GSH y madera con latas TSH. Con base en lo discutido anteriormente para TSH y GSH, se puede observar que el muro TSH presento rigideces mayores hasta un pico máximo mientras que GSH presento una tendencia de pérdida de rigidez significativa (Figura 97b), sin embargo, el muro TSH muestra un aumento de disipación de energía mayor que el GSH (Figura 97c) pero con una EVDR en aumento lo que causa una disminución de rigidez a medida que aumenta el desplazamiento. Esto no lo exhibe el GSH debido a que su EVDR es más uniforme pues su resistencia permanece constante a medida que crece el desplazamiento. En conclusión, la madera presenta un mejor comportamiento ante cargas cíclica.

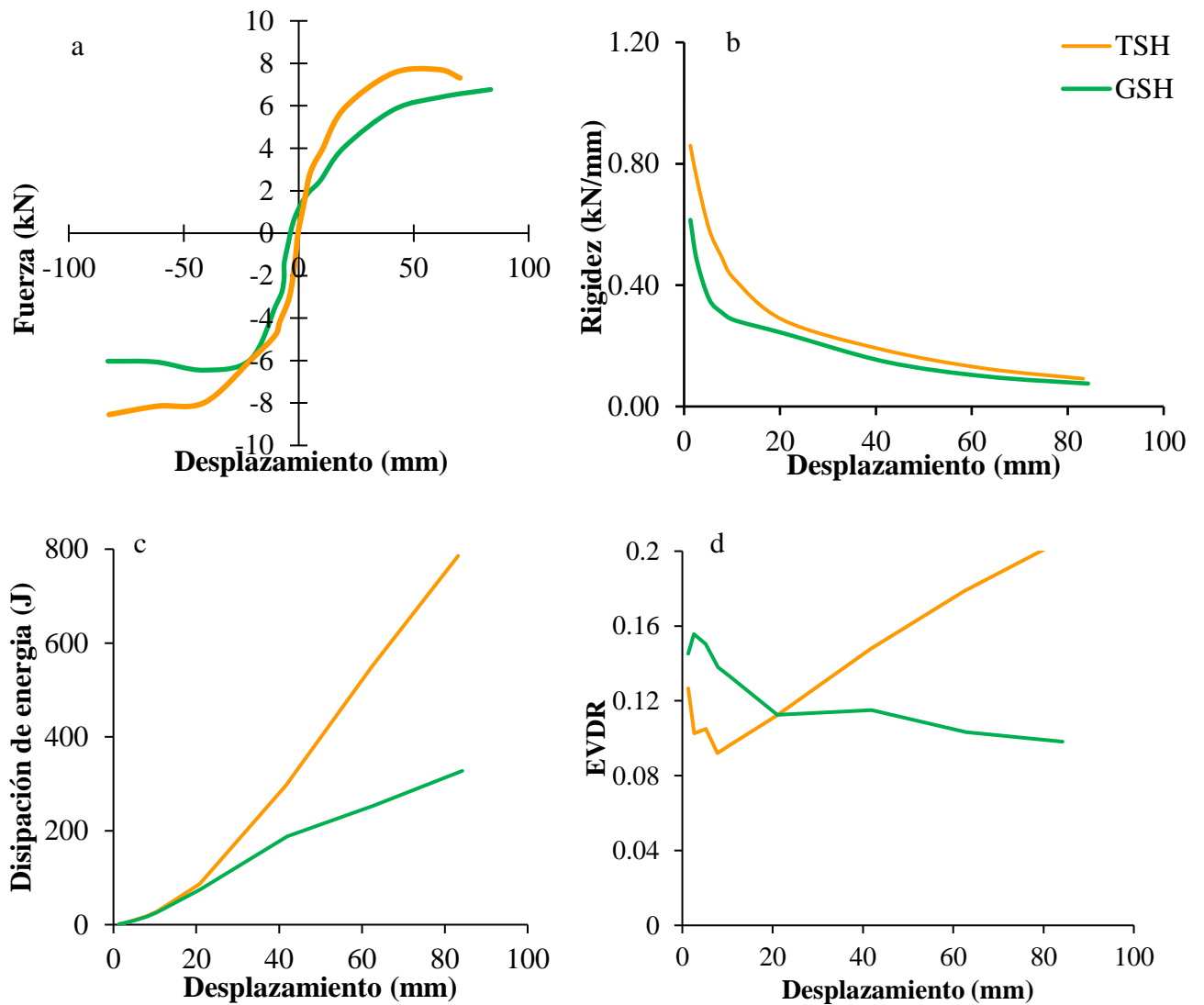
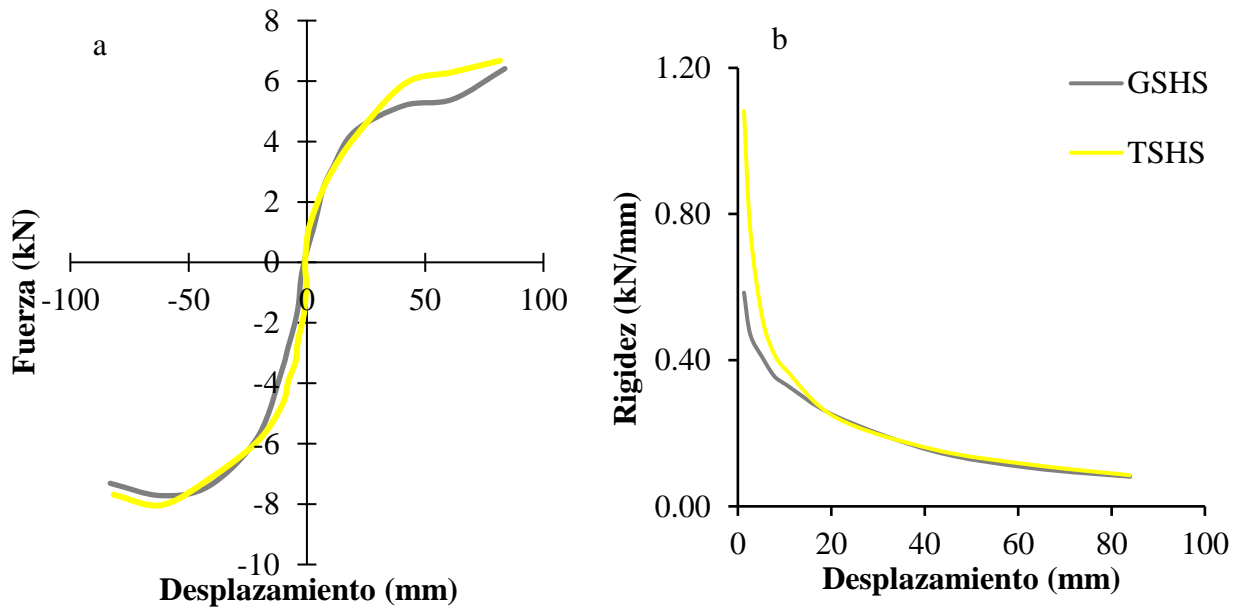
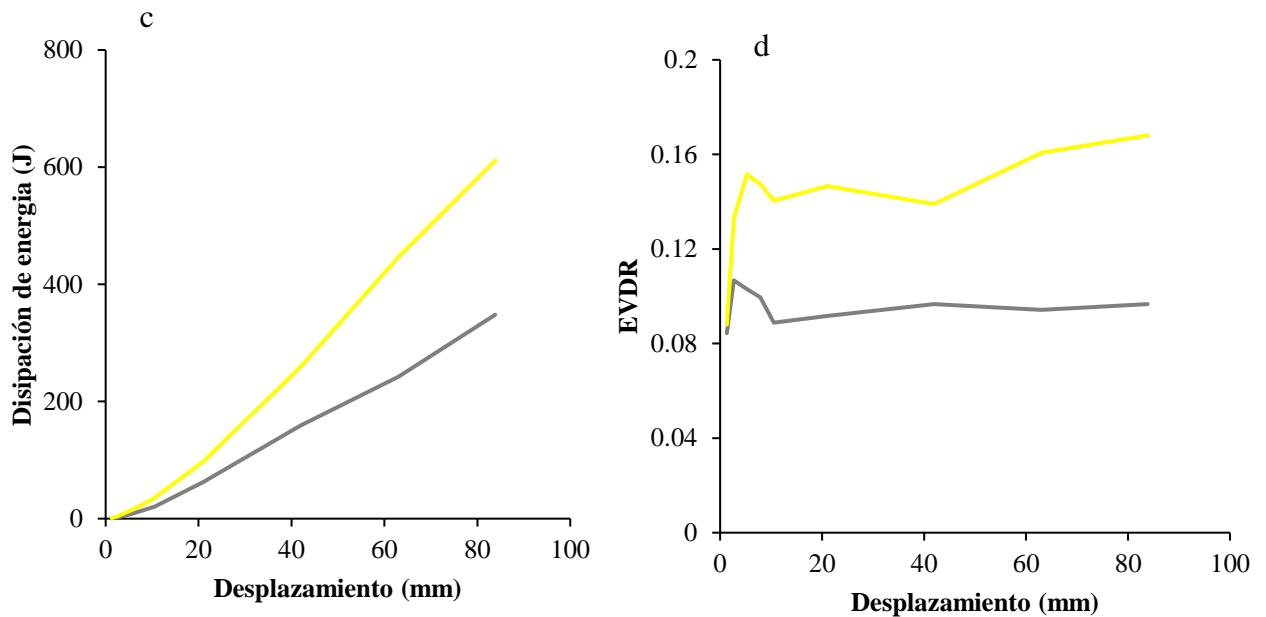


Figura 97 Envolventes de los ciclos de histéresis, b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente

Finalmente, al comparar los muros de madera con latas y relleno TSHS versus guadua con latas y relleno GSHS. en la Figura 98 y con la discusión anterior, tanto el muro GSHS como el TSHS presentan una tendencia lineal en los primeros ciclos (Figura 98a), se observó que el TSHS experimenta menos degradación en su resistencia en comparación con el GSHS que presento la disminución en la rigidez (Figura 98b), lo que le permite mantener su desempeño a medida que aumenta el desplazamiento. Por otro lado, para TSHS contribuye una mayor disipación de energía y a una mejor capacidad para absorber deformaciones en desplazamientos más amplios (Figura 98c).

Además, el TSHS exhibe un mayor índice de EVDR en comparación con el GSHS (Figura 98d). Aunque el GSHS procura mantenerse a medida que aumenta el desplazamiento, el TSHS muestra una mayor resiliencia y un leve aumento en su capacidad de respuesta. En resumen, lo anterior se ve reflejado en el aporte que genera el relleno y las latas, pero el TSHS se destaca por su mayor resistencia y capacidad de adaptación ante cargas dinámicas probablemente por el tipo de material.





*Figura 98 a) envolventes de los ciclos de histéresis, b) degradación de rigidez c) disipación de energía d) amortiguamiento equivalente*

Finalmente, los ciclos de histéresis indicaron que los muros con relleno de tierra y guadua disipan un promedio de un 30% más de energía que los prototipos sin relleno. Sin embargo, se identificaron ligeras variaciones en los resultados, atribuibles a posibles deslizamientos en las fijaciones del marco de pruebas, lo cual fue verificado por parte de la instrumentación sin obtener desplazamientos medibles, y esto se puede asociar más al desplazamiento controlado del ensayo y la sensibilidad de las celdas de carga.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### *Conclusiones*

- Este estudio ha demostrado que los muros de bahareque construido con guadua y marcos de madera exhiben un comportamiento estructural favorable bajo cargas horizontales cíclicas. Los prototipos que incorporan relleno de mezcla de suelo (GSHS y TSHS) exhibieron una absorción de energía superior y características de ductilidad mejoradas, lo que resalta la importancia de los materiales de relleno en el diseño sísmico.
- Los modelos de muros con relleno de mezcla de suelo alcanzaron valores máximos de resistencia que oscilaron entre 6,41 kN y 6.68 kN, superando significativamente las capacidades de carga de los prototipos sin relleno, que demostraron un menor desempeño. Además, los muros con relleno de mezcla de suelo mostraron mayores capacidades de desplazamiento, llegando hasta una deriva del 4 % y 7.9 %, lo que indica una mayor flexibilidad y adaptabilidad a las fuerzas sísmicas en comparación con los muros sin relleno.
- El análisis de bucles de histéresis reveló que los modelos con relleno de mezcla de suelo y tiras de guadua exhibieron bucles más anchos, lo que refleja una mayor capacidad de disipación de energía durante los ciclos de carga y descarga. Esto es indicativo de la mayor resiliencia estructural de estos tipos de muros. La notable contribución de los elementos horizontales (tiras de guadua) en el muro GSH, en comparación con el muro GS, subraya el papel del refuerzo en la mejora de la integridad estructural. Sin embargo, los mecanismos de falla ocurrieron predominantemente en las juntas, y los modelos con esqueleto de madera demostraron un rendimiento superior en comparación con los construidos con guadua.
- En los prototipos sin relleno, el principal mecanismo de falla fue el desprendimiento de los elementos verticales de las vigas del umbral inferior debido al desprendimiento de los clavos de acero. En cambio, los modelos con relleno de tierra presentaron grietas en el material de relleno; sin embargo, los elementos estructurales mantuvieron su integridad bajo carga durante más tiempo, lo que indica un mejor desempeño.
- Además, los muros construidos con guadua y marcos de madera, junto con relleno de mezcla de tierra, demostraron una degradación de la rigidez más estable en comparación

con los muros sin relleno. Esta observación sugiere que el relleno de suelo no solo mejora la capacidad de absorción de energía, sino que también contribuye al mantenimiento de una mayor rigidez estructural durante todo el ciclo de carga.

- Los muros con marcos de guadua y madera, junto con el relleno de tierra, mostraron una degradación de la rigidez más estable en comparación con los muros sin relleno. Esto sugiere que el relleno de tierra no solo mejora la capacidad de absorción de energía, sino que también ayuda a mantener una mayor rigidez estructural durante el ciclo de carga.

### ***Respuesta a la Hipótesis***

La hipótesis que plantea que la respuesta ante cargas horizontales de muros de bahareque de tierra en el sur del Valle del Cauca se ve influenciada por el tipo de material que conforma la estructura y su relleno ha sido confirmada por este estudio. Los resultados indican que los muros construidos con guadua y marcos de madera presentan un comportamiento estructural favorable bajo cargas horizontales cíclicas, especialmente cuando incorporan un relleno de mezcla de suelo. Estos prototipos mostraron una notable capacidad de absorción de energía y mejoras en ductilidad, alcanzando resistencias máximas de entre 6,41 kN y 6.68 kN, así como mayores capacidades de desplazamiento que indicaron una mejor flexibilidad ante fuerzas sísmicas.

Además, el análisis de los ciclos de histéresis reveló una mayor capacidad de disipación de energía en los muros con relleno, lo que resalta su resiliencia estructural. Mientras que los prototipos sin relleno exhibieron fallas en las juntas y una menor capacidad de mantener la integridad estructural, aquellos con relleno de mezcla de suelo mostraron una degradación de rigidez más estable. En conclusión, los hallazgos del estudio evidencian que tanto el tipo de material como el relleno son factores determinantes en la respuesta de los muros de bahareque a cargas horizontales, lo que subraya su importancia en el diseño y construcción de estructuras resistentes a eventos sísmicos.

### ***Recomendaciones***

- Explorar nuevas uniones y mecanismos de fijación: Para futuros estudios, se sugiere ensayar prototipos utilizando diferentes tipos de uniones y reemplazar las puntillas por mecanismos alternativos que sean igualmente económicos y accesibles para la comunidad. Esto podría mejorar la efectividad y durabilidad de los prototipos.

- Realizar pruebas en condiciones simuladas: Se recomienda estudiar los prototipos en una mesa vibratoria para evaluar su comportamiento bajo cargas dinámicas. Este enfoque permitirá analizar su respuesta ante sismos u otras fuerzas, proporcionando información valiosa sobre su desempeño en situaciones reales.
- Ampliar la investigación sobre cimentación y materiales: Es aconsejable realizar ensayos que aborden más en profundidad la cimentación de los prototipos. Además, se debe considerar realizar pruebas de tracción indirecta y compresión inconfiada con probetas de mayor tamaño que las especificadas en la norma, lo que facilitará una mejor representación de los muros y una distribución más eficiente de los esfuerzos. También sería beneficioso explorar el uso de otros tipos de fibras naturales para evaluar su impacto en el rendimiento estructural.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, Q., Schacher, T., Ashraf, M., Alam, B., Naeem, A., Ahmad, N., & Umar, M. (2012). In-plane behavior of the dhajji-dewari structural system (wooden braced frame with masonry infill). *Earthquake Spectra*, 28(3), 835–858. <https://doi.org/10.1193/1.4000051>
- Asociacion Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2004). *Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada asociación*. 1–194.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2002). *Manual de evaluación, rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construidas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002*. <http://www.asosismica.org>
- ASTM-C496/C496M-17. (2008). Standard Test Method for C. In *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens I*. <https://doi.org/10.1520/mnl10881m>
- ASTM-D2166-06. (2007). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil I*. <https://doi.org/10.1520/D2166-06.2>
- CEPAL-UNESCO. (2021). Panorama social de América Latina CEPAL. In *Publicación de las Naciones Unidas* (Naciones U). <https://doi.org/10.2307/j.ctv550d07.6>
- Costi de Castrillo, M., Philokyrou, M., & Ioannou, I. (2017). Comparison of adobes from pre-history to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.02.009>
- DANE. (2024). *Resultados para municipio PDET ECV* (No. 4).
- DNER-ME 256, 6 (1994).
- Dutu, A., Barbu-Mocanescu, D., Niste, M., Spatarelu, I., Yamazaki, Y., & Kober, D. (2020). In-plane static tests on a structural timber frame system proposal (TRAROM) inspired from traditional architecture and using local materials. *Engineering Structures*, 212(March), 110491. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110491>
- Duțu, A., Niste, M., & Spatarelu, I. (2018). In-Plane Static Cyclic Tests on Traditional Romanian Houses' Walls. *16 European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE)*, 1–12.

- Dutu, A., Niste, M., Spatarelu, I., Dima, D. I., & Kishiki, S. (2018). Seismic evaluation of Romanian traditional buildings with timber frame and mud masonry infills by in-plane static cyclic tests. *Engineering Structures*, *167*(March), 655–670. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.062>
- E2126-11, A. (2012). *Standard Test Methods for Cyclic ( Reversed ) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for. C*, 1–15. <https://doi.org/10.1520/E2126-11.2>
- Escobar, G. D., Castillo, J. E. R., & Robledo, J. F. M. (1999). Al Bahareque le fue muy bien = The Bahareque\* made it very well. *Desde El Eje Cafetero de Colombia*, *1*(8). <http://www.bdigital.unal.edu.co/1906/>
- Garcia, L. E., & Fierro, E. A. (2005). *Dinamica Estructural- Mario Paz.pdf* (p. 333).
- González, M. J., & García Navarro, J. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, *41*(7), 902–909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Guo, T., Yang, N., Zhou, H., & Wang, S. (2022). In-plane behavior of Chuan-Dou style wooden frames with infill under cyclic loading. *Structures*, *41*, 1311–1328. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.058>
- Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., & Morel, J. C. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment*, *106*, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- Herrera, J. C. (2008). Comportamiento estructural de pórticos en guadua angustifolia, rigidizados mediante paneles prefabricados de bahareque encementado y tiras de guadua. In *Universidad nacional de colombia*.
- Huang, H., Wu, Y., Li, Z., Sun, Z., & Chen, Z. (2018). Seismic behavior of Chuan-Dou type timber frames. *Engineering Structures*, *167*, 725–739. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.072>
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. In *Instituto Nacional de Vías*

- Documentos Técnicos*. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>
- ISO 22157, 29 (2019).
- Liang, W., Lan, J., Zou, Z., Zhu, Z., Zhai, S., Mo, Y., Li, X., Meng, S., & Cai, Y. (2022). Seismic behavior of Chuan-dou timber frames with different infilled walls. *Construction and Building Materials*, 327, 126906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126906>
- Meng, X., Yang, Q., Wei, J., & Li, T. (2018). Experimental investigation on the lateral structural performance of a traditional Chinese pre-Ming dynasty timber structure based on half-scale pseudo-static tests. *Engineering Structures*, 167(79), 582–591. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.077>
- Ministerio de vivienda. (2024). *Política de vivienda rural*. Política de Vivienda Rural. c
- Ministerio de Vivienda. (2020). *Resolución No. 0536 del 19 de octubre de 2020. Política pública de vivienda de interes social rural*. 0536, 1–83. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-11/anexo-i.-politica-publica-de-vivienda-de-interes-social-rural.pdf>
- Muñoz Robledo, J. F. (2010). *Tipificación de los sistemas constructivos de “bahareque” en el Paisaje Cultural Cafetero de Colombia*. 1–101. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/64733/9789588280400.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Microzonificación Sísmica de Cali, (2005).
- NSR-10, T.-E. (2010). Min. Ambiente vivienda y desarrollo territorial Título E - NSR-10. In *NSR-10*.
- Pablo, J., Soto, A., & Ríos, O. (2014). *Bahareque como ejemplo de sostenibilidad, una herencia que se transforma*. [Universidad de Menizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2330>
- Presidencia de la república. (2019). Plan nacional de desarrollo. In *Cultura Educación Y Sociedad* (Vol. 10, Issue 1).
- Real, A., Otálvaro, I., & Madera, I. (n.d.). *El bahareque como oportunidad de construcción sostenible en el área rural colombiana para una vivienda adecuada Wattle and daub as an*

*opportunity for sustainable construction in the Colombian rural area for adequate housing.*  
xx(x), 1–10.

- Servicio Nacional de Aprendizaje. (2015). Construcción de muros en Tapia y Bahareque. In *Albañilería en restauración de edificaciones* (Vol. 7, Issue 1).  
[https://www.researchgate.net/publication/269107473\\_What\\_is\\_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars\\_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625](https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625)
- Silva, M. F., & López, L. F. (2000). *Comportamiento sismo-resistente de estructuras en bahareque*  
*Mechanical properties characterization of Philippine Bamboos View project.*  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35230.95045>