

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA  
FUERA DEL PLANO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA, NO  
REFORZADA Y REFORZADA CON FRANJAS DE MALLAS  
ELECTROSOLDADAS Y MORTERO**

**JOSE FERNANDO BAENA URREA**

**Trabajo de grado para optar al título de Magíster en ingeniería**

**Directores:**

**PhD Ana Beatriz Acevedo Jaramillo**

**PhD Juan Diego Jaramillo Fernández**



**UNIVERSIDAD EAFIT  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2019**

*A mis padres, Marco Antonio Baena y Gloria Elena Urrea, por su apoyo, amor y sabiduría.*

*A mi hermano Pipe que estará por siempre en mi vida y lo recordaré hasta el último suspiro*

*A mi hermano Loren por ser un excelente hermano*

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos aquellos autores que fueron de gran utilidad en el desarrollo de este trabajo (Ver bibliografía).

A esas otras personas que me ayudaron en el proceso de mi formación como ingeniero y como persona.

Al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) por la financiación de los ensayos experimentales y por su empeño en disminuir el riesgo sísmico de las ciudades del AMVA.

Especialmente a Ana Beatriz Acevedo Jaramillo por la oportunidad de trabajar en este proyecto y por ser guía en el desarrollo del proyecto.

A Juan Diego Jaramillo por ser guía en el desarrollo del proyecto.

A Juan Carlos Botero por su ayuda en la instrumentación de los muros, por prestarme su oficina y por las gratas conversaciones de ingeniería y política.

A la Ladrillera San Cristóbal por donar los ladrillos para este proyecto y por todo el apoyo que ha dado a la investigación de viviendas de mampostería no reforzada.

A la Fundación Build Change (BC) por sus opiniones durante el proyecto.

# CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	2
1.2 Objetivos del proyecto .....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Marco de referencia.....	4
1.3.1 Modelos teóricos .....	5
1.3.2 Ensayos con unidades de mampostería de ladrillo cocido y muros con una capa de ladrillos.....	5
1.3.3 Ensayos con unidades de mampostería de otros materiales y otras configuraciones .....	6
1.3.4 Investigaciones de reforzamiento de muros de mampostería no reforzada para cargas fuera del plano .....	7
1.4 Metodología.....	9
2. DESCRIPCIÓN DE LAS VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ .....	10
2.1 Muestra poblacional.....	10
2.2 Análisis estadístico .....	13
2.2.1 Condiciones de apoyo .....	17
3. ELECCIÓN DE LOS ENSAYOS .....	18
3.1 Limitaciones del proyecto .....	18
3.2 Elección de los ensayos en mesa vibradora .....	18
3.2.1 Longitud .....	18

3.2.2	Altura .....	19
3.2.3	Espesor .....	19
3.2.4	Relación altura-espesor (esbeltez) .....	19
3.2.5	Condiciones de apoyo .....	20
3.2.6	Relación longitud-altura .....	21
3.2.7	Presencia de carga axial .....	22
3.2.8	Calidad del mortero .....	22
3.2.9	Metodologías de reforzamiento .....	23
4.	MODELO TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS POR MEDIO DE FRANJAS DE MALLAS ELECTROSOLDADAS Y MORTERO, Y SOMETIDOS A CARGAS FUERA DE SU PLANO .....	24
5.	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO .....	28
5.1	Descripción de los especímenes .....	28
5.2	Diseño y construcción del muro y del montaje .....	29
5.2.1	Diseño del montaje .....	29
5.2.2	Construcción de los especímenes .....	34
5.3	Equipos e instalaciones empleados en los ensayos .....	36
5.4	Caracterización de los materiales .....	36
5.4.1	Resistencia del mortero .....	36
5.4.2	Resistencia a compresión de la mampostería .....	38
6.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....	40
6.1	Resultados del ensayo 1-T3-7-328-V-S .....	41
6.2	Resultados del ensayo 2-T3-7-408-V-S .....	43
6.3	Resultados del ensayo 3-T2-7-328-0-S .....	45
6.4	Resultados del ensayo 4-T2-7-408-0-S .....	47

6.5	Resultados del ensayo 5-T1-7-325-0-S .....	49
6.6	Resultados del ensayo 6-T1-1-325-0-S .....	51
6.7	Resultados del ensayo 7-T2-1-408-0-S .....	52
6.8	Resultados del ensayo 8-T1-1-325-0-R .....	55
6.9	Resultados del ensayo 9-T2-1-408-0-R .....	57
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	62
7.1	Influencia de la carga axial .....	62
7.2	Influencia de la calidad del mortero .....	64
7.3	Comportamiento de los muros reforzados con franjas de mallas electrosoldadas y mortero .....	65
7.4	Comparación con los ensayos presentes en la literatura .....	67
7.4.1	Comparación de los resultados de muros de mampostería no reforzada expuestos a aceleraciones fuera del plano .....	67
7.4.2	Comparación de los resultados de muros de mampostería reforzada con malla electrosoldada y mortero. ....	71
8.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	74
9.	REFERENCIAS .....	77
	ANEXO 1 .....	81
	ANEXO 2 .....	85

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Ejemplo de medición de las características de la muestra poblacional de muros .....	12
Tabla 2.2 Ejemplo de medición de las características de la muestra poblacional de muros .....	12
Tabla 2.3 Parámetros estadísticos de los muros estudiados .....	13
Tabla 2.4 Resultados prueba de ajuste Kolmogórov-Smirnov para las longitudes de los muros .....	16
Tabla 3.1 Longitud promedio de los cuartiles de la muestra de muros .....	19
Tabla 3.2 Resistencia teórica de los muros.....	21
Tabla 3.3 Parámetros para el cálculo de la resistencia del muro .....	22
Tabla 5.1 Descripción de los ensayos realizados.....	28
Tabla 5.2 Instrumentación del ensayo .....	34
Tabla 5.3 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros de mortero. Ensayos 1-T3-7-328-V-S, 2-T3-7-408-V-S, 3-T2-7-328-0-S, 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S .....	37
Tabla 5.4 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros de mortero. Ensayo 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S.....	37
Tabla 5.5 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros de mortero. Ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R.....	37
Tabla 5.6 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros del revoque utilizado en las franjas de reforzamiento. Ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R.....	38
Tabla 5.7 Resultados ensayos de resistencia a la compresión de la mampostería (f'm)..	39
Tabla 6.1 Resumen de los ensayos experimentales .....	40
Tabla 7.1 Resumen de las aceleraciones resistidas por los muros de cada ensayo .....	62
Tabla 7.2 Aceleraciones esperadas en las principales ciudades del país para un tipo de perfil D y E.....	67
Tabla 7.3 Ensayos de muros de mampostería no reforzada sujetos a cargas fuera del plano .....	69

Tabla 7.4 Ensayos de muros de mampostería no reforzada sujetos a cargas fuera del plano .....	70
Tabla 7.5 Resultados experimentales Kadam et al., (2014) .....	71
Tabla 7.6 Resultados experimentales Shermi y Duber, (2017) .....	72
Tabla 8.1 Características geométricas y condiciones de apoyo de los muros ensayados	74
Tabla 10.1 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 1-T3-7-328-V-S .....	81
Tabla 10.2 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 2-T3-7-408-V-S .....	81
Tabla 10.3 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 3-T2-7-328-0-S .....	82
Tabla 10.4 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 4-T2-7-408-0-S .....	82
Tabla 10.5 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 5-T1-7-325-0-S .....	83
Tabla 10.6 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 6-T1-1-325-0-S .....	83
Tabla 10.7 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 7-T2-1-408-0-S .....	83
Tabla 10.8 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 8-T1-1-325-0-R .....	84
Tabla 10.9 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 9-T2-1-408-0-R .....	84

pág.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación de la muestra poblacional de edificaciones .....	10
Figura 2.2 Ejemplo de identificación de las características de los muros .....	12
Figura 2.3 Histograma de los datos registrados .....	15
Figura 2.4 Histograma de la longitud de los muros y distribución de probabilidad más ajustada.....	16
Figura 2.5 Condiciones de apoyo de los muros .....	17
Figura 3.1 Condiciones de apoyo de los muros de mampostería no reforzada .....	20
Figura 4.1 Reforzamiento de viviendas de adobe no reforzadas por medio de franjas de mallas electrosoldadas (San Bartolomé y Quiun, 2015) y (San Bartolomé y Quiun, 2012) .....	24
Figura 4.2 Modelo de resistencia para las trabes entre los muros de mampostería .....	27
Figura 5.1 Tipo de conexiones utilizadas en el proyecto .....	29
Figura 5.2 Diagrama de reacciones de los ensayos.....	30
Figura 5.3 Esquemas de los ensayos .....	31
Figura 5.4 Esquema de los ensayos .....	32
Figura 5.5 Esquema de los ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R.....	32
Figura 5.6 Posición del acelerómetro y el LVDT a la mitad de la altura del muro ( $H = h/2$ ) .....	33
Figura 5.7 Ubicación del acelerómetro en la base de la mesa .....	33
Figura 5.8 Construcción de los ensayos 1-T3-7-328-V-S (frente) y 2-T3-7-408-V-S (fondo) .....	34
Figura 5.9 Construcción de los ensayos 1-T3-7-328-V-S.....	34
Figura 5.10 Construcción de los ensayos 2-T3-7-408-V-S.....	35
Figura 5.11 Construcción de los ensayos 6-T1-1-325-0-S (frente) y 7-T2-1-408-0-S (fondo) .....	35

Figura 5.12 Construcción en el ensayo 8-T1-1-325-0-R.....	35
Figura 5.13 Construcción de las franjas en el ensayo 9-T2-1-408-0-R.....	36
Figura 5.14 Ensayo a compresión de muretes de mampostería .....	38
Figura 6.1 Estado del muro luego del ensayo 1-T3-7-328-V-S.....	41
Figura 6.2 Estado del muro luego del ensayo número 1-T3-7-328-V-S.....	42
Figura 6.3 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 1-T3-7-328-V-S.....	42
Figura 6.4 Estado del muro luego del ensayo número 2-T3-7-408-V-S.....	43
Figura 6.5 Estado del muro luego del ensayo número 2-T3-7-408-V-S.....	44
Figura 6.6 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 2-T3-7-408-V-S.....	44
Figura 6.7 Estado del muro luego del ensayo 3-T2-7-328-0-S.....	45
Figura 6.8 Estado de la traba luego del ensayo 3-T2-7-328-0-S.....	46
Figura 6.9 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 3-T2-7-328-0-S.....	46
Figura 6.10 Conexión lateral luego de la falla del ensayo 4-T2-7-408-0-S.....	47
Figura 6.11 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S (vista diagonal) .....	48
Figura 6.12 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S (vista norte) .....	48
Figura 6.13 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S.....	49
Figura 6.14 Montaje del ensayo número 5-T1-7-325-0-S.....	49
Figura 6.15 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 5-T1-7-325-0-S (vista norte) .....	50
Figura 6.16 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 5-T1-7-325-0-S (vista sur).	50
Figura 6.17 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 5-T1-7-325-0-S (vista este)	51
Figura 6.18 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 6-T1-1-325-0-S (vista sur).	52
Figura 6.19 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 6-T1-1-325-0-S.....	52

Figura 6.20 Momento de la falla del muro del ensayo 7-T2-1-408-0-S (vista norte) .....	53
Figura 6.21 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 7-T2-1-408-0-S .....	54
Figura 6.22 Apariencia del muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R.....	55
Figura 6.23 Daño local del muro antes del colapso ensayo 8-T1-1-325-0-R.....	56
Figura 6.24 Momento de la falla del muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R.....	56
Figura 6.25 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R.....	57
Figura 6.26 Apariencia del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R.....	58
Figura 6.27 Daño local del muro luego del ensayo 9-T2-1-408-0-R .....	59
Figura 6.28 Momento de la falla del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R, vista sur .....	59
Figura 6.29 Momento de la falla del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R, vista norte .....	60
Figura 6.30 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R.....	60
Figura 7.1 Comparación de la curva desplazamiento-aceleración entre los ensayos número 1-T3-7-328-V-S y 3-T2-7-328-0-S.....	63
Figura 7.2 Comparación de la curva desplazamiento-aceleración entre los ensayos número 2-T3-7-408-V-S y 4-T2-7-408-0-S.....	63
Figura 7.3 Comparación de la curva desplazamiento-aceleración entre el ensayo número 4-T2-7-408-0-S y el ensayo número 7-T2-1-408-0-S .....	64
Figura 7.4 Comparación entre curvas desplazamiento versus aceleración ensayos 6-T1-1-325-0-S y 8-T1-1-325-0-R.....	65
Figura 7.5 Comparación entre curvas desplazamiento versus aceleración ensayos 7-T2-1-408-0-S y 9-T2-1-408-0-R.....	66
Figura 11.1 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 1-T3-7-328-V-S.	85
Figura 11.2 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 2-T3-7-408-V-S.	86
Figura 11.3 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 3-T2-7-328-0-S .	87
Figura 11.4 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 4-T2-7-408-0-S .	88
Figura 11.5 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 5-T1-7-325-0-S .	89

Figura 11.6 Registro del acelerómetro 507 durante el ensayo número 6-T1-1-325-0-S ...	89
Figura 11.7 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 7-T2-1-408-0-S .	90
Figura 11.8 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 8-T1-1-325-0-R .	91
Figura 11.9 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 9-T2-1-408-0-R .	92

## RESUMEN

Las estructuras de mampostería no reforzada (MUR) han presentado daños importantes y han causado buena parte de las muertes durante eventos sísmicos alrededor del mundo. Estas estructuras alcanzan entre el 45 y el 70 % de las construcciones en las principales ciudades de Colombia: Medellín, Bogotá y Cali, según Acevedo *et al.* (2017). Teniendo en cuenta que la mayoría de la población de Colombia se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta o intermedia según la norma sismo resistente actual (NSR,10; AIS, 2010) y considerando la vulnerabilidad de estas estructuras, se hace necesario estudiarlas en el contexto colombiano para la adecuada gestión del riesgo sísmico de las ciudades y del país. La mezcla entre la vulnerabilidad de estas estructuras y la amenaza sísmica del país hace que se posea un riesgo sísmico alto. La única forma viable de disminuir este riesgo sísmico es desarrollando metodologías de reforzamiento que hagan estas estructuras existentes menos vulnerables. En la literatura, el comportamiento de los muros que componen estas viviendas se ha dividido en el comportamiento fuera del plano y en el plano. Este trabajo buscó evaluar la respuesta fuera del plano de 9 especímenes de muros de mampostería no reforzada y muros reforzados bajo la metodología de franjas de mallas electrosoldadas y mortero, mediante ensayos en la mesa vibradora de la Universidad EAFIT. La caracterización de los materiales, los ensayos realizados en la mesa vibradora, los resultados experimentales, el análisis de los resultados y comparaciones con modelos teóricos y otros resultados experimentales son descritos. Los resultados muestran que los muros de mampostería no reforzada tienen un buen desempeño ante cargas fuera del plano cuando están sometidos a cargas axiales; por otro lado, el reforzamiento de estos muros por medio de franjas de mallas electrosoldada y mortero puede hacer que la resistencia fuera del plano aumente en al menos 2,5 veces en muros sin cargas axiales.

Palabras claves: mampostería no reforzada, comportamiento fuera del plano, ensayos en mesa vibradora

## **ABSTRACT**

Unreinforced masonry structures (MUR) have presented significant damage and have caused most of the deaths during seismic events around the world. These structures reach between 45 and 70% of the buildings in the main cities of Colombia: Medellín, Bogotá and Cali, according to Acevedo *et al.* (2017). Considering that most of the population of Colombia live in high or intermediate seismic hazard zones (NSR-10; AIS, 2010) and the vulnerability of these structures, it is necessary to study these structures for the adequate management of the seismic risk of the cities and the country. The seismic hazard and vulnerability in the country implies a seismic risk that must be considered. The only viable way to reduce this seismic risk is developing reinforcement methodologies that make this kind of structures less vulnerable. The behavior of the walls has been divided in the literature into out-of-plane and in-plane behavior. This research aims to evaluate the out-of-plane behavior of 9 unreinforced masonry walls and reinforced masonry walls with welded wire mesh (WWM), in a shaking table test. The material characterization tests, test set-up, main results, comparison with theoretical models and comparison with other tests are presented. Results show that the unreinforced masonry walls have a good performance against out-of-plane loads when subjected to axial loads; on the other hand, the reinforcement of these walls by means of welded wire mesh strips and mortar can increase the out of plane resistance by at least 2.5 times in walls without axial loads.

Keywords: unreinforced masonry, out-of-plane behavior, shaking table test

# 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del comportamiento de estructuras de mampostería no reforzada ha suscitado muchos estudios a lo largo de los años debido a que hay una presencia importante de estas estructuras alrededor del mundo, incluyendo zonas con amenaza sísmica elevada. Sin embargo, aún existen vacíos en el entendimiento de la respuesta de estos sistemas estructurales ante sismos gracias a la presencia de discontinuidades y la anisotropía en los materiales que los conforman.

Debido a su comportamiento frágil e incierto, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10; AIS,2010) prohíbe la utilización de muros no reforzados como elementos estructurales y no estructurales en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia. Empero, la realidad es otra porque la proporción de estas estructuras en las tres principales ciudades de Colombia (Medellín, Bogotá y Cali) representan entre el 45% y 70% de todas las construcciones (Acevedo *et al.*, 2017).

La presencia de estructuras de mampostería no reforzada en las grandes urbes ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia, ha generado alertas en el país acerca de la importancia de estudiarlas en el contexto de las construcciones sismorresistentes colombianas y regionales. Este estudio hizo parte de un proyecto conjunto entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y la Universidad EAFIT, con la colaboración de la fundación Build Change (BC), cuyo propósito fue aunar esfuerzos para la evaluación experimental del comportamiento de muros de mampostería no reforzada y reforzamiento de viviendas con este sistema estructural, en el marco del plan metropolitano de gestión del riesgo sísmico. Adicionalmente, este proyecto fue una continuación de esfuerzos que ha hecho la Universidad EAFIT, sus investigadores y otras instituciones en el transcurso de los años para evaluar la exposición, vulnerabilidad y riesgo sísmico de las viviendas de mampostería no reforzada en el contexto de las construcciones colombianas y regionales.

Este estudio presenta la evaluación experimental por fuera del plano de nueve muros de mampostería no reforzada o reforzada por medio del método de franjas de mallas electrosoldadas y mortero. Adicionalmente, se presenta información acerca de estudios anteriores, modelos teóricos existentes, el proceso de elección de los muros ensayados, el diseño del montaje del laboratorio, construcción de los ensayos, análisis de resultados y conclusiones y recomendaciones.

Este estudio recolecta información que será útil en el entendimiento de los muros de mampostería no reforzada sometidos a cargas por fuera del plano con condiciones de apoyo que poco se han estudiado.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sistema estructural de muros de mampostería no reforzada es un tipo de sistema estructural muy común en Colombia; en este sistema estructural los muros se encargan de resistir tanto las fuerzas verticales como las fuerzas laterales. Los sistemas de mampostería no reforzada están compuestos por un conjunto de muros hechos de piezas de arcilla u otros materiales que se encuentran unidas con mortero. Los muros carecen de cuantías de acero longitudinal o transversal, lo que provoca que su comportamiento sea frágil. En el desarrollo de este trabajo se referirá a este sistema como MUR, siguiendo la taxonomía de la Fundación GEM (Brzev *et al.*, 2013), que define la nomenclatura según el material del sistema (mampostería: *masonry*) y el tipo de material (no reforzada: *unreinforced*). Según Acevedo *et al.* (2017), las estructuras de mampostería no reforzada representan entre el 45% y el 70% de todas las estructuras en las ciudades de Medellín, Bogotá y Cali. Este tipo de estructuras son las que han tenido más daños y provocado más muertes durante los sismos; por ende, es preocupante que la mayoría de las edificaciones en el país y en el área metropolitana del Valle de Aburrá tengan este tipo de sistema debido a que hay un riesgo sísmico alto gracias a la combinación entre la vulnerabilidad de estas estructuras y la amenaza sísmica del país.

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10; AIS, 2010) prohíbe la utilización de este tipo de sistema estructural para zonas de amenaza sísmica alta o intermedia porque ha mostrado ser vulnerable; sin embargo, a pesar de la prohibición se observa la existencia y la presencia de este tipo de sistemas dentro de las urbes colombianas. Adicionalmente, de cada 5 viviendas nuevas que se construyen hoy en Colombia 3 tienen “origen informal”, según el Centro de Estudios de la Construcción y el Desarrollo Urbano y Regional (CENAC). La existencia de estas viviendas presenta un reto para el Estado y la sociedad porque su vulnerabilidad y la amenaza sísmica del territorio traen un riesgo sísmico alto para las personas que habitan estas estructuras. La amenaza sísmica, que se refiere a la posibilidad de que ocurra un sismo de cierta magnitud en un periodo de tiempo, depende de la ubicación de la zona bajo estudio por lo que es difícil cambiarla; en conclusión, la única forma de disminuir el riesgo sísmico es hacer estructuras menos vulnerables.

Para disminuir la vulnerabilidad de las viviendas de mampostería no reforzada existentes se podría pensar en la opción de rehabilitarlas como lo contempla la NSR-10 (AIS, 2010). Sin embargo, esta rehabilitación implica aumentar la capacidad sísmica de estas viviendas a niveles semejantes a los de una vivienda nueva, lo que conlleva a invertir altas sumas de dinero. Al considerar que la mayor parte de estas viviendas corresponden a viviendas informales con habitantes de bajo poder adquisitivo, se concluye que la alternativa de reforzar la totalidad de las viviendas con los requisitos de la NSR-10 es inviable.

Conociendo la vulnerabilidad de estas estructuras, la amenaza sísmica del país y la cantidad de estructuras que existen, recientemente la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes del Gobierno Nacional aprobó el “Manual de Evaluación y Reforzamiento Sísmico para Reducción de Vulnerabilidad en Viviendas” (Build Change, 2015). Este manual tiene como objetivo aportar parámetros para evaluar la

resistencia ante sismos de viviendas de mampostería no reforzada que presentan o no daños o reparaciones. El procedimiento descrito en el manual ayuda a identificar deficiencias o daños estructurales e indica técnicas de reparación o reforzamiento para mejorar el desempeño estructural de las viviendas. Las técnicas de reforzamiento descritas en el manual se plantearon para aumentar la resistencia en el plano de muros de mampostería no reforzada, pero no se ha investigado, en el contexto de las construcciones colombianas, técnicas de reforzamiento para aumentar el desempeño de muros de mampostería no reforzada ante cargas por fuera del plano. Este estudio ahondó en el comportamiento y reforzamiento fuera del plano de muros de mampostería no reforzada en el contexto de las construcciones colombianas.

Los muros de mampostería no reforzada presentan altas rigideces en el plano, pero por fuera del plano son relativamente flexibles. El problema radica en que perder un muro por acciones fuera del plano, implica a la vez la pérdida del muro en el plano donde es relativamente eficiente para resistir esfuerzos. En conclusión, es importante probar estrategias de reforzamiento que permitan la reducción de la vulnerabilidad de estructuras de mampostería no reforzada a cargas fuera del plano. Este trabajo estudió el comportamiento por fuera del plano de muros de mampostería no reforzada y reforzada bajo una metodología que consiste en franjas de mallas electrosoldadas y mortero.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto.

### **1.2.1 Objetivo General**

Comparar la respuesta fuera del plano de muros de mampostería, no reforzada y reforzada con mortero y franjas de mallas electrosoldadas, con dimensiones y condiciones de apoyo específicas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- ❖ Analizar información sobre las condiciones típicas de los muros de mampostería no reforzada en el área metropolitana del Valle de Aburrá
- ❖ Evaluar experimentalmente la respuesta fuera del plano de muros de mampostería no reforzada.
- ❖ Identificar una metodología de reforzamiento económica y de baja complejidad técnica.
- ❖ Evaluar experimentalmente la respuesta fuera del plano de muros de mampostería reforzada con la metodología propuesta.

### 1.3 MARCO DE REFERENCIA

El análisis del comportamiento fuera del plano de muros de mampostería no reforzada ha sido estudiado principalmente en las últimas cuatro décadas mediante modelos teóricos y experimentales. El ABK (1981) fue uno de los primeros estudios y probablemente uno de los más extensos en cuanto a cantidad de ensayos. Esta investigación se dedicó a estudiar el comportamiento sísmico y rehabilitación y reforzamiento de este tipo de estructuras tanto en el plano como fuera del plano en los Estados Unidos; este estudio fue la base de los estándares de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) para la rehabilitación de estas estructuras. El interés en este tipo de estructuras que no sólo son frecuentes en Latinoamérica, sino también en la mayoría de las estructuras antiguas de Europa, Estados Unidos y Asia, ha llevado a la reevaluación de las metodologías basadas en fuerzas utilizadas comúnmente para modelar estas estructuras. Priestley (1985) propuso relaciones entre las demandas de desplazamiento y las propiedades mecánicas del muro, las cuales fueron aplicadas en varias investigaciones como Zoutenbier (1986) el cual modeló los muros como sistemas de varios grados de libertad, y Blaikie y Spurr (1992) que realizaron modelos numéricos de estabilidad de los muros ante cargas fuera del plano. Estas metodologías luego fueron ampliadas a partir de análisis basados en desplazamientos, realizando modelos teóricos como las relaciones trilineales expuestas en Melis (2002), Doherty *et al.* (2002) y Griffith (2003). Además de las metodologías basadas en desplazamientos se han realizado otros estudios teóricos a partir de sistemas de un grado de libertad, sistemas de múltiples grados de libertad y análisis cronológicos como los realizados en Shawa *et al.* (2001) y Simsir *et al.* (2004). Adicionalmente, se han realizado otros modelos que predicen la capacidad de los muros a aceleraciones fuera del plano del muro como los realizados por Jaramillo (2002) y Jaramillo *et al.* (2008).

A lo largo de las últimas décadas se han realizado diferentes ensayos prácticos que buscan evaluar el comportamiento fuera del plano de los muros ante las cargas sísmicas y que buscan conocer la influencia de ciertos factores en el comportamiento de los muros de mampostería no reforzada como: las condiciones de apoyo, la presencia de carga axial, la rigidez del diafragma y la relación de esbeltez y longitud-altura. Además, se han hecho ensayos de muros de mampostería no reforzada con dos capas de ladrillos que son muy comunes en Norteamérica y Europa. Estos ensayos se encuentran descritos en investigaciones hechas por Ehsani y Velazquez (1999), Shawa *et al.* (2001), Jaramillo (2002), Griffith *et al.* (2003), Simsir *et al.* (2004), Dazio (2008), Jaramillo *et al.* (2008), Derakhsham y Ingham (2011), Dolatshahi *et al.* (2015), entre otros.

Aunque en las últimas décadas se ha venido investigado intensamente en el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería no reforzada, no hay muchos estudios realizados en las construcciones colombianas y tampoco hay estudios que demuestren la eficacia de los métodos de reforzamiento y rehabilitación de este tipo de estructuras a cargas fuera del plano. Los ensayos realizados en este proyecto buscan conocer el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería no reforzada típicos en el país, especialmente aquellos presentes en el Área Metropolitana del Valle de Aburra,

y muros de mampostería simple (no reforzada) reforzados con franjas de mallas electrosoldadas y mortero.

A continuación, se describen brevemente algunas referencias sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería no reforzada agrupadas según tipo de estudio (teórico o ensayos) y metodología de reforzamiento.

### **1.3.1 Modelos teóricos**

Doherty *et al.* (2002) plantean un modelo de resistencia para muros de mampostería no reforzada que se le conoce en este documento como mecanismo de flexión vertical. Este estudio afirma que la resistencia fuera del plano de los muros es mayor cuando los ensayos son dinámicos que cuando son cuasi estáticos. Este fenómeno se debe a que en los ensayos dinámicos aparece una reserva de resistencia debida a mecanismos de estabilidad que presentan las piezas, esta estabilidad depende principalmente de la carga axial sobre el muro, su peso propio y la esbeltez.

Jaramillo (2002) presenta un modelo teórico que plantea un sistema de resistencia de esfuerzos en donde se tiene en cuenta la resistencia a la flexión alrededor del eje vertical y la resistencia al corte en los ejes horizontales, sistema que se conoce como el mecanismo de flexión horizontal. Los modelos anteriores como los descritos en Doherty *et al.* (2002) y Griffith (2003) plantean que el mecanismo de resistencia fuera del plano depende de efectos en arco en la dirección vertical o en la dirección vertical y horizontal.

Osorio (2018) presenta un modelo teórico que pretende representar el comportamiento de muros de mampostería no reforzado cuando actúan simultáneamente los mecanismos de flexión vertical y flexión horizontal. El modelo teórico se desarrolla utilizando el método de las líneas de fluencia y el método del trabajo virtual con el propósito de encontrar la aceleración máxima que es capaz de soportar un muro determinado.

### **1.3.2 Ensayos con unidades de mampostería de ladrillo cocido y muros con una capa de ladrillos**

Jaramillo (2002), además de proponer un modelo de comportamiento de muros de mampostería no reforzada, compara los resultados teóricos del modelo con ensayos experimentales obteniendo resultados similares.

Simsir *et al.* (2004) presentaron una comparación entre modelos teóricos basados en sistemas de un grado de libertad y múltiples grados de libertad, y resultados experimentales. La investigación analizó tres muros con diferentes cargas axiales que presentaban apoyo en la parte superior a través de un diagrama flexible o rígido. El estudio comparó los modelos teóricos con los ensayos experimentales, en donde se encontró que estos modelos teóricos pueden predecir con suficiente exactitud los resultados experimentales. Adicionalmente, los autores concluyen sobre las diferencias que existen entre la ubicación de las grietas cuando el ensayo es cuasi estático a cuando es dinámico; es decir, para muros con características geométricas parecidas y condiciones de apoyo iguales, los muros

presentan una grieta principal a la mitad de la altura cuando el ensayo es cuasi estático y a aproximadamente al 70% de la altura cuando el ensayo es dinámico.

Jaramillo *et al.* (2008) plantearon un mecanismo de resistencia que integra los mecanismos de resistencia de flexión vertical y flexión horizontal. El estudio afirmó que la resistencia real del muro es la más alta entre la resistencia que aporta los dos mecanismos; esta hipótesis fue probada a partir de ensayos experimentales que consistían en 7 muros con distintas condiciones de borde y distintos tipos de ladrillo (arcilla y concreto). Los resultados experimentales se ajustaron a las predicciones teóricas.

Dazio (2008) realizó una investigación de muros de mampostería no reforzada con diferentes condiciones de borde en la parte inferior y superior del muro, que variaban entre una condición simplemente apoyada y empotrada. Los muros tenían altura y ancho fijos, mientras que el espesor y la carga axial variaban. La aceleración, impuesta por la mesa vibradora, fue incremental hasta que el muro alcanzaba cierto desplazamiento límite. Los resultados muestran que las condiciones de borde pueden tener un efecto determinante en el comportamiento y estabilidad del muro de mampostería.

Furtado *et al.* (2016) realizaron una investigación de muros de mampostería no reforzada enmarcados en pórticos. La investigación buscaba evaluar el comportamiento fuera del plano de muros que tenían diferentes características geométricas y que presentaban un previo daño o no causados por cargas en el plano. Los resultados mostraron que la capacidad y rigidez fuera del plano es afectada por daños previos en el plano.

### **1.3.3 Ensayos con unidades de mampostería de otros materiales y otras configuraciones**

Penner *et al.* (2015) presentaron los resultados de la evaluación fuera del plano de muros de mampostería no reforzada conectados a diafragmas flexibles. El estudio consistió en 5 muros de ladrillo sólido de arcilla que fueron sometidos a cargas fuera del plano por medio de una mesa vibradora. Los muros presentaban varias capas de ladrillos, típicos en lugares con estaciones. Cuatro muros presentaron una grieta horizontal a la mitad de la altura y uno presentó una grieta horizontal a 0,74 veces la altura del muro. Este estudio indica que los muros conectados con diafragmas más flexibles soportan aceleraciones más altas antes de colapsar; sin embargo, esta conclusión debe ser tomada con precaución debido a que la cantidad de ensayos es baja.

Derakhsham *et al.* (2011) ensayaron 6 muros de mampostería no reforzada sujetos a cargas fuera del plano mediante bolsas de aire con el propósito de conocer su comportamiento luego del agrietamiento. Los muros de mampostería estaban compuestos por dos o tres capas de ladrillos; la altura de los muros variaba entre 2000 mm y 4100 mm y los muros presentaban apoyos en la parte superior e inferior, la parte superior permitía la rotación. Los resultados experimentales mostraron que el modelo teórico subestima la altura de agrietamiento en un 16% en promedio, la resistencia sin fisura estaba dentro del 24% de los resultados teórico y la máxima resistencia de los muros era, en promedio, el 83% de lo que predice el modelo teórico.

Derakhsham *et al.* (2018) ensayaron 8 muros de mampostería no reforzada a cargas fuera del plano en una estructura existente que fue construida en la década de los años sesenta en Australia. De los 8 muros, 4 de ellos tenían una sola capa de ladrillos y los otros 4 presentaban doble capa de ladrillo con cavidad. Los muros contaban con detalles constructivos como ventanas, puertas y otros detalles como espaciamiento irregular de la mampostería. El objetivo del estudio fue comparar el efecto de estos detalles cuando se comparan con modelos teóricos basados en energía, trabajo virtual y equilibrio. Los resultados muestran que con los modelos teóricos presentados se puede predecir con bastante exactitud la resistencia del muro.

### **1.3.4 Investigaciones de reforzamiento de muros de mampostería no reforzada para cargas fuera del plano**

Los muros de mampostería no reforzada han presentado múltiples daños durante sismos previos, los cuales se pueden agrupar en los siguientes tipos:

- Colapso fuera del plano
- Grietas y pérdida de resistencia a esfuerzos cortantes y de flexión en el plano
- Pérdida entre la sujeción de los muros y el diafragma
- Colapso o daños en las esquinas

A continuación, se presentan estudios de reforzamiento de muros de mampostería no reforzada que mejoran su comportamiento fuera del plano.

#### *Metodologías de reforzamiento basadas en mallas electrosoldadas y mortero*

San Bartolomé *et al.* (2004) realizaron un estudio, financiado por la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ, por sus siglas en alemán), en donde ensayaron diferentes metodologías para reforzar las viviendas de adobe en Perú. El estudio concluyó que la mejor metodología, entre las que ensayaron, era reforzar los muros con franjas de mallas electrosoldadas y mortero en los puntos críticos de la estructura. El estudio incluyó el reforzamiento de viviendas reales por medio de esta metodología. Estas viviendas fueron expuestas al sismo del 23 de junio en Perú de 2001 ( $M_w = 8.4$ ) y al sismo del 15 de agosto de 2007 ( $M_w = 8.0$ ). Se resalta para el sismo de 2007 que una estación cercana al epicentro ubicada en Parcona registró una aceleración máxima de 0,5 g según Bartolomé y Quiun (2012). Ambos estudios indican que las viviendas reforzadas con franjas de mallas electrosoldadas y mortero tuvieron buenos comportamientos, mientras que las viviendas vecinas sufrieron daños significativos o colapsaron.

Kadam *et al.* (2014) investigaron la eficacia de los mecanismos de reforzamiento basados en ferrocemento para incrementar la resistencia a flexión de muros de mampostería no reforzada ante cargas fuera del plano. El experimento probó un total de 6 muros sin refuerzo y 12 muros reforzados con ferrocemento que fueron expuestos a esfuerzos cuasi estáticos de flexión paralelos y ortogonales a las juntas horizontales de los ladrillos. Los resultados

mostraron que la presencia de ferrocemento en la superficie aumenta de forma importante la resistencia a esfuerzos de flexión y aumenta la ductilidad de los muros.

Shermi y Dubey (2017) realizaron una investigación de reforzamiento de muros de mampostería no reforzada típicos en India. El ensayo consistió en 6 muros no reforzados y 18 muros reforzados que fueron ensayados mediante el estándar ASTM E518-10 con el propósito de estudiar su comportamiento fuera del plano en términos de resistencia, rigidez y ductilidad. Los resultados mostraron que el mortero y la malla electrosoldada aumentan la capacidad del muro en términos de resistencia, rigidez y ductilidad.

Shrestha *et al.* (2012) presentan una recopilación de experiencias en el proceso de rehabilitación de estructuras de mampostería no reforzada en Nepal. Ellos indican que teniendo en cuenta los diferentes métodos utilizados para rehabilitar estructuras, utilizar malla electrosoldada o barras de acero con mortero ha probado ser el método más apropiado en términos de viabilidad económica y técnica. El estudio también mostró métodos alternativos de rehabilitación mediante el uso de fibras de polímero reforzado (FRP, por sus siglas en inglés).

#### Otras metodologías de reforzamiento y rehabilitación

Plesu *et al.* (2011) presentaron una recopilación bibliográfica de las metodologías más comunes de rehabilitación y reforzamiento de estructuras de mampostería no reforzada. El artículo presentó las siguientes metodologías de rehabilitación: remplazo de piezas utilizando materiales similares, rehabilitación mediante la construcción de muros de apoyo, cambio de juntas, cambio de juntas a juntas reforzadas, inyección de grietas, reparación de grietas mediante cementantes y pines de acero y cosido de grandes grietas. Además, el artículo presentó las siguientes metodologías de reforzamiento y rehabilitación basadas en tratamiento superficial y reforzamiento externo: reforzamiento de muros mediante capas de concreto reforzado, capas de revoque, ferrocemento, bandas sísmicas, placas externas de acero, barras de acero, barras postensadas, elementos de madera y tubería de acero. Adicionalmente, presentó una metodología que consiste en confinar la mampostería existente. Este artículo es importante porque resume las metodologías más comunes para reforzar estructuras de mampostería no reforzada y fue de utilidad en el momento de escoger el reforzamiento para las construcciones colombianas.

Blondet *et al.* (2012) hicieron un estudio de rehabilitación de estructuras de adobe no reforzadas mediante la inyección de lechada en grietas ocasionadas por movimientos del terreno. El estudio realizó un ensayo donde se expuso una casa a aceleraciones por medio de una mesa vibradora. Luego, se realizó una reparación de la vivienda inyectando lechada en las grietas y se volvió a someter la vivienda a la mesa vibradora. Los resultados muestran que la lechada ayuda a recuperar parte de la rigidez y resistencia inicial de la vivienda; sin embargo, los investigadores concluyen que este método se debería combinar con otros para lograr un mejor desempeño de estas estructuras ante movimientos del terreno.

## 1.4 METODOLOGÍA

El presente proyecto logró sus objetivos mediante la evaluación fuera del plano de muros de mampostería no reforzada y reforzada sujetos a aceleraciones en una mesa vibradora. Los muros fueron construidos con materiales típicos de las construcciones colombianas y fueron construidos por mamposteros de profesión.

La geometría de los muros fue definida a partir del procesamiento de información recopilada en estudios realizados por la Universidad EAFIT y la fundación Build Change, presentado en el Capítulo 2, y a partir de otros parámetros discutidos en el Capítulo 3. Estos estudios estadísticos arrojaron distribuciones de probabilidad de parámetros como: longitud, altura, espesor y condiciones de apoyo de los muros.

El modelo teórico de muros de mampostería reforzados se presenta en el Capítulo 4. Por medio de este modelo teórico se definió el reforzamiento que tuvieron los muros de mampostería reforzada por medio de franjas de mallas electrosoldadas y mortero.

Luego de definir las dimensiones y condiciones de apoyo, se procedió con la construcción de los muros en la mesa vibradora de la Universidad EAFIT. Durante la construcción se obtuvieron muestras de mortero con el propósito de evaluar su resistencia a la compresión. La construcción, la caracterización de los materiales y otros aspectos de los ensayos se muestra en el Capítulo 5.

Los ensayos fueron realizados en la mesa vibradora de la Universidad EAFIT y se sometieron a un conjunto de etapas o ciclos donde se exponían los muros a señales pseudo sinusoidales. La aceleración incrementaba luego de cada etapa o ciclo hasta llegar a la capacidad máxima de la mesa o hasta llegar a la falla del muro de mampostería.

Luego de ensayar los muros de mampostería no reforzada, se analizó la forma de la falla del muro y se comparó con el modelo teórico para elegir una forma de reforzamiento mediante franjas de mallas electrosoldadas y mortero. Posteriormente, se construyó un muro con las mismas características geométricas y con los mismos materiales, se reforzó mediante la metodología y forma propuesta y se hizo un nuevo ensayo. Los resultados experimentales de los muros se presentan en el Capítulo 6.

El Capítulo 7 presenta una comparación entre los resultados de la investigación y otras investigaciones presentes en la literatura. Finalmente, el Capítulo 8 presenta las conclusiones y las recomendaciones.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LAS VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Este Capítulo presenta una descripción de las dimensiones típicas de los muros que conforman las edificaciones construidas con este sistema estructural en el valle de Aburrá. Se realizó un análisis estadístico descriptivo de la información recopilada en 61 planos de viviendas con los que se contaba para este proyecto.

A través de la información recopilada se identificaron las propiedades geométricas de los muros que componen las viviendas y se trató de identificar la distribución probabilista que seguían las variables continuas.

Los resultados del análisis estadístico fueron importantes porque a partir de ellos se tomaron las decisiones necesarias para definir la longitud, altura, espesor y condición de esfuerzo de compresión y de sujeción de los muros para los ensayos con aceleraciones fuera del plano. A continuación, se presenta un resumen del análisis estadístico y las respectivas conclusiones.

### 2.1 MUESTRA POBLACIONAL

La muestra poblacional consistió en los muros que conforman 61 viviendas ubicadas en diferentes sectores del área metropolitana del Valle de Aburrá tal como se muestra en la Figura 2.1. La muestra fue hecha de forma aleatoria.

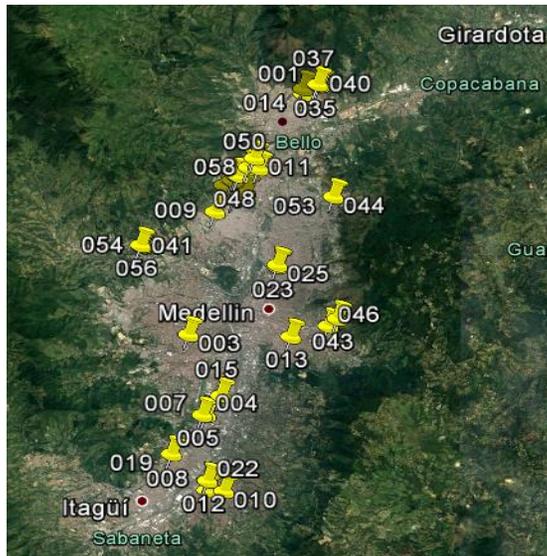


Figura 2.1 Ubicación de la muestra poblacional de edificaciones

Cada una de las edificaciones tenía planos arquitectónicos en los que se podía identificar la ubicación de los muros de mampostería, la presencia de otros elementos como columnas, ventanas, puertas, espesor de los muros, tipo de ladrillo y otros. A partir de estos parámetros se realizó el muestreo de las características geométricas de los muros. A pesar de la presencia de elementos estructurales tales como columnas y viguetas en algunas de las viviendas, las edificaciones fueron consideradas como sistemas tipo MUR debido a que dichos elementos no estaban conectados de forma adecuada entre sí, ni con los muros de mampostería, convirtiéndose entonces en elementos no estructurales sin aporte significativo a la capacidad sísmica de la edificación.

Durante el proceso de medición e identificación de las características de los muros que conforman las edificaciones se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de medición:

- Para cada muro se midió la longitud, altura, espesor y tipo de ladrillo; además, se midieron las dimensiones de las ventanas presentes en él y se estimaron las condiciones de apoyo, es decir, si tenían o no muros ortogonales adosados en sus extremos y si la losa de entrepiso o cubierta en su parte superior constituía o no una restricción al giro.
- La longitud de los muros se mide sin tener en cuenta las intersecciones con otros muros, tal como se muestra en la Figura 2.2. Además, si un muro es interceptado por otro, el primero se convierte en dos muros debido a que el muro que intercepta funciona como apoyo para el interceptado. Por ejemplo, un muro de 5 metros de longitud que tiene un muro ortogonal en cada uno de sus extremos y uno en la mitad es interpretado como dos muros de 2.5 metros menos las dimensiones de las intersecciones.
- Las puertas y ventanas no fueron consideradas dentro de la longitud de los muros, pero sí se hizo registro de las ventanas, su longitud y altura.
- Siempre que fue posible, se identificó el tipo de ladrillo utilizado.
- Los registros de cada plano fueron separados por tramos de muros, siendo un tramo conformado por los muros y ventanas comprendidos entre un extremo o puerta y el siguiente extremo o puerta. Conociendo las longitudes de los muros y las ventanas que conformaban cada tramo, se pudo hallar el porcentaje de vacíos de los tramos.

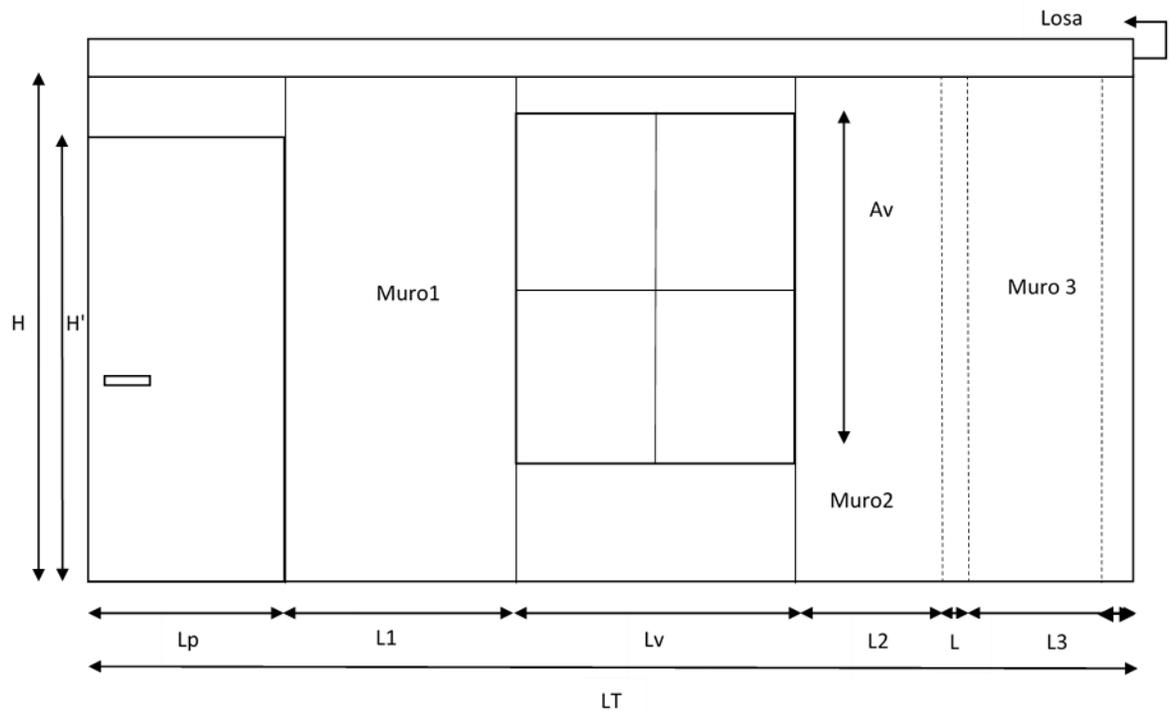
La Figura 2.2 muestra un tramo de una vivienda y las tablas 2.1 y 2.2 muestran la forma cómo se extrajo la información del tramo de vivienda expuesto. La información geométrica y condiciones de apoyo se obtuvieron tal como se describió más atrás.

**Tabla 2.1 Ejemplo de medición de las características de la muestra poblacional de muros**

Tramo	N.º de muros	Muro	% vacíos	Longitud (m)	Altura (m)	Espesor (m)	Tipo de ladrillo	N.º de ventanas	Longitud Ventanas	Altura Ventanas
1	3		%	LT-LP	H	ESP	TL	1	LV	AV
		1		L1	H	ESP	TL			
		2		L2	H	ESP	TL			
		3		L3	H	ESP	TL			

**Tabla 2.2 Ejemplo de medición de las características de la muestra poblacional de muros**

Tramo	N.º de muros	Muro	Apoyo lado 1	Apoyo lado 2	Apoyo superior
1	3				
		1	No	No	Si
		2	No	Si	Si
		3	Si	Si	Si



**Figura 2.2 Ejemplo de identificación de las características de los muros**

## 2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez hecha la recolección de los datos provenientes de los planos de las 61 viviendas se realizó un análisis estadístico de las siguientes variables.

- Longitud
- Altura
- Espesor
- Relación longitud/altura
- Relación altura/espesor
- Condiciones de borde

La muestra total de muros fue truncada y se consideraron dentro de ella sólo los muros cuya longitud es mayor o igual a 0,75 m, considerando que los muros con longitudes inferiores no tienen aportes significativos en la capacidad estructural de las edificaciones. Se obtuvo entonces un total de 1762 muros en total y 1349 muros con longitudes mayores a 0,75 m. Luego de trincar la muestra se calcularon parámetros estadísticos básicos mostrados en la Tabla 2.3. Estos parámetros son fundamentales para identificar cómo se comportan las distribuciones de la muestra poblacional en términos de rango de medidas, media, dispersión de la muestra, e indica la concentración de los datos con la curtosis y la asimetría de la distribución de la muestra poblacional.

La altura de los muros se tomó como la altura promedio del entrecimso de la vivienda por eso la cantidad de datos de altura corresponde al número de viviendas y no al número de muros.

**Tabla 2.3 Parámetros estadísticos de los muros estudiados**

Parámetros	Longitud (m)	Altura (m)	Espesor (m)	Longitud / Altura	Altura / Espesor
Media	2,33	2,53	0,16	0,93	17,74
Mediana	2,10	2,30	0,15	0,83	15,40
Moda	1,00	2,30	0,20	0,43	11,50
Desviación estándar	1,47	0,33	0,04	0,62	5,94
Varianza de la muestra	2,15	0,11	0,00	0,38	35,33
Mínimo	0,75	2,12	0,10	0,23	9,33
Máximo	17,15	3,50	0,30	7,46	33,60
Cuenta	1349	61,00	1349	1349	1349
Curtosis	16,94	0,59	-1,27	19,89	-0,42
Coefficiente de asimetría	2,72	1,24	-0,14	2,97	0,69

La Figura 2.3 muestra el histograma de cada uno de los parámetros medidos. Se observa que el 88% de la muestra tiene longitudes entre 0,75 m y 3,6 m. El espesor de los muros se encuentra casi uniformemente distribuido en 3 medidas: 0,10 m, 0,15 m y 0,20 m; esto se debe a que las ladrilleras tienen sus medidas de producción estandarizadas. Adicionalmente, se observa que la altura de entepiso más común es de 2,3 m y la cantidad de casas que tiene esta altura equivale al 50% de la muestra poblacional.

El histograma del parámetro longitud/altura muestra que aproximadamente el 92% de los muros presentan una relación que se encuentra entre 0,113 y 1,52. Por otro lado, la relación altura/espesor no muestra una tendencia clara a la concentración, sino que está distribuida en un intervalo relativamente ancho, siendo la moda 11,5, representando poco más del 20% del total de la muestra.

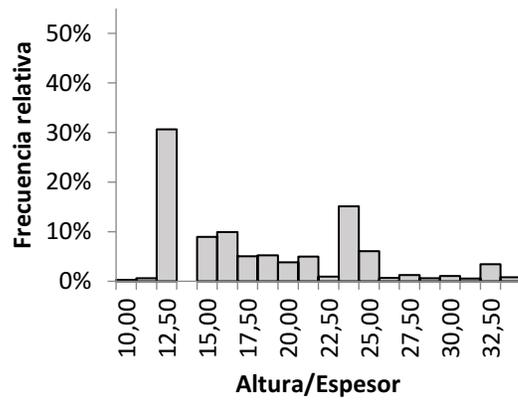
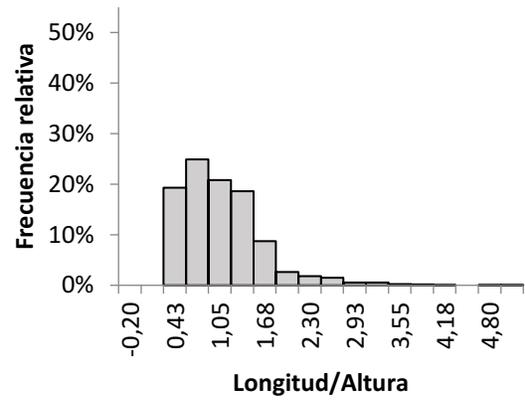
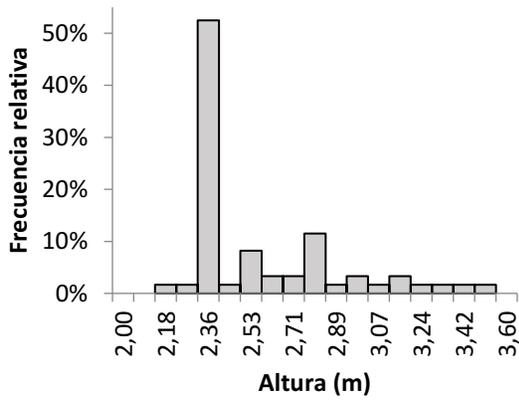
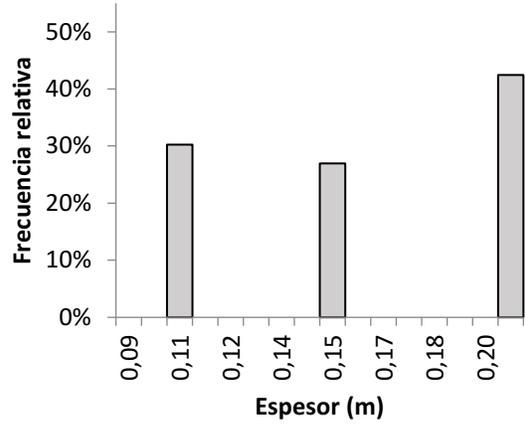
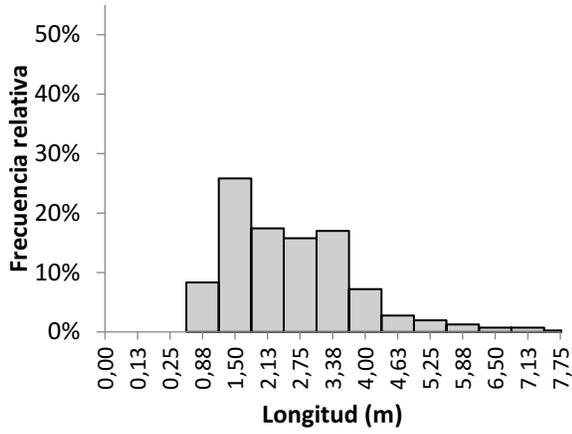
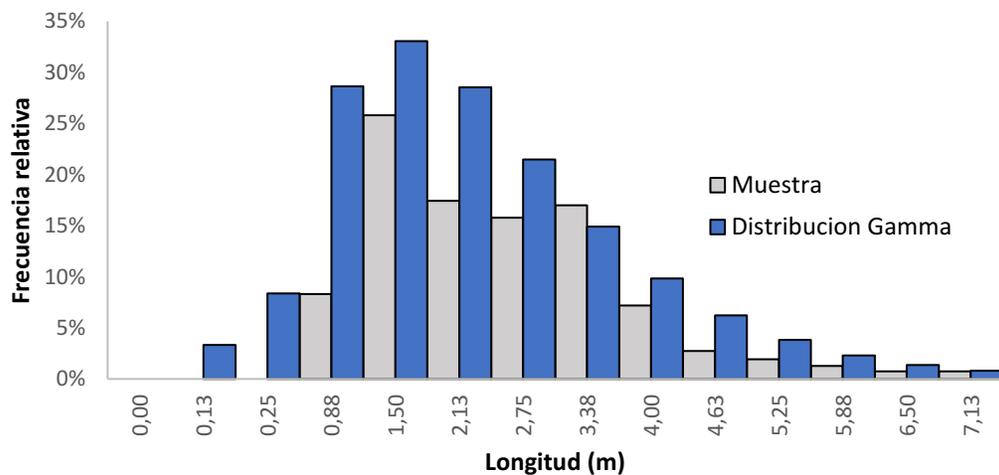


Figura 2.3 Histograma de los datos registrados

La Tabla 2.4 muestra en orden descendente el estadístico Kolmogórov-Smirnov D que indica cuál es la distribución que mejor se ajusta a la muestra de longitudes de los muros. A partir del estadístico de Kolmogórov-Smirnov D, se observa que la distribución que mejor se ajusta a la muestra es la distribución Gamma, sin embargo, cuando se hace la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov con el 95% de confianza la hipótesis se rechaza debido a que el valor p resulta menor a 0,05. La Figura 2.4 muestra a modo de ejemplo el ajuste de la distribución de las longitudes de los muros a la distribución Gamma. La forma cómo se realiza esta prueba estadística se describe ampliamente en (Walpole et al., 2012)

**Tabla 2.4 Resultados prueba de ajuste Kolmogórov-Smirnov para las longitudes de los muros**

Distribución	KS D
Gamma	0,07
Birnbaum-Saunders	0,08
Inverse Gaussian	0,08
Log normal	0,08
Loglogistic	0,08
Largest Extreme Value	0,09
Weibull	0,11
Logistic	0,12

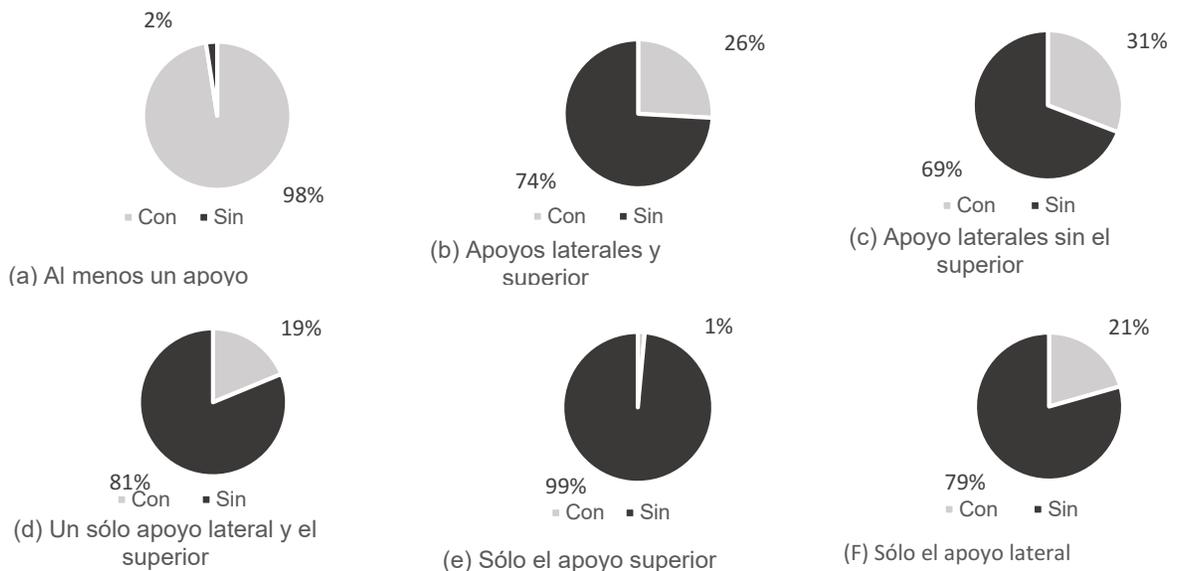


**Figura 2.4 Histograma de la longitud de los muros y distribución de probabilidad más ajustada**

## 2.2.1 Condiciones de apoyo

Las condiciones de apoyo juegan un papel fundamental en el comportamiento de muros ante cargas fuera del plano, por lo que se realizó una identificación de las condiciones de apoyo de los muros de la muestra poblacional para identificar las más comunes.

La Figura 2.5 presenta la distribución de las condiciones de apoyo de la base de datos. Cerca del 46% de los muros presentan al menos el apoyo superior, mientras que el 96% de los muros presentan al menos un apoyo lateral (el apoyo inferior se considera siempre presente). Adicionalmente, la figura muestra la proporción de muros que tienen cada una de las condiciones de apoyo posible; se observa que el 31% de los muros se encuentran apoyados en ambos costados, en la parte inferior y se encuentran libres en la parte superior; el 26% de los muros se encuentran apoyados en ambos costados, en la parte inferior y en la parte superior; el 21% de los muros sólo presentan un apoyo lateral y presentan el apoyo inferior; el 19% de los muros presentan apoyos en la parte superior, inferior y en un solo costado, el 2% sólo tienen apoyo en la parte inferior y el 1% sólo tienen apoyo en la parte superior y en la parte inferior.



**Figura 2.5 Condiciones de apoyo de los muros**

### **3. ELECCIÓN DE LOS ENSAYOS**

En este capítulo se describen los criterios de elección de los ensayos realizados en la mesa vibradora y se indican las limitaciones de la mesa vibradora de la Universidad EAFIT.

#### **3.1 LIMITACIONES DEL PROYECTO**

El proyecto contó con limitaciones de equipos que fueron un criterio importante para la elección de los ensayos realizados. La mesa vibradora de la Universidad EAFIT tiene la capacidad de aplicar una aceleración aproximada de 1 g para las masas que se estaban manejando; en consecuencia, la capacidad teórica del muro fue uno de los aspectos que se tuvo en cuenta para la elección de los ensayos.

#### **3.2 ELECCIÓN DE LOS ENSAYOS EN MESA VIBRADORA**

El proceso de elección estuvo soportado por los ensayos hechos en las referencias bibliográficas, los resultados de la estadística descriptiva de las viviendas del AMVA, la capacidad teórica del muro y las variables que se querían evaluar. Los ensayos buscaban evaluar la influencia de tres variables independientes que fueron la resistencia a tracción del mortero, la presencia de reforzamiento y la presencia de carga axial en la variable dependiente que era la resistencia a cargas fuera del plano de muros de mampostería no reforzada. A continuación, se discute cada una de las variables independientes que influyen en el comportamiento y se elige el valor o la condición del parámetro para cada uno de los ensayos.

##### **3.2.1 Longitud**

La elección de la longitud se soportó en el análisis estadístico descriptivo y en las limitantes de la mesa vibradora para imponer aceleraciones.

La distribución de la longitud en la muestra poblacional se trató de ajustar a una distribución conocida y se llegó a la conclusión que la distribución gamma, con un factor de forma de 2,52 y un factor de escala de 0,92, era la que mejor se ajustaba. Sin embargo, cuando se realizó la prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov se rechazó la hipótesis de que la longitud se comportaba de acuerdo con esta distribución.

Con el propósito de hallar unas longitudes que representaran la muestra, ésta se acotó en un intervalo donde estuviera la mayoría de los datos mediante la aplicación del teorema de Chebychev. Se consideraron valores extremos en la cola superior a aquellos muros cuya longitud fuese mayor a la media más tres desviaciones estándares y la cola inferior se acotó según las longitudes mínimas de muros con “capacidad estructural” según el Manual de Evaluación y Reforzamiento Sísmico para Reducción de Vulnerabilidad en Viviendas, (Build Change, 2015), lo anterior debido a que la media menos tres distribuciones estándares

daba un valor negativo. Luego de acotar la muestra se dividió en cuartiles y se halló la media de cada uno. A continuación, la Tabla 3.1 muestra la longitud media de cada cuartil.

**Tabla 3.1 Longitud promedio de los cuartiles de la muestra de muros**

Cuartil	Longitud (m)
1	1,30
2	2,00
3	2,75
4	4,00

A pesar de que se hallan estas longitudes promedio de cada cuartil, éste no es el único criterio para seleccionar las longitudes de los muros que se iban a ensayar debido a que se deben relacionar estas medidas con otros parámetros como la relación longitud-altura, altura-espesor y la capacidad de muro y la mesa vibradora.

### **3.2.2 Altura**

Tal como se muestra en la Figura 2.3 y en la Tabla 2.3 el 50% de las viviendas presentaron una altura de 2,3 m y las viviendas restantes tienen una altura de entrepiso distribuida en un rango relativamente amplio. Se consideró que la altura de 2,3 m es la más apropiada dado que representa el 50% de los datos. Sin embargo, se tomó 2,4 m para que el muro estuviera conformado de hileras completas de ladrillos y no con piezas cortadas en la parte superior.

### **3.2.3 Espesor**

Los espesores de los muros se distribuyen de manera uniforme en tres medidas: 0,10 m, 0,15 m y 0,20 m. El espesor es un parámetro importante porque el aumento en la relación altura-espesor tiene un papel determinante en la capacidad del muro a cargas fuera del plano. Por lo anterior, se escogió para los especímenes a ensayar un espesor de 10 cm teniendo en cuenta que la capacidad de la mesa vibradora es limitada y este espesor sería el más desfavorable. En los cálculos de la resistencia del muro se tuvo en cuenta que los ladrillos de “10 cm” realmente tienen un espesor de 9 cm.

### **3.2.4 Relación altura-espesor (esbeltez)**

El histograma de la relación altura-espesor presentado en la Figura 2.3 muestra que la esbeltez más frecuente es de 11,5; sin embargo, se debe tener en cuenta que sólo es mayor que el 19% de la muestra poblacional y se encuentra en el extremo izquierdo de la distribución. A pesar de que esta esbeltez es la más común, sería mejor evaluar relaciones de esbeltez más altas porque sería la situación más desfavorable. En la Sección 3.2.2 se escogió la altura de entrepiso de 2,4 m que representaba el 50% de la muestra poblacional y en la Sección 3.2.4 se escogió un espesor de 0,10 m; estas dos características

geométricas equivalen a una relación altura-espesor de 24. Esta relación es mayor que la esbeltez del 90% de los datos de la muestra.

### 3.2.5 Condiciones de apoyo

Las condiciones de apoyo de los muros de mampostería no reforzada se pueden dividir en 6 tipos que se muestran en la Figura 3.1. Las condiciones de apoyo son provistas en la realidad de diferentes formas, los apoyos laterales son provistos generalmente por intersecciones con otros muros, el apoyo superior se da cuando sobre el muro hay una losa o techo que restringe sus movimientos laterales y provee o no restricción al giro, y el apoyo inferior se da por la unión entre la losa o viga de fundación con el muro a través de mortero de pega. Las condiciones de apoyo pueden o no proveer restricciones al giro, por ello éstas se representan en ocasiones en la literatura como si fueran articuladas o empotradas.

Las condiciones de apoyo se eligieron siguiendo dos parámetros básicos: los ensayos realizados en la literatura y las variables independientes que se querían evaluar. La influencia de la resistencia a tracción del mortero en la capacidad de los muros de mampostería no reforzada a cargas fuera de su plano, era una de las variables que se quería evaluar, en consecuencia, se eligió la condición que aparece en la Figura 3.1 (a) porque es la condición en donde se puede medir de forma más directa esta variable. Además, se escogió la condición que aparece en la Figura 3.1 (e) porque es una condición de apoyo que es muy poco frecuente en los ensayos de la literatura y que es frecuente en las construcciones colombianas.

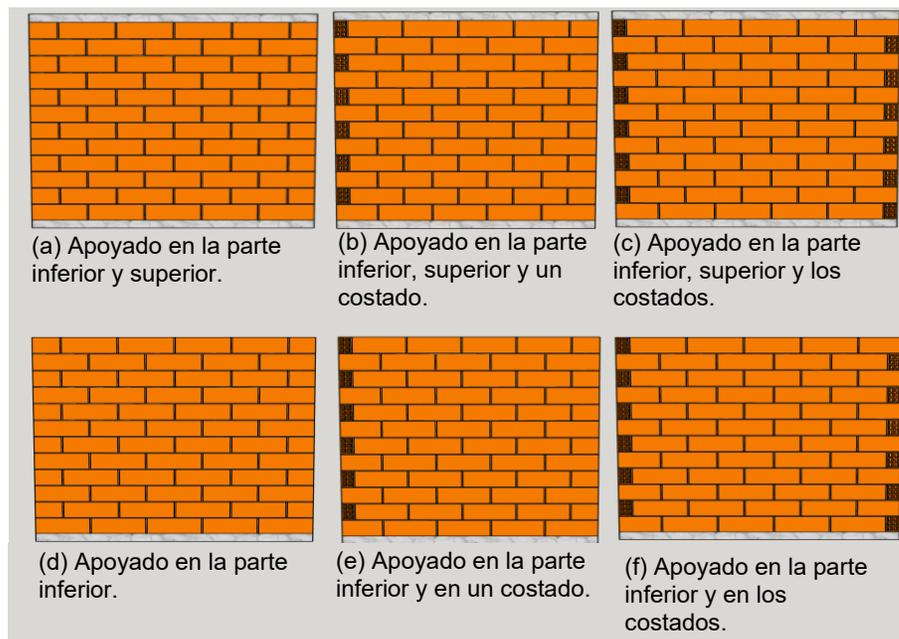


Figura 3.1 Condiciones de apoyo de los muros de mampostería no reforzada

### 3.2.6 Relación longitud-altura

A pesar de que la relación longitud-altura se concentra en un intervalo relativamente pequeño, el análisis estadístico no es el principal elemento para definir la relación longitud - altura que va a tener el ensayo. Esta longitud se elige teniendo en cuenta la aceleración límite que tienen la mesa vibradora de la Universidad EAFIT y la resistencia del muro calculada de acuerdo con el modelo de Osorio (2018) que incluye los modelos de flexión vertical y flexión horizontal.

La Tabla 3.2 presenta la aceleración que soportan los muros con los parámetros mostrados en la

Tabla 3.3, con diferentes longitudes y diferentes cargas axiales (P). Se observa que los muros que podían ser fallados por la mesa vibradora de la Universidad EAFIT (capacidad de aceleración máxima de 1 g) son aquellos que tengan una carga axial baja, longitudes mayores a 2,5 m y que se encuentran subrayados en la Tabla 3.2. A partir de estos resultados se elige que la longitud aproximada de los muros va a ser de 3 y 4 m de longitud para los muros con la condición de apoyo "T3", ver capítulo 5. La longitud es aproximada debido a que se desea que los muros queden con ladrillos enteros y medios, redondeando siempre a una mayor longitud.

**Tabla 3.2 Resistencia teórica de los muros**

Longitud (m) \ P (kN/m)	1 m	1,5 m	2,0 m	2,5 m	3,0 m	3,5 m	4,0 m
	Aceleración (g)						
0	3,09	1,61	1,04	<b>0,76</b>	<b>0,60</b>	<b>0,49</b>	<b>0,42</b>
0,5	3,96	2,24	1,56	1,21	1,00	<b>0,86</b>	<b>0,76</b>
1	4,49	2,63	1,88	1,49	1,25	1,10	<b>0,99</b>
1,5	4,95	2,97	2,16	1,74	1,49	1,31	1,18
2	5,37	3,28	2,43	1,98	1,71	1,51	1,37
2,5	5,75	3,58	2,68	2,20	1,90	1,69	1,55
3	6,12	3,86	2,92	2,42	2,09	1,88	1,72
3,5	6,48	4,13	3,16	2,63	2,28	2,06	1,90
4	6,82	4,40	3,39	2,83	2,47	2,24	2,07
4,5	7,15	4,66	3,61	3,02	2,65	2,41	2,24
5	7,48	4,91	3,84	3,21	2,83	2,59	2,41

**Tabla 3.3 Parámetros para el cálculo de la resistencia del muro**

Parámetro	Valor	Descripción
t (m)	0,09	Espesor del muro
l (m)	0,39	Longitud ladrillo
w (m)	0,19	Altura
h (m)	0,02	Espesor juntas horizontales
b (m)	0,016	Espesor juntas verticales
E <sub>b</sub> (MPa)	12000	Módulo elasticidad del ladrillo
E <sub>m</sub> (MPa)	10000	Módulo elasticidad conjunto mortero y ladrillo
c (kPa)	370	Cohesión ladrillo y mortero
μ	0,5	Coefficiente de fricción mortero y ladrillo
G <sub>m</sub> (MPa)	4000	Módulo cortante del mortero
Y (kN/m <sup>3</sup> )	10,5	Peso unitario muro mampostería

### 3.2.7 Presencia de carga axial

Los muros de mampostería, según los modelos experimentales, aumentan sensiblemente su resistencia ante cargas fuera del plano a medida que aumenta la carga axial. Con el propósito de probar este modelo se pensó en dos primeros ensayos los cuales tendrían un montaje que les aplicara carga axial adicional a medida que las aceleraciones fuera del plano aumentarían. Esto se logró por medio del montaje esquematizado en la Figura 5.2, el cual en la parte superior tenía la conexión presentada en Figura 5.1 (d). En este diagrama se muestra que a medida que aumentan las cargas fuera del plano muro, el muro trata de girar con mayor intensidad lo que produce una reacción axial que evita esta rotación y que es aplicada por el montaje. Este montaje se explica en detalle en la Sección 5.2.1

### 3.2.8 Calidad del mortero

En la literatura, la resistencia a tracción del mortero y del concreto ha sido definida en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión de cilindros de concreto o de mortero. Con el propósito de evaluar la influencia de la resistencia a tracción del mortero de pega en la capacidad de muros de mampostería no reforzada a cargas fuera del plano, se utilizaron dos tipos de mortero, uno con una resistencia a la compresión aproximada de 7 MPa que es considerado como de mediana calidad para las construcciones informales de personas de bajos recursos, y otro mortero de pobre calidad con una resistencia a la

compresión aproximada de 1 MPa buscando simular la peor condición que se considera común a pesar de ser extrema. Además, para garantizar que la resistencia a tracción de los muros con mortero de 1 MPa fuera cero se fisuraron las uniones entre el ladrillo y el mortero durante su construcción.

### **3.2.9 Metodologías de reforzamiento**

Con el propósito de disminuir la vulnerabilidad de estructuras de mampostería no reforzada ante cargas fuera del plano se escogió una metodología de reforzamiento, la cual fue utilizada para reforzar muros réplicas de los ensayos sin reforzar. Esto se hizo para evaluar el aumento en la resistencia fuera del plano. Para escoger la metodología más apropiada para las construcciones colombianas, se tuvo en cuenta experiencias de otros estudios como San Bartolomé *et al.* (2004) y Shrestha *et al.* (2012). Estos estudios, luego de probar diferentes metodologías recomiendan que se refuercen los muros de mampostería mediante el uso de mallas electrosoldadas y mortero debido a que es económico, los materiales son de fácil acceso y la complejidad técnica es baja. Por ende, para el reforzamiento a cargas fuera del plano se escogió la técnica de las franjas de mallas electrosoldadas y mortero presente en San Bartolomé y Quiun (2015).

#### 4. MODELO TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS POR MEDIO DE FRANJAS DE MALLAS ELECTROSOLDADAS Y MORTERO, Y SOMETIDOS A CARGAS FUERA DE SU PLANO

El modelo teórico utilizado para predecir el comportamiento de los muros de mampostería reforzados con el método de las franjas de mallas electrosoldadas y mortero es el que se presenta en San Bartolomé y Quiun (2015). Los estados límites últimos presentados en este modelo corresponden a fallas debidas a la ruptura de la traba que existe entre algunos muros y la falla fuera del plano del muro. El modelo busca que todos los esfuerzos de tracción sean soportados por las franjas y los esfuerzos de compresión sean tomados por la mampostería y el mortero. A continuación, se presentan los modelos teóricos desarrollados durante las investigaciones peruanas, los cuales se van a adaptar según las características geométricas de los muros de mampostería típicos en Colombia. Adicionalmente, las figuras 4.1 (a), (b) y (c) presentan a modo de ejemplo el reforzamiento de viviendas en Perú con esta metodología.



(a) Vivienda 1

(b) Vivienda 2

(c) Vivienda 3

**Figura 4.1 Reforzamiento de viviendas de adobe no reforzadas por medio de franjas de mallas electrosoldadas (San Bartolomé y Quiun, 2015) y (San Bartolomé y Quiun, 2012)**

La Figura 4.2 (a) muestra el diagrama de cuerpo libre de tres muros que se encuentran trabados. Dado que la unidad entre estos elementos ayuda a que la edificación se comporte mejor ante cargas cíclicas, se pretende que la fuerza  $T$ , que es producida por la carga distribuida producto de las aceleraciones de un sismo, sea soportada en su totalidad por la malla electrosoldada. Estos análisis pueden ser hechos utilizando la teoría de placas y membranas con el propósito de calcular de manera más exacta la fuerza  $T$  que se genera en el muro. Sin embargo, suponer que el muro es una viga simplemente apoyada y que la fuerza  $T$  equivale a la masa del muro por las aceleraciones esperadas del sismo, dividido por dos, tal como se muestra en la Ecuación ( 4.1 ) resulta ser más simple y conservador.

$$T = \frac{wLH}{2} \quad (4.1)$$

donde:  $w$  es la carga distribuida producidas por las aceleraciones del sismo,  $L$  es la longitud del muro y  $H$  es la altura del muro. La carga  $w$  se halla multiplicando el peso específico del muro ( $\gamma$ ) por la aceleración,  $S_a$ , esperada para un sismo en fracción de la gravedad de la tierra como se muestra en la Ecuación ( 4.2 )

$$w = \gamma S_a \quad (4.2)$$

En San Bartolomé y Quiun (2015) se diseña la franja para que sea capaz de soportar esa fuerza por medio del acero de la malla mediante la Ecuación ( 4.3 )

$$\Phi T_n = \Phi A_s f_y \quad (4.3)$$

donde  $\Phi$  que es el coeficiente de reducción de resistencia que es igual 0.9,  $A_s$  es el área de acero paralela a la dirección de los esfuerzos y  $f_y$  es el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

Además de utilizar estas ecuaciones para calcular el área de acero necesaria para soportar la fuerza  $T$ , se deben revisar otros estados límites últimos como la adherencia de la malla al muro de mampostería y se debe revisar la resistencia a esfuerzos cortantes del muro al que está anclada la malla. En la literatura se pueden encontrar expresiones más exactas para calcular la resistencia a esfuerzos cortantes de muros de mampostería no reforzada, sin embargo, en este documento se plantean las ecuaciones ( 4.4 ) a ( 4.7 ) que provienen del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10; AIS,2010).

El cortante nominal resistido por la mampostería equivale a:

Para  $\frac{M_u}{V_u d} \leq 0,25$

$$\Phi V_m = \Phi (0,30 A_{mv} \sqrt{f'_m} + 0,25 P_u) \quad (4.4)$$

Para  $0,25 < \frac{M_u}{V_u d} < 1$

$$\Phi V_m = \Phi \cdot \left\{ \left[ \left( 0,33 - 0,13 \frac{M_u}{V_u d} \right) \cdot A_{mv} \sqrt{f'_m} \right] + 0,25 P_u \right\} \quad (4.5)$$

Para  $\frac{M_u}{V_u d} > 1$

$$\Phi V_m = \Phi(0,20A_{mv}\sqrt{f'_m} + 0,25P_u) \quad (4.6)$$

$$A_{mv} = t_{ef}l_w \quad (4.7)$$

Donde:  $A_{mv}$  es el área efectiva resistente de esfuerzos cortantes,  $t_{ef}$  es el espesor efectivo del muro de mampostería,  $l_w$  es la longitud del muro de mampostería,  $d$  es la distancia de la cara de compresión al centroide del refuerzo en tracción,  $V_u$  es la resistencia solicitada de diseño de fuerza cortante,  $M_u$  resistencia solicitada de diseño a flexión,  $f'_m$  resistencia a la compresión de la mampostería,  $V_m$  es la resistencia nominal para fuerza cortante contribuida por la mampostería y  $\Phi$  es el factor de reducción de resistencia que es igual a 0,6 para resistencia a esfuerzos cortantes

La Figura 4.2 (b) muestra el diagrama de cuerpo libre que se debería utilizar para muros que tienen el apoyo superior libre y que estén apoyados en ambos lados. Un muro con estas condiciones deberá ser reforzado ante flexión horizontal. Al igual que el modelo anterior, se puede utilizar la teoría de membranas y placas para calcular con mayor exactitud el momento producido al aplicar una carga distribuida a un muro con estas condiciones. Sin embargo, resulta más simple y conservador suponer el muro como una viga simplemente apoyada y así calcular el refuerzo requerido para soportar las aceleraciones producidas por el sismo, por medio de la teoría clásica de flexión de vigas.

La demanda de momento que experimenta el muro ante acciones fuera del plano se calcula de acuerdo con la Ecuación ( 4.8 ) y mediante las ecuaciones ( 4.9 ) y ( 4.10 ) se diseña el muro para que soporte la demanda:

$$M = \frac{wl^2}{8} \quad (4.8)$$

$$\sum F_x \rightarrow 0,8f'_m ab = A_s F_y \quad (4.9)$$

$$\Phi M_n = \Phi 0,8f'_m ab \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (4.10)$$

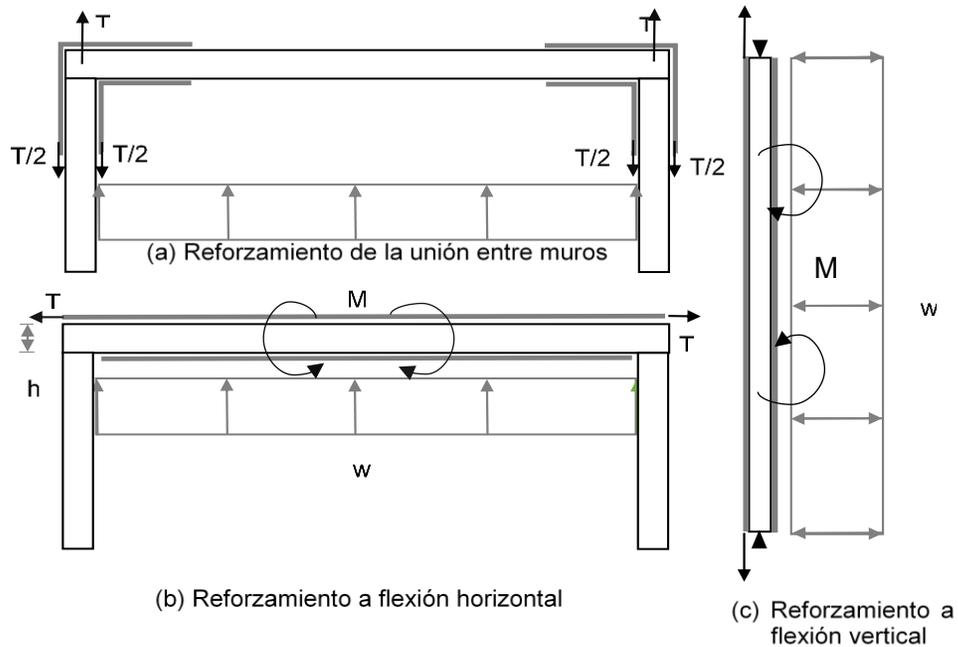
Donde  $\Phi$  que es el factor de reducción de resistencia que es igual 0,8 para cálculos de flexión ante cargas fuera del plano,  $a$  es la altura del bloque de compresión equivalente y  $b$  es el ancho del bloque de compresión.

La Figura 4.2 (c) muestra el modelo teórico utilizado para muros que poseen restricciones en la parte inferior y/o en la parte superior. En estos casos se resisten todas las cargas fuera del plano a partir de la resistencia a flexión vertical de las franjas colocadas sobre el muro. Al igual que en los otros casos, se utiliza la teoría clásica de vigas para el análisis de la demanda, ver Ecuación ( 4.11 ) y el diseño del muro se realiza mediante las ecuaciones ( 4.12 ) y ( 4.13 )

$$M = \frac{wl^2}{8} \quad (4.11)$$

$$\sum Fx \rightarrow 0,8f'_m ab = A_s F_y \quad (4.12)$$

$$\phi M_n = \phi 0,8f'_m ab \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (4.13)$$



**Figura 4.2 Modelo de resistencia para las traveses entre los muros de mampostería**

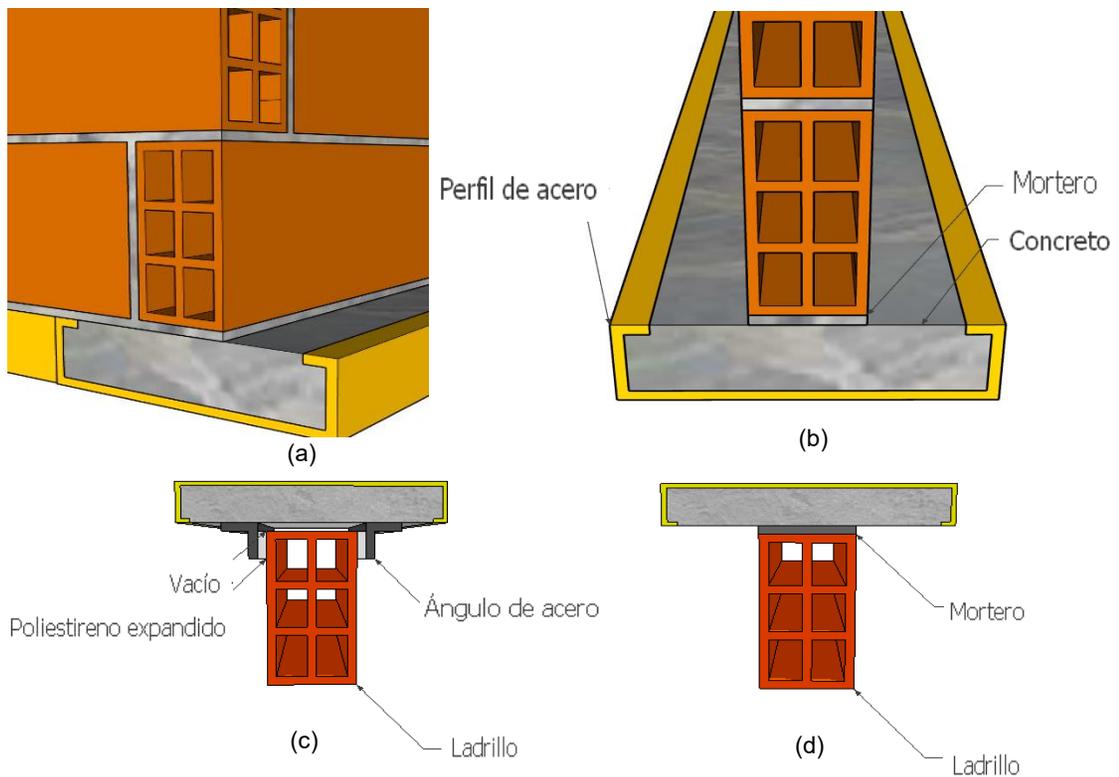


## 5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO Y DEL MONTAJE

### 5.2.1 Diseño del montaje

Luego de definir las dimensiones geométricas de los especímenes y las variables, se procedió con el diseño del montaje necesario para replicar las condiciones que se querían evaluar.

La condición de apoyo lateral se hizo mediante la construcción de un muro que interceptaba ortogonalmente al muro que iba a estar expuesto a cargas fuera del plano. Ambos muros estaban trabados como se observa en la Figura 5.1(a). La condición de apoyo superior variaba dependiendo del ensayo, para los muros que no tenían carga axial se utilizó la conexión presentada en la Figura 5.1 (c) y para los muros que tenían carga axial se utilizó la conexión que aparece en la Figura 5.1 (d). La condición de apoyo inferior se hizo tal como se muestra en la Figura 5.1 (b).

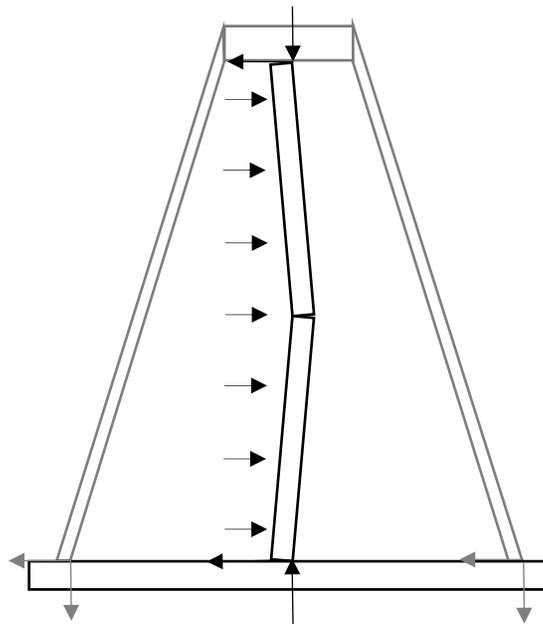


**Figura 5.1 Tipo de conexiones utilizadas en el proyecto**

La conexión mostrada en la Figura 5.1(c) permite la rotación en la parte superior, pero restringe los desplazamientos laterales; mientras que la conexión de la Figura 5.1 (d) restringe tanto la rotación en la parte superior como los desplazamientos laterales. Esta

restricción a momentos aumenta a medida que la carga axial se incrementa, es decir, para poder que el muro se mantenga en equilibrio la carga axial debe aumentar para contrarrestar el momento que le provoca la carga distribuida. La Figura 5.3 muestra un diagrama de cuerpo libre donde se observa las reacciones del muro y del montaje cuando se somete el muro a cargas fuera del plano.

Por ende, en la Tabla 5.1 la carga axial de estos muros aparece como "Variable". Esta condición de borde se incluyó con el propósito de evaluar la influencia de la carga axial en la resistencia fuera del plano de los muros de mampostería no reforzada. Se ejecutaron dos ensayos iniciales los cuales tenían el montaje mostrado en la Figura 5.3 el cual aplica una carga axial incremental a medida que se acrecientan las cargas fuera del plano. Posteriormente se repitieron los ensayos sin carga axial.



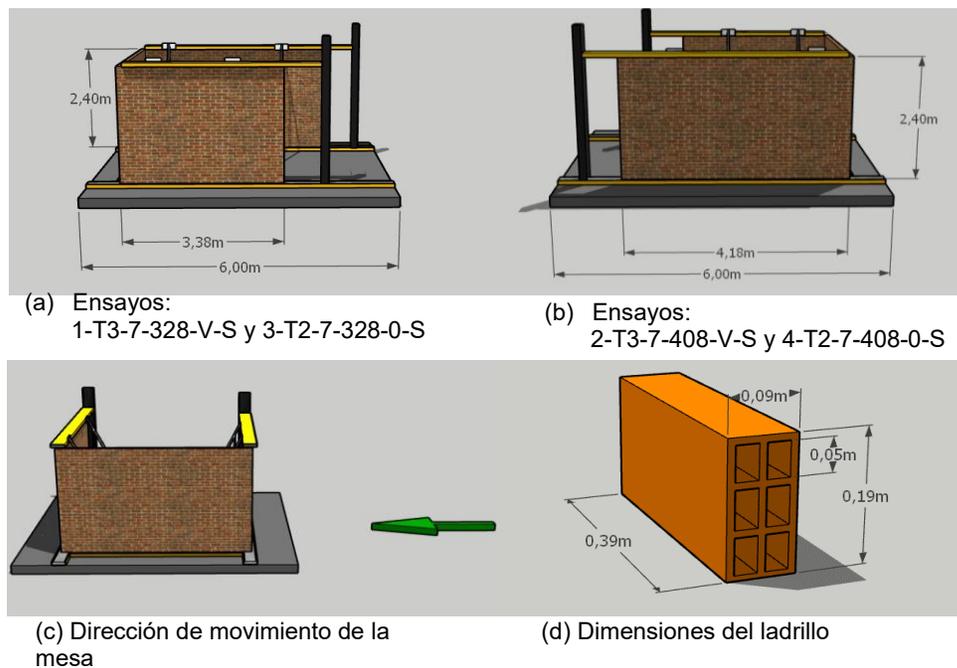
**Figura 5.2 Diagrama de reacciones de los ensayos**

Otra de las variables que se quería evaluar era la influencia de la resistencia a tracción del mortero en la capacidad de los muros de mampostería a cargas fuera de su plano. Con el propósito de evaluar esta variable, se utilizó un mortero con una resistencia a la compresión aproximada de 7 MPa que es considerado como de mediana calidad para las construcciones informales de personas de bajos recursos, y otro mortero de pobre calidad con una resistencia a la compresión aproximada de 1 MPa buscando simular la peor condición que se considera común a pesar de ser extrema. Con el objetivo de garantizar una mínima resistencia a tracción en el muro con mortero de 1 MPa, se fisuró la unión que existía entre el mortero de pega y el ladrillo a medida que se construía.

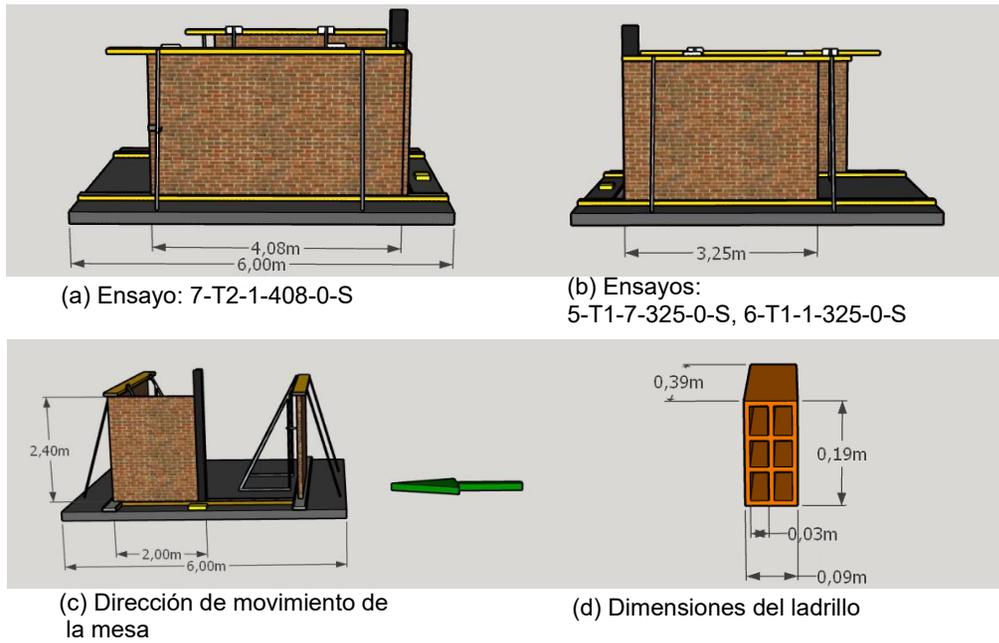
La última variable que se quería evaluar era la influencia del reforzamiento con franjas de mallas electrosoldadas y mortero en la resistencia fuera del plano de muros de mampostería no reforzada. Es decir, se construyó una réplica de los muros con mortero de 1 MPa cuyas juntas se encontraban fisuradas y se reforzaron los muros mediante esta metodología.

Las figuras 5.3 a 5.5 muestran los diferentes montajes realizados para la elaboración de los ensayos. Todos muestran la forma como se sujetó la viga superior a la mesa vibradora y la concepción general de los montajes. El montaje que presenta la Figura 5.3 (a) fue el que se utilizó para los ensayos 1-T3-7-328-V-S y 3-T2-7-328-0-S, la Figura 5.3 (b) muestra el montaje que se utilizó para los ensayos 2-T3-7-408-V-S y 4-T2-7-408-0-S, la Figura 5.4 (a) presenta el montaje utilizado para el ensayo 7-T2-1-408-0-S, la Figura 5.4 (b) presenta el montaje de los ensayos 5-T1-7-325-0-S, 6-T1-1-325-0-S, la Figura 5.5 (a) muestra el montaje utilizado en el ensayo 8-T1-1-325-0-R y la Figura 5.5 (b) presenta el montaje utilizado en 9-T2-1-408-0-R.

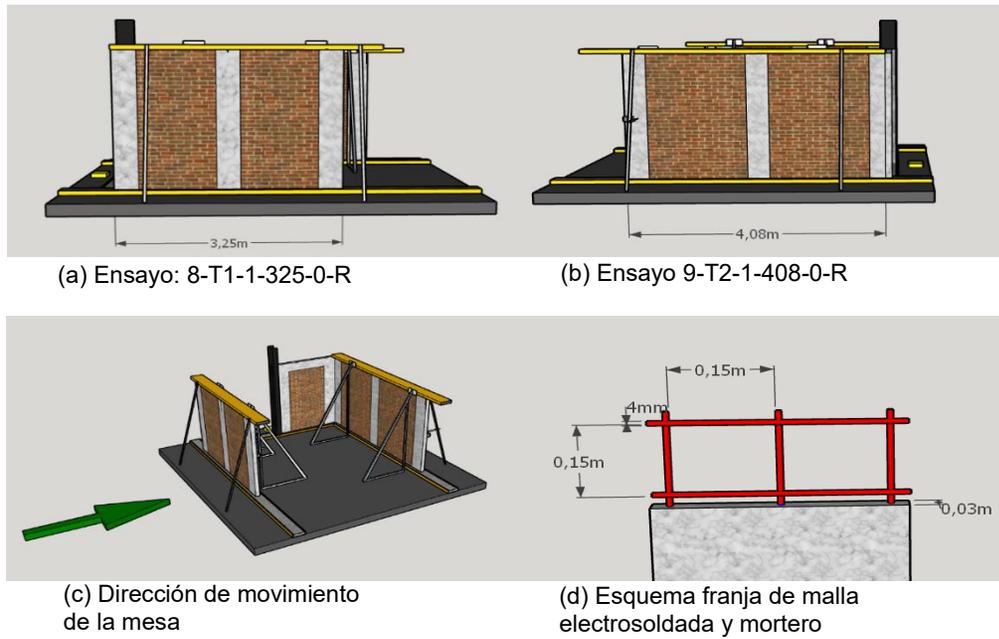
Además, las figuras 5.3 (c), 5.4 (c) y 5.5 (c) muestran la dirección de movimiento de la mesa vibradora para todos los ensayos; las figuras 5.3 (d) y 5.4 (d) muestran el ladrillo que se utilizó en la construcción de todos los ensayos en diferente vista; y la Figura 5.5 (d) presenta la geometría de la franja utilizada en el reforzamiento y el acero de refuerzo.



**Figura 5.3 Esquemas de los ensayos 1-T3-7-328-V-S, 2-T3-7-408-V-S, 3-T2-7-328-0-S y 4-T2-7-408-0-S**



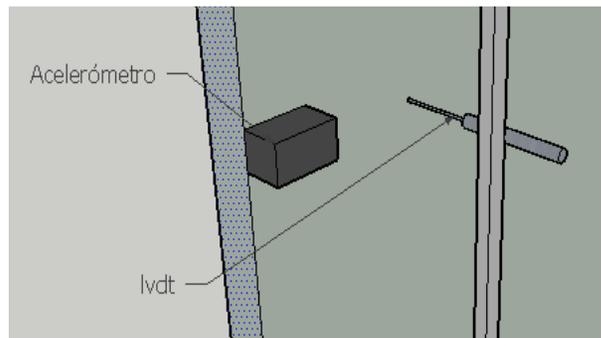
**Figura 5.4 Esquema de los ensayos 5-T1-7-325-0-S y 6-T1-1-325-0-S**



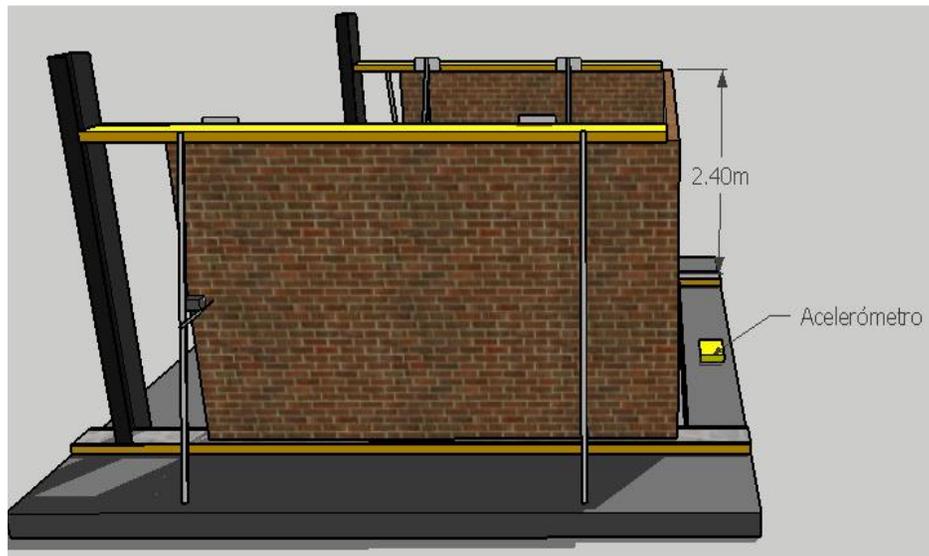
**Figura 5.5 Esquema de los ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R**

### Instrumentación de los muros

Los ensayos fueron instrumentados por medio de un acelerómetro (id: 507) que fue ubicado en la superficie de la mesa vibratoria y un acelerómetro (id: 508 o id:510) y un medidor de desplazamiento (LVDT) ubicados en la mitad de la altura de cada muro, ver Tabla 5.2. El acelerómetro y el medidor de desplazamiento que se encontraban en el muro se quitaron cuando la aceleración de la mesa superó una aceleración específica con el propósito de proteger los equipos que se podrían ver afectados cuando el espécimen fallara. La Figura 5.6 muestra un diagrama que explica la forma cómo se colocaron el acelerómetro y el LVDT a la mitad de la altura del muro ( $H=h/2$ ) y la Figura 5.7 muestra la ubicación del acelerómetro que se encontraba en base de la mesa vibratoria ( $H=0$  m) y también la ubicación del acelerómetro y el LVDT a la mitad de la altura del muro.



**Figura 5.6 Posición del acelerómetro y el LVDT a la mitad de la altura del muro ( $H = h/2$ )**



**Figura 5.7 Ubicación del acelerómetro en la base de la mesa**

**Tabla 5.2 Instrumentación del ensayo**

Acelerómetro (ID)	Ubicación
507	Superficie mesa vibradora
508	Muro (L = 3,25 m)
510	Muro (L = 4,08 m)

### 5.2.2 Construcción de los especímenes

La construcción de los muros de mampostería se hizo por medio de personal con experiencia en el sector de la construcción. Las indicaciones que se le dieron a los trabajadores en cuanto a la metodología de construcción fueron pocas porque se pretendía que los muros representaran lo mejor posible la realidad. Las figuras 5.8 a 5.13 muestran el proceso constructivo, el reforzamiento y el montaje de algunos ensayos.



**Figura 5.8 Construcción de los ensayos 1-T3-7-328-V-S (frente) y 2-T3-7-408-V-S (fondo)**



(a) Vista norte

(b) Vista sur

**Figura 5.9 Construcción de los ensayos 1-T3-7-328-V-S**



(a) Vista norte

(a) Vista sur

**Figura 5.10 Construcción de los ensayos 2-T3-7-408-V-S**



**Figura 5.11 Construcción de los ensayos 6-T1-1-325-0-S (frente) y 7-T2-1-408-0-S (fondo)**



(a) Colocación de la malla electrosoldada

(b) Vaciado de la franja

**Figura 5.12 Construcción en el ensayo 8-T1-1-325-0-R**



**Figura 5.13 Construcción de las franjas en el ensayo 9-T2-1-408-0-R**

### **5.3 EQUIPOS E INSTALACIONES EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS**

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Sísmica de la Universidad EAFIT, el cual cuenta con una mesa vibradora con una plataforma metálica de 36 m<sup>2</sup>, capacidad de carga vertical de 70 toneladas y altura libre de 9,5 m. La mesa vibradora cuenta con un actuador hidráulico de 15 toneladas controlado por el sistema central del laboratorio.

### **5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

Durante la construcción de los muros se obtuvieron muestras del mortero y de la mampostería con el propósito de caracterizar los materiales que conformaban los muros. Al mortero se le hicieron pruebas de compresión uniaxial y a la mampostería pruebas de compresión simple y tracción diagonal.

#### **5.4.1 Resistencia del mortero**

Durante la construcción de los muros se tomaron muestras de mortero cada día y se realizaron pruebas de compresión uniaxial de acuerdo con la NTC 673. Las tablas 5.3 a 5.6 presentan los resultados de compresión uniaxial de los diferentes ensayos. La Tabla 5.3 presenta los resultados de compresión uniaxial del mortero,  $f'_{cp}$ , utilizado en los ensayos 1-T3-7-328-V-S, 2-T3-7-408-V-S, 3-T2-7-328-0-S, 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S. La Tabla 5.4 presenta los resultados de compresión uniaxial del mortero,  $f'_{cp}$ , utilizado en los ensayos 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S y las tablas 5.5 y 5.6 presentan los resultados de compresión uniaxial,  $f'_{cp}$ , del mortero utilizado en las juntas y en el mortero de las franjas de los ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R.

**Tabla 5.3 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros de mortero. Ensayos 1-T3-7-328-V-S, 2-T3-7-408-V-S, 3-T2-7-328-0-S, 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S**

Cilindro	Fecha de vaciado	Fecha de prueba	Edad (días)	f'cp (MPa)
1	12/04/2018	19/05/2018	37	6,8
2	12/04/2018	19/05/2018	37	8,9
3	12/04/2018	19/05/2018	37	14,2
4	13/04/2018	19/05/2018	36	6,2
5	13/04/2018	19/05/2018	36	10
6	13/04/2018	19/05/2018	36	8,4
7	14/04/2018	19/05/2018	35	1,9
8	14/04/2018	19/05/2018	35	2,4
9	14/04/2018	19/05/2018	35	3,2
10	16/04/2018	19/05/2018	33	9,5
11	16/04/2018	19/05/2018	33	6,4
12	16/04/2018	19/05/2018	33	8,3
Promedio				7,2

**Tabla 5.4 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros de mortero. Ensayo 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S**

Cilindro	Fecha de vaciado	Fecha de prueba	Edad (días)	f'cp (MPa)
1	16/08/2018	24/09/2018	39	1,25
2	16/08/2018	24/09/2018	39	1,01
3	23/08/2018	24/09/2018	32	0,89
4	23/08/2018	24/09/2018	32	1,13
5	24/08/2018	24/09/2018	31	1,08
6	24/08/2018	24/09/2018	31	0,86
Promedio				1,04

**Tabla 5.5 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros de mortero. Ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R.**

Cilindro	Fecha de vaciado	Fecha de prueba	Edad (días)	f'cp (MPa)
1	21/09/2018	30/10/2018	39	0,75
2	21/09/2018	30/10/2018	39	1,32
3	21/09/2018	30/10/2018	39	1,38
4	21/09/2018	30/10/2018	39	1,25
5	21/09/2018	30/10/2018	39	1,32
6	21/09/2018	30/10/2018	39	1,51
Promedio				1,26

**Tabla 5.6 Resultados ensayos a compresión uniaxial de cilindros del revoque utilizado en las franjas de reforzamiento. Ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R.**

Cilindro	Fecha de vaciado	Fecha de prueba	Edad (días)	f'cp (MPa)
1	24/09/2018	30/10/2018	36	4,58
2	24/09/2018	30/10/2018	36	4,33
3	24/09/2018	30/10/2018	36	4,02
4	25/09/2018	30/10/2018	35	3,95
5	25/09/2018	30/10/2018	35	4,79
6	25/09/2018	30/10/2018	35	4,90
7	25/09/2018	30/10/2018	35	3,36
8	25/09/2018	30/10/2018	35	3,06
9	25/09/2018	30/10/2018	35	5,08
Promedio				4,23

#### **5.4.2 Resistencia a compresión de la mampostería**

Para evaluar la resistencia a compresión de las piezas de mampostería utilizadas en el proyecto, se elaboraron 6 muretes de tres piezas con juntas de mortero de 10 mm, las cuales fueron sometidas a pruebas de compresión de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 3495. La Figura 5.14 muestra el proceso de elaboración de las pruebas de compresión y la Tabla 5.7 presenta los resultados de la resistencia a la compresión de la mampostería utilizada en los ensayos.



**Figura 5.14 Ensayo a compresión de muretes de mampostería**

**Tabla 5.7 Resultados ensayos de resistencia a la compresión de la mampostería ( $f'm$ )**

Probeta	$f'm$ (MPa)
Muestra 1	2,97
Muestra 2	1,83
Muestra 3	2,63
Muestra 4	3,76
Muestra 5	2,52
Promedio	2,74

## 6. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Este Capítulo describe el procedimiento, los resultados y un análisis de los resultados de cada ensayo. Los ensayos fueron realizados en la mesa vibradora de la Universidad EAFIT, en donde se expusieron los muros a aceleraciones pseudo sinusoidales incrementales en diferentes etapas con una frecuencia cercana a la frecuencia natural de todo el sistema que compone la mesa vibradora con la intención de alcanzar las máximas aceleraciones en la mesa. La Tabla 5.1 describe las condiciones geométricas y condiciones de apoyo de los ensayos realizados en este estudio.

La Tabla 6.1 presenta un resumen de cada uno de los ensayos, se indica el nombre del ensayo y el número de etapas donde el muro se vio sometido a señales pseudo sinusoidales. Para cada ensayo se presenta la aceleración máxima que resistió el muro, la aceleración máxima alcanzada en la última etapa, la frecuencia de la señal, la aceleración registrada en la base y a media altura del muro en la última etapa donde el muro estuvo instrumentado a media altura y el cociente entre estas dos aceleraciones.

**Tabla 6.1 Resumen de los ensayos experimentales**

Ensayo	Número de etapas	Todas las etapas	Última etapa		Otras etapas		
		A. max (H=0 m) (g)	A. max (H=0 m) (g)	Frecuencia (Hz)	A. max (H=0 m) (g)	A. max (H=1,2 m) (g)	A. H=0 m / A. H=1,2 m
1-T3-7-328-V-S	10	0,95	0,95	1,36	0,51	0,44	0,9
2-T3-7-408-V-S	10	0,95	0,95	1,36	0,51	0,56	1,1
3-T2-7-328-0-S	7	1,05	1,05	1,38	0,4	0,43	1,1
4-T2-7-408-0-S	7	1,05	1,05	1,38	0,4	0,47	1,2
5-T1-7-325-0-S	9	0,89	0,89	1,62	No hubo registros en H=1,2 m		
6-T1-1-325-0-S	1	0,18	0,18	1,6	0,18	0,18	1,0
7-T2-1-408-0-S	7	0,39	0,39	1,7	0,2	0,24	1,2
8-T1-1-325-0-R	13	0,81	0,78	1,55	0,59	1,17	2,0
9-T2-1-408-0-R	14	0,98	0,98	1,55	0,59	1,035	1,8

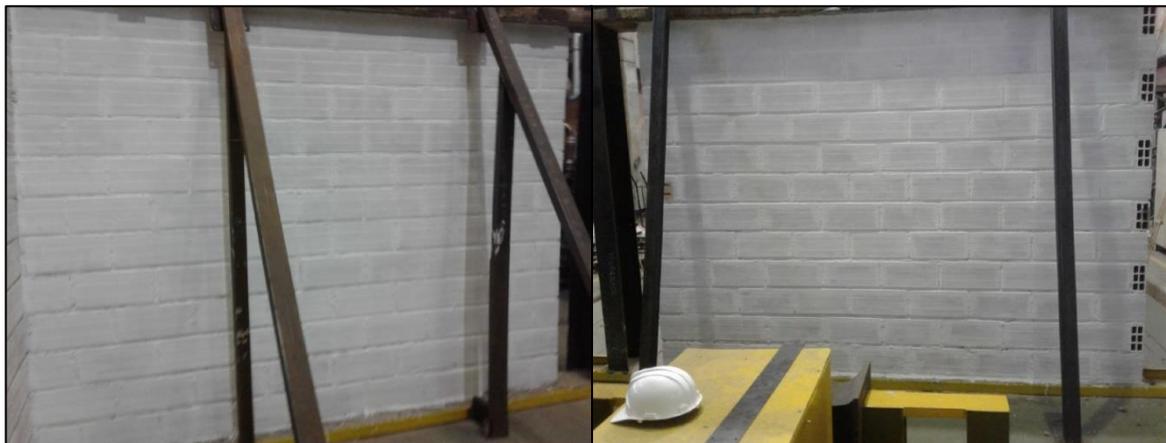
El Anexo 1 presenta en tablas el conjunto de etapas a las que se vio sometido cada ensayo y la aceleración máxima absoluta alcanzada en cada etapa. En todos los ensayos se tenía un acelerómetro que se encontraba en la superficie de la mesa vibradora (id: 507), el cual estuvo durante todas las etapas. Además, se tuvo un acelerómetro (id: 508 o 510) y un

medidor de desplazamientos (LVDT) a la mitad de la altura del muro, los cuales se removieron luego de cierta aceleración con el propósito de preservar los equipos en caso de que el muro fallara. En el Anexo 2 se presentan los registros del acelerómetro que se encontraba en la base de la mesa durante cada una de las etapas de los ensayos. Además, en este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos y en el Capítulo 7 se presenta una comparación de los resultados obtenidos y una comparación con otros resultados obtenidos en la literatura.

## 6.1 RESULTADOS DEL ENSAYO 1-T3-7-328-V-S

Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo 1-T3-7-328-V-S estuvo compuesto por un muro apoyado con restricción al giro en la parte superior, inferior y en un costado. En la parte superior presentaba la conexión mostrada en la Figura 5.1 (d). El muro contaba con un mortero de 7 MPa, una longitud de 3,28 m, una altura de 2,4 m y un espesor de 9 cm. El muro contaba con una carga axial aproximada de 0,5 kN/m que incrementaba a medida que aumentaban las aceleraciones fuera del plano debido a los puntales con los cuales se sostuvo la viga, ver explicación en la Sección 5.2.1.

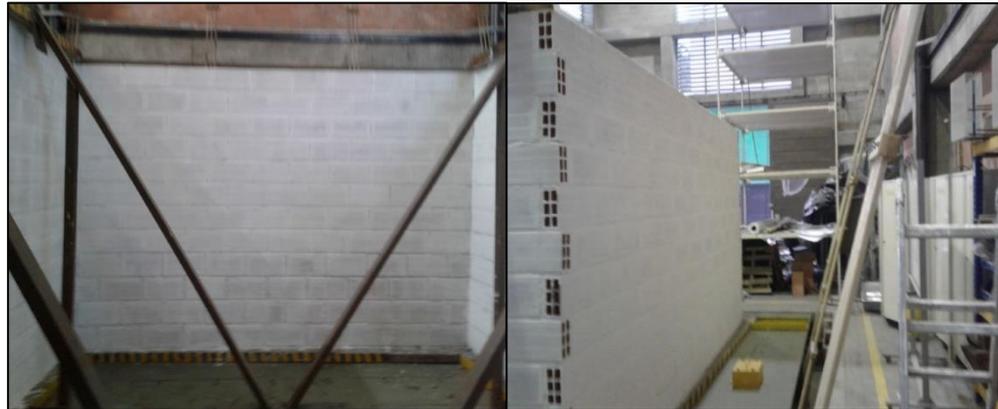
El muro no presentó daños visibles en las diferentes etapas. Las figuras 6.1 (a), 6.1 (b), 6.2 (a) y 6.2 (b) muestran que el muro no presenta daños o grietas visibles a simple vista, luego de la última etapa en donde se expuso el muro a una aceleración de 0,95 g. La resistencia del muro a aceleraciones fuera del plano fue mayor a la capacidad de la mesa de imponerlas. Es decir, no se pudo llegar a la falla del muro; sin embargo, la información recolectada permite tener un límite inferior de la capacidad de dicho muro.



(a) Vista norte

(b) Vista sur

**Figura 6.1 Estado del muro luego del ensayo 1-T3-7-328-V-S**

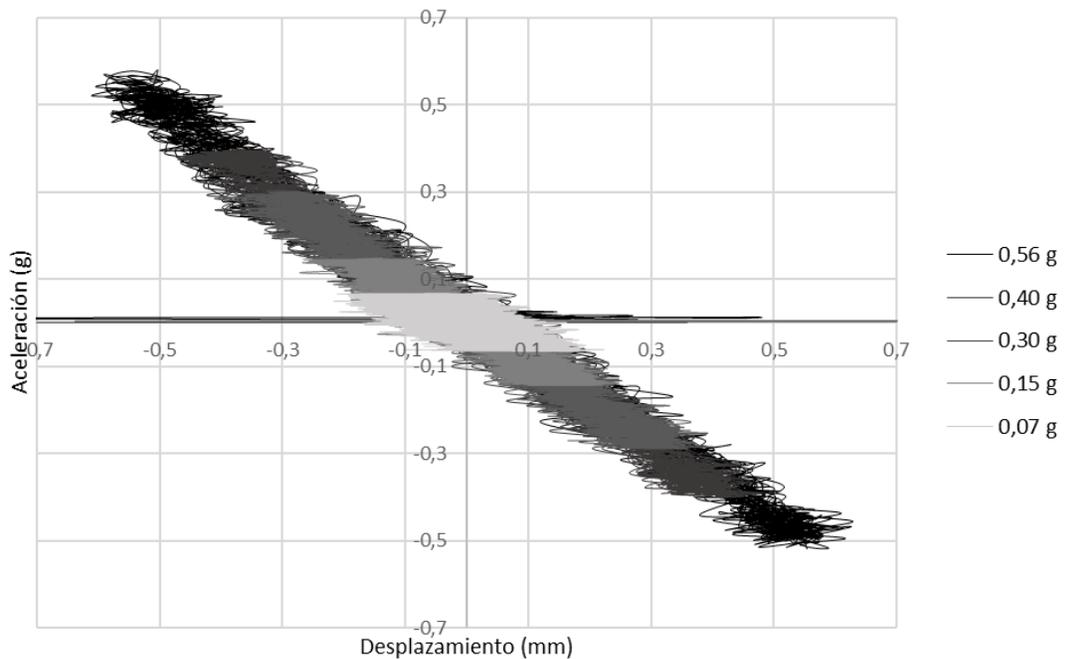


(a) Traba vista lateral

(b) Traba vista sur

**Figura 6.2 Estado del muro luego del ensayo número 1-T3-7-328-V-S**

La Figura 6.3 grafica la aceleración, registrada por el acelerómetro que se encontraba a la mitad de la altura del muro, versus el desplazamiento registrado por el LVDT. Se observa que el comportamiento del muro fue esencialmente elástico lineal, empero se presentó un leve aumento de la pendiente debido a que la carga axial sobre el muro aumentaba a medida que la aceleración aumentaba, ver explicación en la Sección 5.2.1.



**Figura 6.3 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 1-T3-7-328-V-S**

## 6.2 RESULTADOS DEL ENSAYO 2-T3-7-408-V-S

El ensayo número 2-T3-7-408-V-S estuvo compuesto por un muro apoyado en la parte superior con la conexión mostrada en la Figura 5.1 (d), apoyado en la parte inferior y un costado. El muro contaba con un mortero de mediana calidad con una resistencia a la compresión de 7 MPa, una longitud de 4,08 m, una altura de 2,4 m y un espesor de 9 cm. El muro contaba con una carga axial aproximada de 0,5 kN/m que incrementaba a medida que aumentaba la aceleración fuera del plano debido a la conexión superior, tal como se explicó en la Sección 5.2.1.

El muro no presentó grietas o daños visibles durante cada una de las etapas del ensayo. Las figuras 6.4 (a), 6.4 (b), 6.5 (a) y 6.5 (b) muestran que el muro no presenta ningún daño a simple vista, luego de ser sometido a una aceleración final aproximada de 0,95 g. Al igual que el ensayo anterior, no se pudo llegar a la capacidad última del muro debido a que se llegó a la capacidad última de la mesa vibradora de imponer aceleraciones para las cargas manejadas. Sin embargo, la información recolectada es útil porque permite tener un límite inferior de la capacidad del muro.

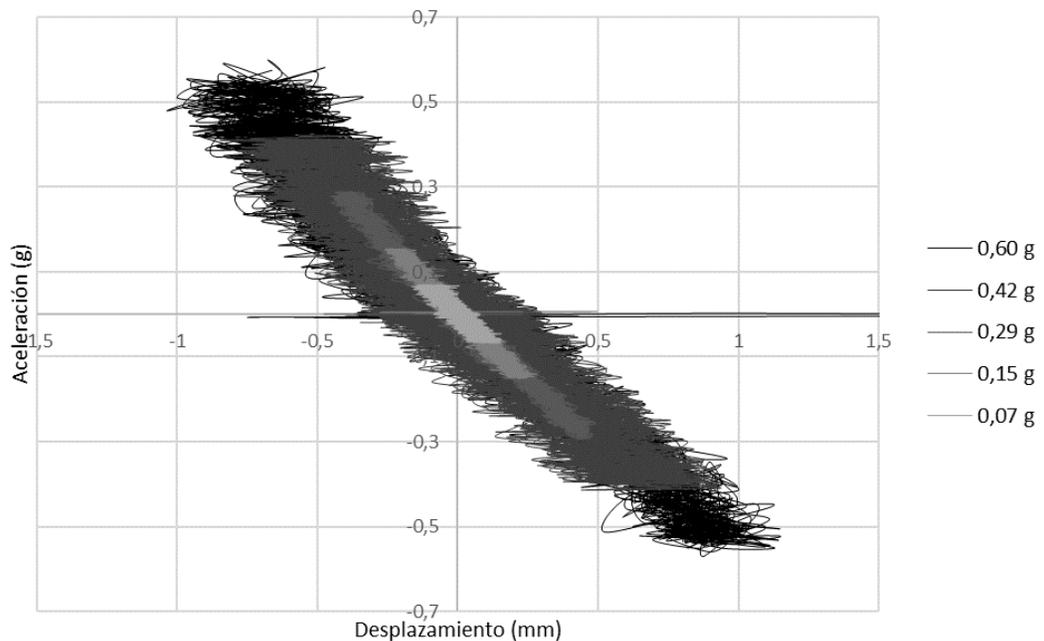


**Figura 6.4 Estado del muro luego del ensayo número 2-T3-7-408-V-S**



**Figura 6.5 Estado del muro luego del ensayo número 2-T3-7-408-V-S**

La Figura 6.6 muestra los registros de desplazamiento del LVDT y los registros de aceleración del acelerómetro, que se encontraban a la mitad de la altura del muro. Al igual que en la Figura 6.3, se observa que el muro presentó un comportamiento elástico lineal, empero se presentó un leve aumento de la pendiente debido a que la carga axial sobre el muro incrementaba a medida que la aceleración se acrecentaba, ver explicación en la Sección 5.2.1. Se resalta que esta curva es errática porque el ensayo es dinámico.



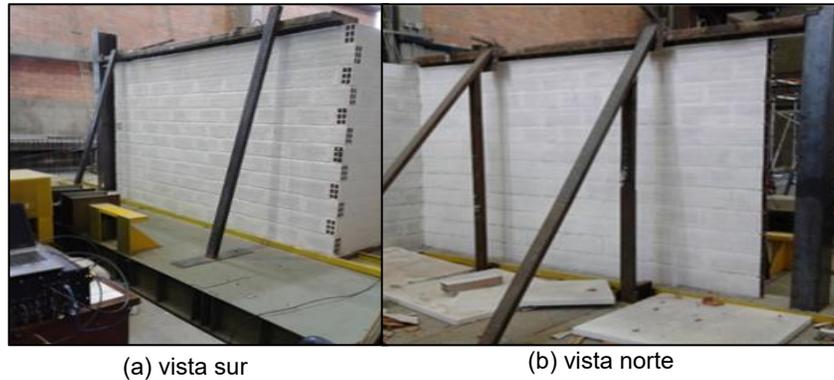
**Figura 6.6 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 2-T3-7-408-V-S**

### 6.3 RESULTADOS DEL ENSAYO 3-T2-7-328-0-S

El ensayo número 3-T2-7-328-0-S consistió en ensayar nuevamente el muro del ensayo número 1-T3-7-328-V-S pero cambiando la conexión superior de este muro presentada en la Figura 5.1 (d) por la conexión presentada en la Figura 5.1 (c). La diferencia radica en que con la conexión de la Figura 5.1 (c) se suprime la carga axial y la restricción al giro en la parte superior, conservando la restricción a movimientos laterales. Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 3-T2-7-328-0-S estuvo compuesto muro con un mortero de 7 MPa, una longitud de 3,28 m, una altura de 2,4 m y un espesor de 9 cm.

El muro del ensayo número 3-T2-7-328-0-S no presentó daño aparente y los videos en cámara lenta no muestran ningún indicio de daños o presencia de grietas horizontales o laterales. Luego del ensayo y luego de ser sometido a una aceleración de 1,05 g, se observó que la traba entre el muro en estudio y el muro que lo interceptaba de forma ortogonal no presentó ningún daño o desprendimiento aparente. Igualmente, en la cara sur y norte no se observó ningún indicio de daños o grietas. Las figuras 6.7 (a), 6.7 (b), 6.8 (a) y 6.8 (b) muestran las condiciones del muro luego del ensayo.

Durante el ensayo se llegó a la capacidad última de la mesa vibradora por lo que no fue posible seguir aumentando la aceleración hasta la falla del muro.



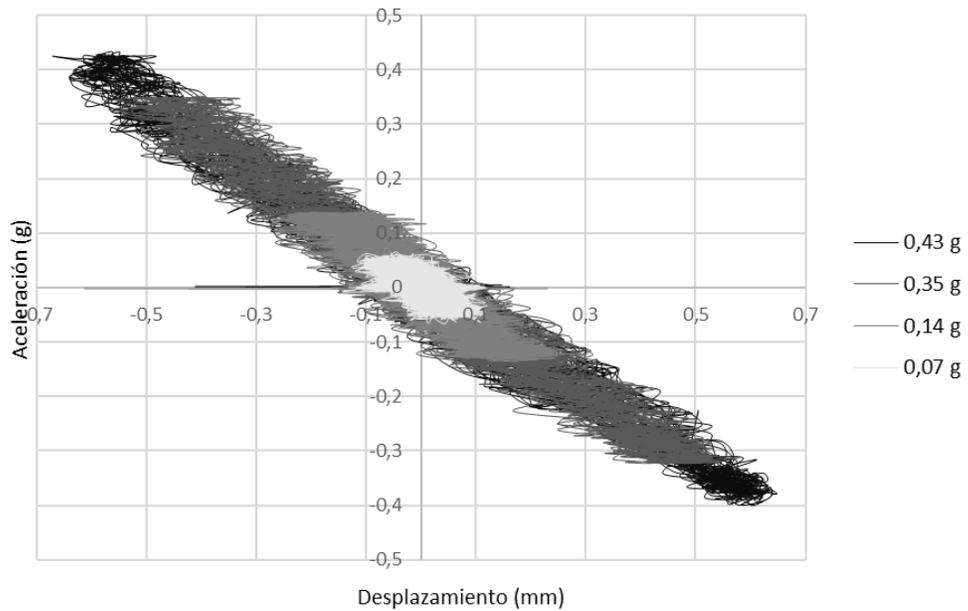
**Figura 6.7 Estado del muro luego del ensayo 3-T2-7-328-0-S**



(a) Traba vista norte (b) Traba vista sur

**Figura 6.8 Estado de la traba luego del ensayo 3-T2-7-328-0-S**

La Figura 6.9 grafica el desplazamiento registrado por el LVDT y la aceleración registrada por el acelerómetro. Al igual que en las relaciones desplazamiento-aceleración del ensayo número 1-T3-7-328-V-S y número 2-T3-7-408-V-S se presentó un comportamiento elástico lineal. Sin embargo, la pendiente promedio de la curva de la Figura 6.9 es menor a la pendiente promedio de las curvas expuestas en la Figura 6.3, lo que quiere decir que el cambio de conexión en la parte superior hace que el muro del ensayo número 3-T2-7-328-0-S tenga una menor rigidez que el muro del ensayo número 1-T3-7-328-V-S.



**Figura 6.9 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 3-T2-7-328-0-S**

## 6.4 RESULTADOS DEL ENSAYO 4-T2-7-408-0-S

El ensayo número 4-T2-7-408-0-S consistió en ensayar nuevamente el muro de la prueba número 2-T3-7-408-V-S pero cambiando la conexión superior de este muro presentada en la Figura 5.1 (d) por la conexión expuesta en la Figura 5.1 (c). La diferencia radica en que con la conexión de la Figura 5.1 (c) se suprime la carga axial y la restricción al giro en la parte superior. Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 4-T2-7-408-0-S estuvo compuesto por un muro con un mortero de 7 MPa, una longitud de 4,08 m, una altura de 2,4 m y un espesor de 9 cm.

El muro del ensayo número 4-T2-7-408-0-S falló durante la etapa número 7 con una aceleración última de 1,05 g. La falla ocurrió cuando el muro se desprendió de la traba que existía con el muro que lo interceptaba, tal como lo muestra la Figura 6.10. Los ladrillos, del muro que se encontraban trabados con el otro muro, fallaron por tracción; esta falla implica que a los modelos teóricos se le debe agregar otro estado límite último que es la resistencia a tracción del ladrillo cuando se presenta la misma configuración que tenía el ensayo.

Cuando los ladrillos fallaron a tracción, los dos muros se desprendieron y en consecuencia el muro en estudio perdió la condición de apoyo lateral y quedó como si sólo estuviera apoyado en la parte superior e inferior. Cuando esto ocurrió el muro tuvo una grieta a una altura aproximada del 70% de su altura que fue la causa de la falla. Este tipo de falla es típica de los muros de mampostería no reforzada que se encuentran apoyados en la parte inferior y articulados en la parte superior. Las figuras 6.11 y 6.12 muestran los momentos exactos de la falla del muro desde una vista diagonal y vista norte.



**Figura 6.10 Conexión lateral luego de la falla del ensayo 4-T2-7-408-0-S**

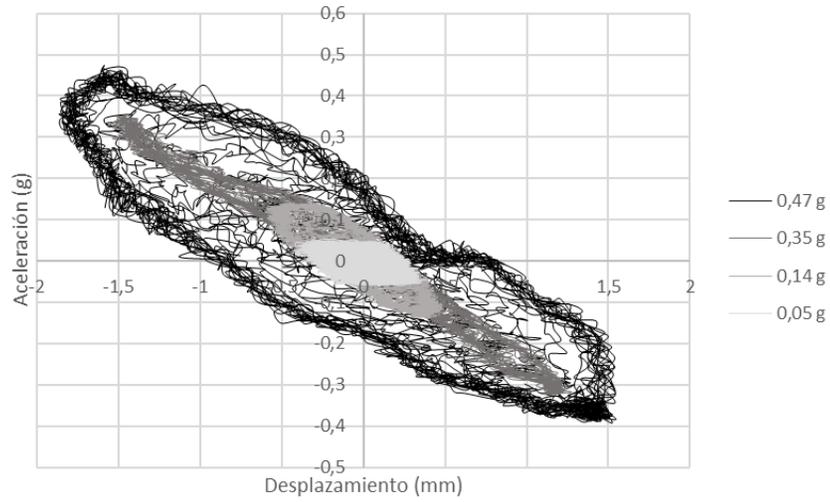


**Figura 6.11 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S (vista diagonal)**



**Figura 6.12 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S (vista norte)**

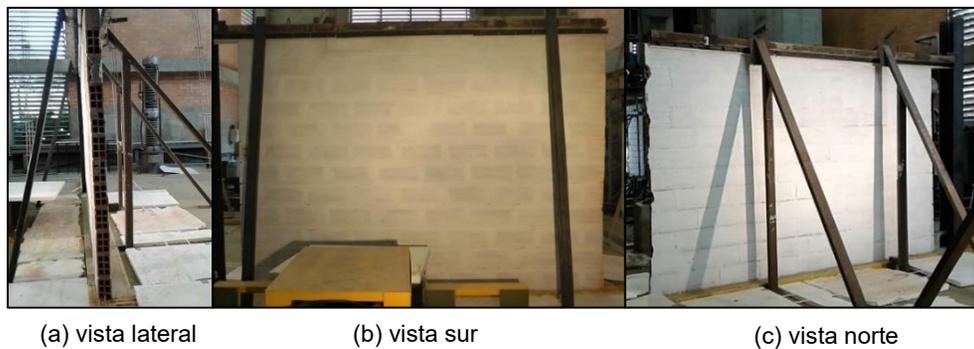
La Figura 6.13 grafica el desplazamiento, registrado por el LVDT, versus la aceleración, registrada por el acelerómetro. El comportamiento del muro fue elástico y lineal, sin embargo, durante la tercera etapa se nota un leve cambio de pendiente que puede ser ocasionado por el hecho de que el muro empieza a sufrir daños o fisuración. Además, durante la cuarta etapa se observa que el ciclo deja de comportarse de forma lineal, esto puede ser ocasionado por daños o fisuraciones ocurridas a medida que aumenta la aceleración.



**Figura 6.13** Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S

## 6.5 RESULTADOS DEL ENSAYO 5-T1-7-325-0-S

Para el ensayo número 5-T1-7-325-0-S se removió la traba que tenía el muro de la prueba 3-T2-7-328-0-S con el muro que lo interceptaba de forma ortogonal. Esto se hizo con el propósito de ensayar un muro que sólo estuviera apoyado con restricción al giro en la parte inferior y articulado en la parte superior. La traba entre los muros fue removida por medio de una sierra eléctrica. Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 5-T1-7-325-0-S estuvo compuesto por un muro con una longitud de 3,25 m, una altura de 2,4 m, un espesor de 9 cm y un mortero de 7 MPa. Las figuras 6.14 (a), (b) y (c) muestran el montaje antes de la realización del ensayo.



**Figura 6.14** Montaje del ensayo número 5-T1-7-325-0-S

El muro falló en la etapa número 9 con una aceleración última de 0,89 g; éste presentó una falla típica de un muro de mampostería no reforzada que se encuentra apoyado en la parte inferior y superior. Se observa una grieta horizontal a una altura equivalente al 60 % de la altura del espécimen y una grieta en la parte inferior del muro. Estas dos grietas junto al giro del muro en la parte superior son los que provocaron la inestabilidad y el colapso del muro de mampostería.

Las figuras 6.15 a 6.17 muestran el momento exacto cuando falla el muro de mampostería, se observan las grietas horizontales producidas por el giro de los dos tramos de muro y el comportamiento en forma de cuerpo rígido de ambos tramos, tal como lo describe el modelo de Doherty *et al.* (2002).



**Figura 6.15 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 5-T1-7-325-0-S (vista norte)**



**Figura 6.16 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 5-T1-7-325-0-S (vista sur)**



**Figura 6.17 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 5-T1-7-325-0-S (vista este)**

## **6.6 RESULTADOS DEL ENSAYO 6-T1-1-325-0-S**

Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 6-T1-1-325-0-S estuvo compuesto por un muro con una longitud de 3,25 m, una altura de 2,4 m, un espesor de 9 cm y un mortero de 1 MPa. Además, con el propósito de eliminar la resistencia a tracción del mortero, durante la construcción se fisuró la unión entre el mortero de pega y el ladrillo a medida que se iban poniendo las hiladas de ladrillo. Este muro se encontraba apoyado con restricción al giro en la parte inferior y articulado en la parte superior en donde presentaba la conexión mostrada en la Figura 5.1 (c). El muro no contaba con carga axial adicional a la de su propio peso.

Este ensayo contó con una sola etapa de aceleraciones debido a que la falla del muro se dio a una aceleración equivalente a 0,18 g. La diferencia entre la resistencia que tuvieron el ensayo número 5-T1-7-325-0-S y el ensayo número 6-T1-1-325-0-S muestra que la resistencia a tracción del mortero y su calidad influyen en la resistencia fuera del plano de muros de mampostería no reforzada y que la resistencia última del muro podría no depender exclusivamente de mecanismos de estabilidad.

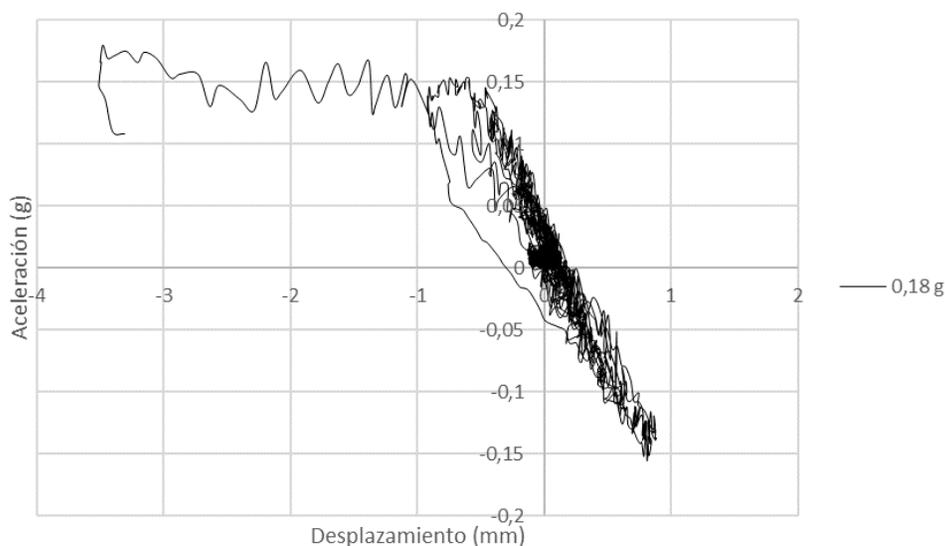
El muro del ensayo número 6-T1-1-325-0-S presentó durante la primera etapa una grieta en el 75% de su altura antes de su colapso. Este comportamiento es similar al comportamiento que tuvieron los muros de los ensayos 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S, sin embargo, en estos ensayos la altura de la grieta fue a una altura del 70% y 60% de la altura del espécimen, respectivamente.

La Figura 6.18 muestra el momento exacto antes de la falla del muro, se observa que el muro se comporta tal como se define el modelo de Doherty *et al.* (2002), es decir, el muro se divide en dos y cada uno de los tramos se comporta como si fuese un cuerpo rígido.



**Figura 6.18 Momento exacto de la falla del muro del ensayo 6-T1-1-325-0-S (vista sur)**

La Figura 6.19 grafica el desplazamiento, registrado por el LVDT, versus la aceleración, registrada por el acelerómetro que se encontraba en el muro. A diferencia de las curvas desplazamiento-aceleración anteriores, ésta tuvo el LVDT y el acelerómetro hasta la falla del muro. Se observa que la relación entre estas dos variables es elástica y lineal hasta que se llega a la capacidad última del muro, donde éste se vuelve inestable y el desplazamiento aumenta más y más para una misma aceleración hasta su falla.



**Figura 6.19 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 6-T1-1-325-0-S**

## 6.7 RESULTADOS DEL ENSAYO 7-T2-1-408-0-S

Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 7-T2-1-408-0-S estuvo compuesto por un muro con una longitud de 4,08 m, una altura de 2,40 m, un espesor de 9 cm y un mortero de 1 MPa. Al igual que en el ensayo número 6-T1-1-325-0-S, con el propósito de

eliminar la resistencia a tracción del mortero, durante la construcción se fisuró la unión entre el mortero de pega y el ladrillo a medida que se iban poniendo las hiladas de ladrillo. Este muro se encontraba apoyado con restricción al giro en la parte inferior y un costado, y articulado en la parte superior en donde presentaba la conexión mostrada en la Figura 5.1 (c). El muro no contaba con una carga axial adicional a la de su propio peso. Este ensayo era una réplica del muro del ensayo número 5-T1-7-325-0-S, pero con un mortero de pobres especificaciones. Lo que se buscaba con este ensayo era evaluar la influencia de la resistencia a tracción del mortero en la resistencia última del muro a aceleraciones fuera del plano.

El colapso del muro se dio a una aceleración aproximada de 0,39 g, lo que significa que la resistencia fuera del plano del muro del ensayo número 7-T2-1-408-0-S fue menor que la resistencia fuera del plano del muro del ensayo número 4-T2-7-408-0-S. Este hecho indica que la resistencia a tracción y la calidad del mortero influyen en la resistencia de los muros de mampostería no reforzada a aceleraciones fuera del plano y que la resistencia última del muro no depende exclusivamente de mecanismos de estabilidad.

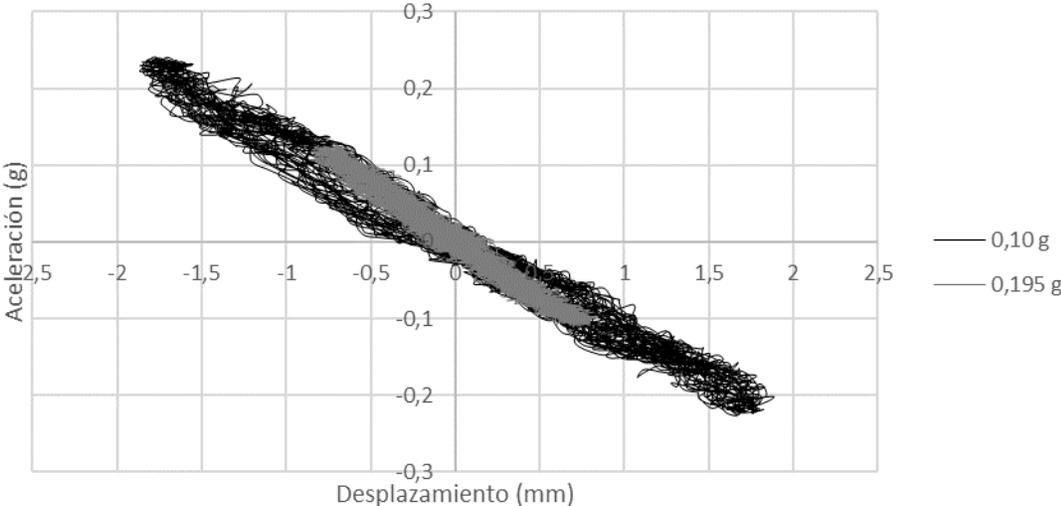
El muro durante etapas tempranas presentó una grieta horizontal a una altura equivalente al 75 % de su altura y presentó un conjunto de grietas diagonales que interceptaban a la grieta horizontal. Además, en las últimas etapas se observó desprendimientos entre las piezas superiores que se encontraban trabadas con el muro que interceptaba de forma ortogonal el muro en estudio. Sin embargo, a diferencia del ensayo número 4-T2-7-408-0-S este desprendimiento no se dio en toda la altura del muro. La Figura 6.20 muestra el momento exacto antes de la falla del muro.



**Figura 6.20 Momento de la falla del muro del ensayo 7-T2-1-408-0-S (vista norte)**

La Figura 6.21 grafica el desplazamiento, medido por el LVDT, y la aceleración, medida por el acelerómetro que se encontraba a la mitad de la altura del muro. Al igual que las curvas desplazamiento-aceleración de los otros ensayos, se observa que el comportamiento del muro fue elástico y lineal para aceleraciones inferiores a su capacidad última. Cuando se

compara la curva desplazamiento-aceleración presente en la Figura 6.21 con la curva desplazamiento-aceleración presente en la Figura 6.13, se puede constatar que la pendiente promedio de la curva del ensayo número 4-T2-7-408-0-S es mayor a aquella del ensayo número 7-T2-1-408-0-S. Esto indica que la resistencia a tracción del mortero tiene influencia en la rigidez y resistencia del muro a aceleraciones fuera del plano.



**Figura 6.21** Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 7-T2-1-408-0-S

## 6.8 RESULTADOS DEL ENSAYO 8-T1-1-325-0-R

El ensayo número 8-T1-1-325-0-R estuvo compuesto por una réplica del muro del ensayo número 6-T1-1-325-0-S, pero a diferencia de éste, el muro se reforzó con franjas de mallas electrosoldadas y mortero. El muro contó con tres franjas a cada lado: dos franjas en los extremos y una en la mitad. El espesor de la franja era de aproximadamente 3 cm, el ancho de la franja era de 35 cm, la separación entre ejes de malla fue de 145 cm y cada franja contaba con 2 cuadrículas de malla electrosoldada, tal como se muestra en las figuras 5.5, 6.22 (a) y 6.22 (b). Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 8-T1-1-325-0-R estuvo compuesto por un muro con una longitud de 3,25 m, una altura de 2,4 m, un espesor de 9 cm y un mortero de 1 MPa. Al igual que el ensayo número 6-T1-1-325-0-S, durante la construcción del muro se fisuró el muro a medida que se ponían las hiladas de ladrillos con el propósito de eliminar la resistencia a tracción del mortero.



**Figura 6.22 Apariencia del muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R**

El muro presentó algunas grietas en la base en las últimas etapas del ensayo y desprendimientos entre las franjas y el muro, tal como se muestra en las figuras 6.23 (a) y (b). El muro falló luego de ser sometido a una aceleración máxima de 0,81 g registrada en la base de la mesa vibradora; sin embargo, se resalta que el muro soportó 4 etapas en donde se le expuso a aceleraciones iguales o superiores a 0,77 g.

Las figuras 6.24 (a), (b) y (c) muestran la secuencia de la falla, la cual se presentó luego de que se desprendiera una de las franjas del muro. Este desprendimiento provocó la falla de la parte izquierda del muro y desprendimiento de otras de las franjas. Los resultados experimentales muestran que las franjas de mallas electrosoldadas aumentaron por más de 4 veces la resistencia a aceleraciones fuera del plano cuando se compara esta prueba con el 6-T1-1-325-0-S. Se resalta que este reforzamiento podría funcionar aún mejor si se conectaran las franjas de cada lado por medio de ganchos para mantener la unión entre el muro y la franja, y si éstas se anclaran a la viga de fundación.



(a) Parte inferior de una de las franjas

(b) Parte lateral de una de las franjas

**Figura 6.23 Daño local del muro antes del colapso ensayo 8-T1-1-325-0-R**



(a) Momento I

(b) Momento II

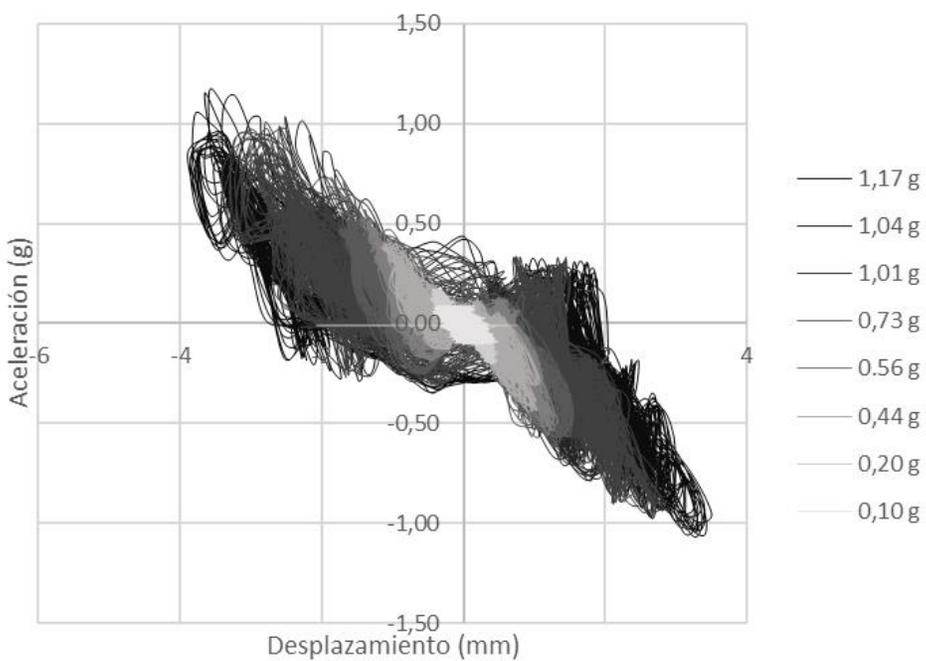
(c) Momento III

**Figura 6.24 Momento de la falla del muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R**

La Figura 6.25 grafica el desplazamiento y aceleración registrados por el LVDT y el acelerómetro que se encontraban a la mitad de la altura del muro. Esta curva difiere de las expuestas en las figuras 6.3, 6.6, 6.9, 6.13, 6.19 y 6.21 de los ensayos anteriores debido a que su comportamiento no es estrictamente lineal sino que tiene unos trazos más abiertos que podrían indicar aumento en la ductilidad y aumento en la capacidad de disipación de energía. Al comparar esta curva con la presentada en Figura 6.19 se observa que las franjas de mallas electrosoldadas aumentan la rigidez de la estructura y la estabilidad del muro debido a que hay mayor tolerancia a los desplazamientos.

Por otro lado, se observa que estas franjas ocasionaron una amplificación de las aceleraciones a la mitad de la altura del muro que no se observó en los ensayos anteriores. El acelerómetro se encontraba sobre una de las franjas de reforzamiento por lo que se cree que esta amplificación es local en el muro y se dio a medida que la franja se iba despegando del muro. En la

Tabla 9.8 se observa que este factor de amplificación tiende a incrementarse a medida que la aceleración aumenta y no a medida que se cambia la frecuencia de la señal pseudo sinusoidal. Por ende, se toma como aceleración máxima resistida la aceleración máxima registrada en la base de la mesa vibradora. Sin embargo, se debe investigar más a fondo en ensayos futuros.



**Figura 6.25 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R**

## 6.9 RESULTADOS DEL ENSAYO 9-T2-1-408-0-R

El ensayo número 9-T2-1-408-0-R estuvo compuesto una réplica del muro del ensayo número 7-T2-1-408-0-S, pero a diferencia de éste, el muro se reforzó con franjas de mallas electrosoldadas y mortero. El muro contó con tres franjas a cada lado: dos franjas en los extremos y una en la mitad; la franja del extremo, que se encontraba en la intersección con el otro muro, fue hecha en toda la esquina para garantizar la unidad de ambos muros, tal como se muestra en las figuras 5.5, 5.13, 6.26 (a) y 6.26 (b). El espesor de la franja era de aproximadamente 3 cm, el ancho de la franja era de 35 cm, la separación entre ejes de malla fue de 192 cm y cada franja contaba con 2 cuadrículas de malla electrosoldada tal como se muestra en la Figura 5.5. Como se mencionó en la Tabla 5.1, el ensayo número 9-T2-1-408-0-R estuvo compuesto por muro con una longitud de 4,08 m, una altura de 2,4 m, un espesor de 9 cm y un mortero de 1 MPa. Al igual que el ensayo número 7-T2-1-408-0-S, durante la construcción del muro éste se fisuró a medida que se ponían las hiladas de ladrillos con el propósito de eliminar la resistencia a tracción del mortero.



(a) Vista norte

(b) Vista sur

**Figura 6.26 Apariencia del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R**

El muro presentó algunas grietas en la base luego de las últimas etapas del ensayo y presentaba grietas que se abrían y cerraban durante el ensayo a la mitad de la altura de las franjas, tal como se muestra en las figuras 6.27 (a) y (b). El muro falló luego de ser sometido a una aceleración máxima de 0,98 g. Al igual que el ensayo anterior, este muro fue sometido a 4 registros en donde la aceleración fue igual o mayor a 0,78 g.

Durante el ensayo de este muro se observó que había mayores desplazamientos en el extremo que no se encontraba apoyado y es en este extremo donde se produjo la falla local que indujo el colapso del muro. La falla se dio por un desprendimiento de la franja en la parte inferior del muro que ocasionó su colapso hasta la franja siguiente, ver figuras 6.28 (a), (b), (c) y (d). Se resalta que en la franja de la mitad se produjo una línea de rotura vertical, lo que indica que estas franjas ayudan a activar el mecanismo de resistencia de flexión horizontal de la mampostería, ver figuras 6.29 (a) y (b). Además, los resultados experimentales mostraron que las franjas de mallas electrosoldadas aumentaron por 2,5

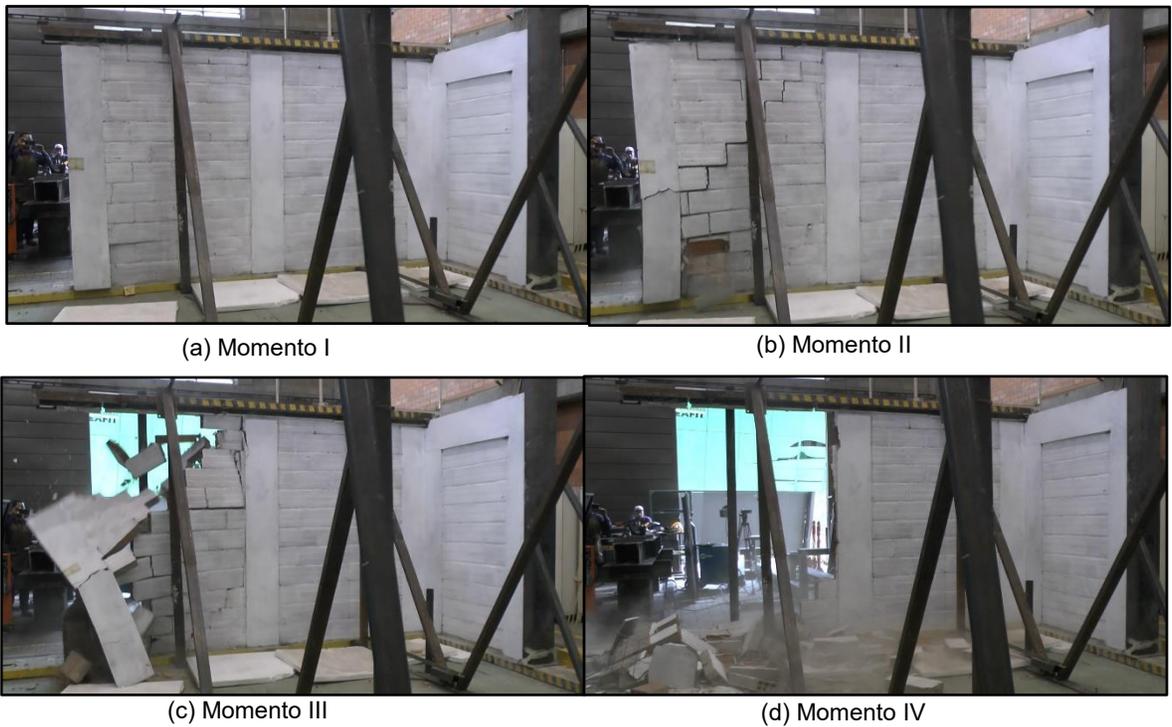
veces la resistencia a aceleraciones fuera del plano, estos resultados experimentales no se alejan de las predicciones teóricas utilizando la teoría clásica de flexión de vigas, a pesar de que la franja se desprendió.



(a) Grietas a media altura de una de las franjas

(a) Grietas en la parte inferior de una de las franjas

**Figura 6.27 Daño local del muro luego del ensayo 9-T2-1-408-0-R**



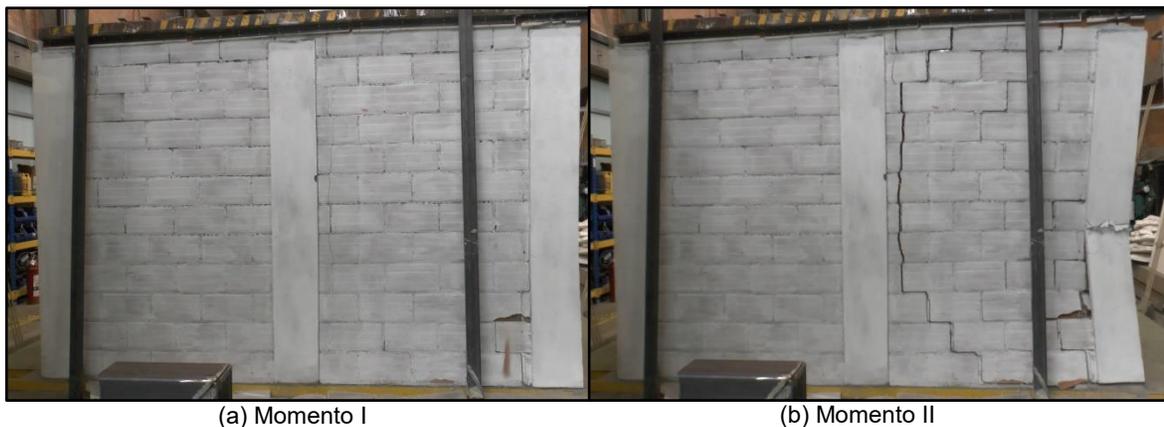
(a) Momento I

(b) Momento II

(c) Momento III

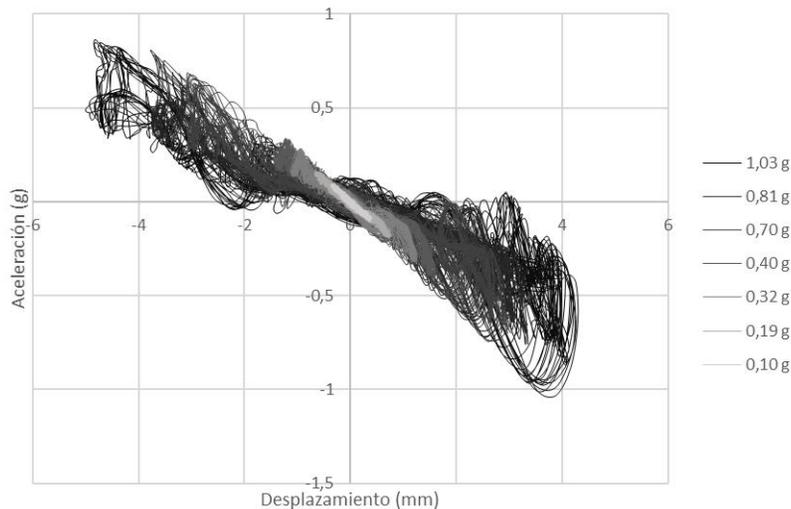
(d) Momento IV

**Figura 6.28 Momento de la falla del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R, vista sur**



**Figura 6.29 Momento de la falla del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R, vista norte**

La Figura 6.30 grafica el desplazamiento versus la aceleración registrados por el LVDT y el acelerómetro que se encontraban a la mitad de la altura del muro. Al comparar esta curva con la expuesta en la Figura 6.21 se observa que las franjas de mallas electrosoldadas aumentan la rigidez del muro y le dan mayor estabilidad dada la tolerancia de desplazamientos que se observa en la curva. Esta curva difiere en forma de la curva de la Figura 6.25 porque el LVDT en el ensayo 9-T2-1-408-0-R estuvo sobre la mampostería y en el ensayo 8-T1-1-325-0-R estaba sobre la franja.



**Figura 6.30 Curva desplazamiento-aceleración del muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R**

Al igual que en el ensayo anterior, el acelerómetro se encontraba sobre las franjas de reforzamiento y las aceleraciones registradas a la mitad de la altura del muro son significativamente mayores a las registradas en la base de la mesa vibratoria. Es decir, se presentó un efecto de resonancia que amplifica las aceleraciones a la mitad de la altura del

muro sobre la franja de reforzamiento. No se cree que esta amplificación se haya dado en todo el muro, sino que es una amplificación local en las franjas ocasionada al irse despegando del muro; por eso se observa que en las primeras etapas el factor de amplificación es menor que en las últimas y que este factor de amplificación aumentan a medida que aumenta la aceleración y no a medida que se cambia la frecuencia de la señal pseudo sinusoidal, ver Tabla 9.9. Esto significa que todo el muro no sufrió la amplificación, sino que pudo ser una amplificación local al despegarse la franja, por ello se toma como aceleración máxima resistida la aceleración registrada en la base del muro. Sin embargo, se debe investigar más a fondo en ensayos futuros.

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

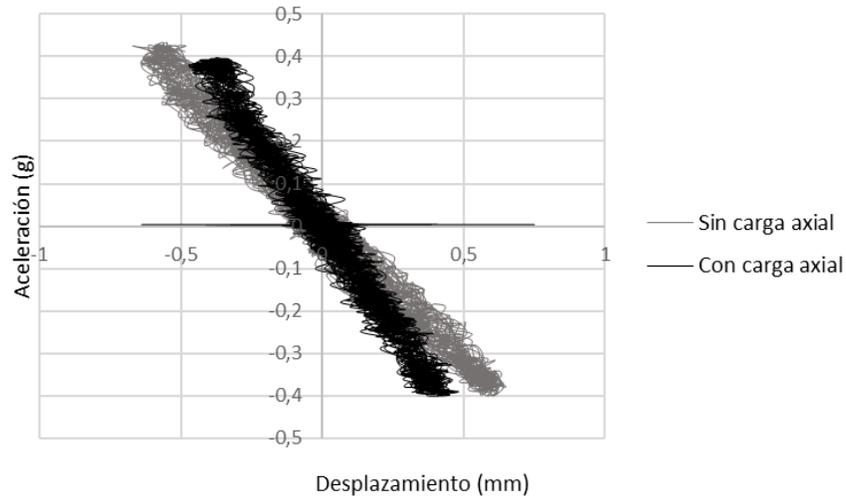
Este Capítulo presenta una discusión de los resultados obtenidos en los ensayos, se realiza un análisis de cada una de las variables independientes evaluadas en los ensayos y se comparan los resultados de los ensayos cuando esa variable específica cambia. Además, se presenta una comparación con los resultados experimentales que hay en la literatura, para esto se presenta la Tabla 7.1 que muestra un resumen de las aceleraciones máximas resistidas en cada uno de los ensayos de esta investigación y la Tabla 7.3 que resumen algunos ensayos presentes en la literatura.

**Tabla 7.1 Resumen de las aceleraciones resistidas por los muros de cada ensayo**

Ensayo	Aceleración máxima resistida (g)	¿El muro falló?
1-T3-7-328-V-S	0,95	No
2-T3-7-408-V-S	0,95	No
3-T2-7-328-0-S	1,05	No
4-T2-7-408-0-S	1,05	SI
5-T1-7-325-0-S	0,89	SI
6-T1-1-325-0-S	0,18	SI
7-T2-1-408-0-S	0,39	SI
8-T1-1-325-0-R	0,81	SI
9-T2-1-408-0-R	0,98	SI

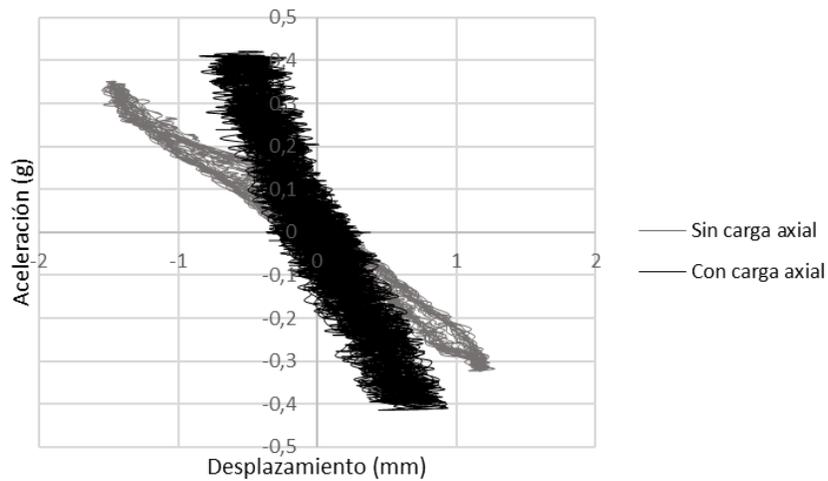
### 7.1 INFLUENCIA DE LA CARGA AXIAL

La Figura 7.1 sobrepone las curvas desplazamiento-aceleración de los muros de los ensayos número 1-T3-7-328-V-S y número 3-T2-7-328-0-S. Estas curvas muestran que la carga axial hace que un muro de mampostería tenga mayor rigidez ante cargas fuera del plano. Teniendo en cuenta que los muros tenían la misma geometría y resistencia del mortero, el muro con mayor carga axial resistió mayores aceleraciones fuera del plano que el muro con una carga axial más baja. Esto concuerda con los modelos teóricos presentes en la literatura como: Priestley (1985), Jaramillo (2002) y Doherty et al (2002).



**Figura 7.1 Comparación de la curva desplazamiento-aceleración entre los ensayos número 1-T3-7-328-V-S y 3-T2-7-328-0-S**

La Figura 7.2 sobrepone las curvas desplazamiento-aceleración de los muros de los ensayos número 2-T3-7-408-V-S y número 4-T2-7-408-0-S. Al igual que en la Figura 7.1, se observa que la rigidez del muro es mayor cuando hay presencia de carga axial. Por otro lado, se nota que la curva del muro con carga axial parece aumentar su pendiente a medida que las aceleraciones se incrementan, esto es razonable gracias a que la conexión que tenía estos ensayos generaba una carga axial incremental que variaba a medida que las aceleraciones aumentaban, ver explicación en la Sección 5.2.1.

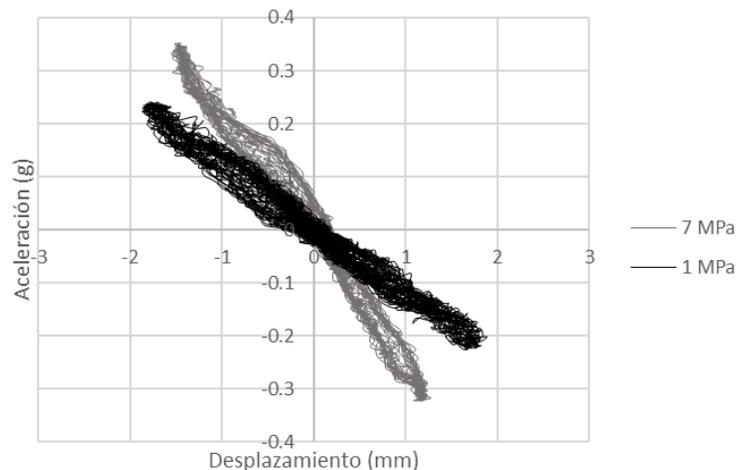


**Figura 7.2 Comparación de la curva desplazamiento-aceleración entre los ensayos número 2-T3-7-408-V-S y 4-T2-7-408-0-S**

A pesar de que el muro del ensayo número 4-T2-7-408-0-S resistió aceleraciones similares a la de muro del ensayo número 2-T3-7-408-V-S, se resalta que el muro del ensayo número 2-T3-7-408-V-S no pudo ser sometido a aceleraciones más altas por la incapacidad de la mesa vibradora de imponerlas. No obstante, teniendo en cuenta la Figura 7.2, el muro del ensayo número 2-T3-7-408-V-S es más estable y resistente que el muro del ensayo número 4-T2-7-408-0-S porque es capaz de resistir mayores aceleraciones con menores desplazamientos. Igualmente, teniendo en cuenta la Figura 7.1, el muro del ensayo número 1-T3-7-328-V-S es más estable y resistente que el muro del ensayo número 3-T2-7-328-0-S.

## 7.2 INFLUENCIA DE LA CALIDAD DEL MORTERO

Los resultados muestran que la presencia de la resistencia a tracción del mortero puede hacer que el muro soporte aceleraciones más altas. La Figura 7.3 muestra que la resistencia a tracción hace que el muro sea más rígido, por lo que resiste aceleraciones más altas con desplazamientos menores. Las aceleraciones máximas soportadas por los muros son mayores cuando se tiene un mortero de mejor calidad y cuando el muro no está fisurado. Por ejemplo, el muro del ensayo número 5-T1-7-325-0-S, que tenía un mortero de 7 MPa y no se encontraba fisurado, soportó una aceleración de 0,89 g; mientras que el muro del ensayo número 6-T1-1-325-0-S, que tenía un mortero de 1 MPa y se encontraba fisurada la unión entre el ladrillo y el mortero, con el propósito de eliminar la resistencia a tracción, soportó una aceleración de 0,18 g. Asimismo, el muro del ensayo 7-T2-1-408-0-S, que tenía un mortero de 1 MPa y se encontraba fisurada la unión entre el mortero y el ladrillo, soportó una aceleración 0,39 g, mientras que el muro del ensayo 4-T2-7-408-0-S, que tenía un mortero de 7 MPa, soportó una aceleración de 1,05 g

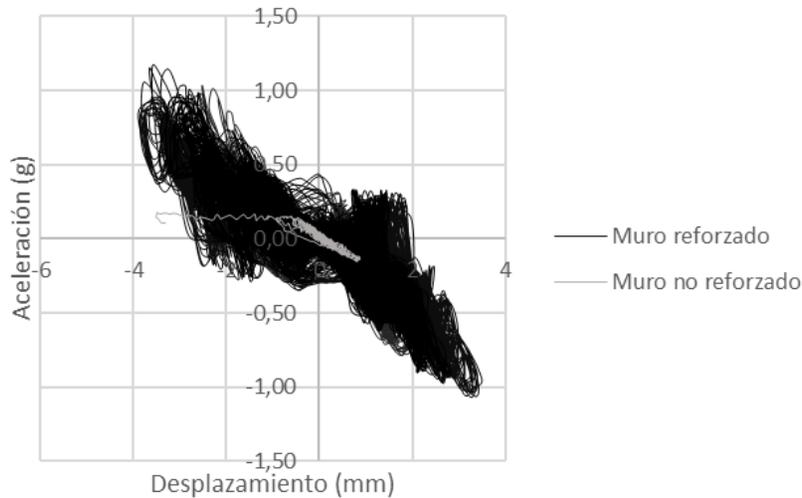


**Figura 7.3 Comparación de la curva desplazamiento-aceleración entre el ensayo número 4-T2-7-408-0-S y el ensayo número 7-T2-1-408-0-S**

### 7.3 COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS REFORZADOS CON FRANJAS DE MALLAS ELECTROSOLDADAS Y MORTERO

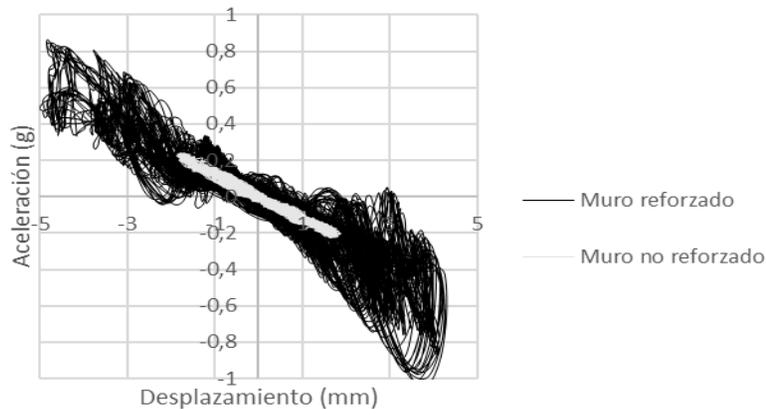
Al comparar los resultados de los ensayos 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S con los ensayos 8-T1-1-325-0-R y 9-T2-1-408-0-R se observa que las franjas de mallas electrosoldadas aumentan la capacidad y la ductilidad del muro ante aceleraciones fuera del plano.

El ensayo número 6-T1-1-325-0-S soportó una aceleración equivalente a 0,18 g mientras que el ensayo número 8-T1-1-325-0-R soportó una aceleración equivalente a 0,81 g; por ende, la implementación de las franjas de mallas electrosoldadas y mortero hizo que la capacidad del muro ante cargas fuera del plano se aumentara en 4,5 veces. La Figura 7.4 sobrepone las curvas desplazamiento versus aceleración de los dos ensayos, en donde se observa el aumento de la capacidad y ductilidad del muro ante aceleraciones fuera del plano al implementar la metodología de franjas de mallas electrosoldadas.



**Figura 7.4 Comparación entre curvas desplazamiento versus aceleración ensayos 6-T1-1-325-0-S y 8-T1-1-325-0-R**

Por otro lado, el muro del ensayo número 7-T2-1-408-0-S soportó una aceleración equivalente a 0,39 g, mientras que el muro de ensayo número 9-T2-1-408-0-R soportó una aceleración equivalente a 0,98 g. En conclusión, la metodología de franjas de mallas electrosoldadas y mortero aumentó en 2,5 veces la resistencia del muro a aceleraciones fuera del plano. La Figura 7.5 muestra que el muro reforzado con franjas de mallas electrosoldadas presenta una mayor resistencia a aceleraciones y desplazamientos, además, se nota un leve aumento en la rigidez del muro reforzado del ensayo 9-T2-1-408-0-R al compararla con la rigidez promedio del ensayo 7-T2-1-408-0-S.



**Figura 7.5 Comparación entre curvas desplazamiento versus aceleración ensayos 7-T2-1-408-0-S y 9-T2-1-408-0-R**

Los muros reforzados con franjas de mallas electrosoldadas contaban con 3 franjas a cada lado que tenían una longitud de 35 cm, poseían 2 cuadrículas de malla electrosoldada cuyo diámetro nominal era de 4 mm y las barras se encontraban espaciadas en ambas direcciones 15 cm. A partir de las ecuaciones presentadas en el Capítulo 4, el muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R tendría una resistencia ideal (sin factores de reducción) a aceleraciones fuera del plano de 16 g y una resistencia de diseño de 1,3 g, mientras que el muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R tendría una resistencia ideal de 1,31 g y una resistencia de diseño de 1,03 g

Los resultados experimentales muestran que el reforzamiento de los muros de mampostería no reforzada ayudó a incrementar la resistencia del muro ante cargas fuera del plano en 4 y 2,5 veces. Este reforzamiento podría comportarse mejor si se crea un anclaje entre las franjas y el muro de mampostería porque en estos ensayos la unión era por cohesión. Al comparar los resultados teóricos y experimentales, se concluye que esta metodología de reforzamiento con franjas de mallas electrosoldadas y mortero podría hacer que estos muros lleguen a niveles de desempeño mucho mejores a los actuales.

La Tabla 7.2 muestra las aceleraciones esperadas en las principales ciudades de Colombia para estructuras rígidas de baja altura y cuyos periodos fundamentales son menores al periodo de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño y la parte descendiente del mismo ( $T_c$ ). Se analiza que en su mayoría estas aceleraciones, para edificaciones con factor de importancia igual a 1, son inferiores a las aceleraciones resistidas por los muros reforzados, además, garantizando la unión entre las franjas y el muro, y aumentando un poco el reforzamiento se podría mejorar más el desempeño de la estructura. Sin embargo, se resalta que esto se enuncia sin tener en cuenta la amplificación que se podría generar en la altura de estructuras de más de un nivel.

**Tabla 7.2 Aceleraciones esperadas en las principales ciudades del país para un tipo de perfil D y E**

Ciudad	Tipo de suelo	$A_a$	$F_a$	Aceleración esperada $S_a$ (g) $I=1,0$
Medellín	D	0,15	1,5	0,56
	E		2,1	0,79
Cali	D	0,25	1,3	0,81
	E		1,45	0,91
Bogotá	D	0,15	1,5	0,56
	E		2,1	0,79

## 7.4 COMPARACIÓN CON LOS ENSAYOS PRESENTES EN LA LITERATURA

A continuación, se presenta una comparación de los resultados de los ensayos, primero se comparan los resultados de los ensayos de muros de mampostería no reforzada con aquellos presentes en la literatura y posteriormente, se comparan los ensayos de muros de mampostería reforzados con malla electrosoldada y mortero con aquellos estudios que se refieren a este tema.

### 7.4.1 Comparación de los resultados de muros de mampostería no reforzada expuestos a aceleraciones fuera del plano

Esta sección presenta una comparación de algunos resultados experimentales presentes en la literatura con los resultados obtenidos en este estudio. Se comparan las características geométricas, condiciones de apoyo y aceleraciones máximas fuera del plano soportadas por los especímenes.

Dazio (2008) hizo una campaña experimental en donde ensayó varios muros con diferentes condiciones de apoyo. En Dazio (2008) se presenta los resultados del muro "W2". El muro no se llevó hasta el colapso total, debido a que se definió la falla en un desplazamiento límite que se indicaba cuando el muro tocaba unos listones de madera para ensayar; lo anterior permitió ensayar nuevamente el mismo muro con otra condición de apoyo. Este procedimiento implica que sólo el primer ensayo fue hecho en un muro sin daños internos o aparentes. Dazio (2008) afirma que la respuesta dinámica de un muro fisurado no es muy diferente a la de un muro sin fisurar debido a la baja resistencia a tracción del mortero. Dazio (2008) presenta los resultados de un muro que tiene características similares a uno de los ensayos del presente estudio, se trata de un muro que tiene una longitud de 1,2 m, una altura de 2,4 m, un espesor de 15 cm y un mortero de 7 MPa, a este muro se le practicaron 50 ensayos y el artículo resume 8 de estos ensayos. El muro soportó una aceleración aproximada de 0,20 g, cuando estaba apoyado en la parte inferior y articulado

en la parte superior. Este resultado es similar a los resultados obtenidos con el muro del ensayo número 6-T1-1-325-0-S, sin embargo, no hay certeza si el muro cuando se realizó el ensayo estaba fisurado o no, y se debe tener en cuenta que el espécimen mencionado tenía un espesor de 15 cm.

Jaramillo *et al.* (2008) realizaron dos ensayos de muros de ladrillos de concreto que se encontraban apoyados sólo en la parte inferior y superior; la conexión superior consistía en una viga de concreto lo que quiere decir que había restricción a la rotación que variaba de acuerdo con la carga axial. A pesar de que el mortero tenía una resistencia de 7,5 MPa, la resistencia final del muro a aceleraciones fuera del plano fue de 0,28 g para un muro que tenía una carga axial de 0,48 kN/m y de 0,45 g para un muro que tenía una carga axial de 2 kN/m. Estos resultados difieren de lo obtenido en los ensayos de este estudio, debido a que el muro del ensayo número 5-T1-7-325-0-S soportó una aceleración de 0,89 g sin presencia de carga axial. A pesar de que la resistencia de los ensayos de Jaramillo *et al.* (2008) es mayor que la resistencia del muro de la prueba 5-T1-7-325-0-S, se debe tener en cuenta que los muros de Jaramillo *et al.* (2008) fueron construidos con ladrillos de concreto que tienen perforación vertical y los de este estudio ladrillos de arcilla de perforación horizontal que podrían tener un comportamiento distinto de acuerdo con la calidad del mortero.

Los otros estudios presentes en las tablas 7.3 y 7.4 no son directamente comparables con las pruebas realizadas en este estudio, pero son de gran utilidad para calibrar un modelo teórico.

Referencia	Ensayo	Longitud (m)	Altura (m)	Espesor (m)	Largo pieza (m)	Altura pieza (m)	Espesor pieza (m)	Ancho pega (m)	Pieza	Carga axial (kN/m)	Apoyo Izq	Apoyo Der	Apoyo Sup	Acc. max (g)
(Jaramillo, 2002)	1	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	ND	Arcilla	0,48	SI	SI	SI	1,10
	2	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	ND	Arcilla	0,00	SI	SI	NO	1,00
	3	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	ND	Concreto	0,48	NO	NO	SI	0,28
	4	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	ND	Concreto	2,00	NO	NO	SI	0,45
	5	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	ND	Concreto	2,00	SI	SI	SI	0,62
	6	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	ND	Concreto	2,00	SI	SI	SI	0,75
	7	4,00	2,40	0,10	0,39	0,19	0,09	Sin Pega	Concreto	2,00	SI	SI	SI	0,91
(Jaramillo et al., 2008)	1	2,80		0,10	0,23	0,08	0,09	0,01	Arcilla		SI	SI	NO	0,80
	2	2,80			0,39	0,19	0,14	0,01	Arcilla		SI	SI	NO	1.80**
(Shawa et al., 2011)	1	2,88	3,44	0,25	0,37	0,11	0,25	ND	Roca Toba	0,00	NO	NO	NO	ND

Tabla 7.3 Ensayos de muros de mampostería no reforzada sujetos a cargas fuera del plano

Autores	Ensayo	Longitud (m)	Altura (m)	Espesor (m)	Largo pieza (m)	Altura pieza (m)	Espesor pieza (m)	Ancho pega (m)	Pieza	Carga axial (kN/m)	Apoyo Izq	Apoyo Der	Apoyo Sup	Acc. max (g)
(Dazio, 2008)	1	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	0,00	NO	NO	FLEXIBLE	0.15*
	2	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	0,00	NO	NO	FLEXIBLE	0.15*
	3	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	3.80-16.66	NO	NO	SI	0.71*
	4	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	3.80-16.66	NO	NO	SI	1.42*
	5	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	3.80-8.30	NO	NO	SI	0.81*
	6	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	3.80-8.30	NO	NO	SI	1.02*
	7	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	3.80-8.30	NO	NO	SI	1.02*
	8	1,20	2,40	0,15	0,29	0,19	0,15	0,01	Arcilla	3.80-8.30	NO	NO	SI	0.81*
(Simsir et al., 2004)	1	1,30	2,00	0,09	0,19	0,09	0,09	ND	Concreto	22,24	NO	NO	SI	2.50*
	2	1,30	2,00	0,09	0,19	0,09	0,09	ND	Concreto	22,24	NO	NO	FLEXIBLE	1.36*
	3	1,30	2,00	0,09	0,19	0,09	0,09	ND	Concreto	11,12	NO	NO	FLEXIBLE	2.04*
(Furtado et al., 2016)	1	4,20	2,30	0,15	0,30	0,20	0,15	0,01	Arcilla	ND	SI	SI	SI	4.70***
	2	4,20	2,30	0,15	0,30	0,20	0,15	0,01	Arcilla	0,00	SI	SI	SI	4.4***
	3				Utiliza doble capa de ladrillo.									
(Graziotti et al., 2016)	1	1,44	2,75	0,10	0,21	0,05	0,10	0,01	Silicato de calcio	10,20	NO	NO	SI	0,9
	2				Utiliza doble capa de ladrillo separada.									
	3													
	4													

\* Aceleración a la mitad de la altura del muro

\*\* El muro no colapsó

\*\*\* Aceleración calculada a partir de fuerza

Tabla 7.4 Ensayos de muros de mampostería no reforzada sujetos a cargas fuera del plano

### 7.4.2 Comparación de los resultados de muros de mampostería reforzada con malla electrosoldada y mortero.

Kadam *et al.* (2014) reforzaron muros de mampostería no reforzada por medio de mallas electrosoldadas o barras de acero y mortero. El estudio sometió 6 especímenes sin reforzar a esfuerzos de flexión en dirección perpendicular o paralela a las juntas de pega horizontal. Luego sometió 12 especímenes reforzados, unidireccional o bidireccionalmente, a esfuerzos de flexión en dirección perpendicular o paralela a las juntas de pega horizontal.

La Tabla 7.5 resume los resultados experimentales de Kadam *et al.* (2014), en donde  $q_L$  y  $q_T$  era la cuantía longitudinal y transversal de acero de los especímenes que se calculaba como el área de acero en dirección longitudinal o transversal sobre el área del panel.  $P_{max}$  significa la fuerza máxima que resistió el muro durante el ensayo estático.

**Tabla 7.5 Resultados experimentales Kadam *et al.*, (2014)**

Especímen	Detalles	$q_L$	$q_B$	$P_{max}(kN)$
UNFPD-1	Tensión de flexión ortogonal a la junta de pega horizontal	0	0	1,18
UNFPD-2		0	0	1,22
UNFPD-3		0	0	1,35
UNFPL-1	Tensión de flexión paralela a la junta de pega horizontal	0	0	5,35
UNFPL-2		0	0	4,75
UNFPL-3		0	0	5,36
FRFDP-1	Reforzado unidireccionalmente - tensión de flexión ortogonal a la junta de pega horizontal	0,0029	0,0029	46,98
FRFDP-2		0,0029	0,0029	39,63
FRFDP-3		0,0029	0,0029	54,6
FRFDP-4	Reforzado bidireccionalmente - tensión de flexión ortogonal a la junta de pega horizontal	0,0029	0,0029	58,07
FRFDP-5		0,0029	0,0029	51,96
FRFDP-6		0,0029	0,0029	53,72
FRFPL-1	Reforzado unidireccionalmente - tensión de flexión paralela a la junta de pega horizontal	0,0029	0,0029	49,01
FRFPL-2		0,0029	0,0029	47,27
FRFPL-3		0,0029	0,0029	36,3
FRFPL-4	Reforzado bidireccionalmente - tensión de flexión paralela a la junta de pega horizontal	0,0029	0,0029	55,08
FRFPL-5		0,0029	0,0029	47,11
FRFPL-6		0,0029	0,0029	51,22

Al igual que en este estudio, Kadam *et al.* (2014) obtiene incrementos de resistencia importantes cuando se refuerzan los muros mediante barras de acero o mallas electrosoldadas. Los resultados muestran que el reforzamiento aumenta en al menos 10 veces la resistencia máxima que se obtuvo para muros no reforzados.

Shermi y Duber (2017) realizaron una investigación de muros de mampostería no reforzada que se reforzó por medio de franjas de mallas electrosoldadas y mortero. La Tabla 7.6 resume los resultados experimentales que se presentan en el artículo.

**Tabla 7.6 Resultados experimentales Shermi y Duber, (2017)**

Espécimen	Detalles	Proporción arena cemento	qv	qh	P <sub>max</sub> (kN)
URMFST-1	Espécimen de mampostería no reforzada	1:4	0	0	5
URMFST-2			0	0	3
URMFST-3			0	0	4
URMFST-4			0	0	N/A
URMFST-5	Espécimen de mampostería no reforzada	1:6	0	0	2,5
URMFST-6			0	0	1,6
URMFST-7			0	0	2,5
URMFST-8			0	0	N/A
RMFST-9	Espécimen reforzado con malla con espaciamiento de 25 mm y mortero con relación cemento arena 1:3	1:4	0,001	0,001	73,25
RMFST-10			0,001	0,001	73,14
RMFST-11			0,001	0,001	78,6
RMFST-12			0,001	0,001	89,2
RMFST-13	Espécimen reforzado con malla con espaciamiento de 38 mm y mortero con relación cemento arena 1:3	1:4	0,0012	0,0013	89
RMFST-14			0,0012	0,0013	86
RMFST-15			0,0012	0,0013	76
RMFST-16			0,0012	0,0013	N/A
RMFST-17	Espécimen reforzado con malla con espaciamiento de 50 mm y mortero con relación cemento arena 1:3	1:4	0,0012	0,0011	58
RMFST-18			0,0012	0,0011	94
RMFST-19			0,0012	0,0011	68
RMFST-20			0,0012	0,0011	69
RMFST-21	Espécimen reforzado con malla con espaciamiento de 25 mm y mortero con relación cemento arena 1:3	1:6	0,001	0,001	77
RMFST-22			0,001	0,001	91
RMFST-23			0,001	0,001	52
RMFST-24			0,001	0,001	55
RMFST-25	Espécimen reforzado con malla con espaciamiento de 38 mm y mortero con relación cemento arena 1:3	1:6	0,0012	0,0013	51
RMFST-26			0,0012	0,0013	75
RMFST-27			0,0012	0,0013	63
RMFST-28			0,0012	0,0013	60
RMFST-29	Espécimen reforzado con malla con espaciamiento de 50 mm y mortero con relación cemento arena 1:3	1:6	0,0012	0,0011	31
RMFST-30			0,0012	0,0011	54
RMFST-31			0,0012	0,0011	35
RMFST-32			0,0012	0,0011	N/A

Shermi y Duber (2017) realizaron ensayos con mortero de distinta calidad y diferentes cuantías de reforzamiento. Se observa en muros no reforzados que la calidad del mortero influye en la resistencia a flexión de estos muros; por otro lado, se observa que la malla electrosoldada aumenta hasta en 20 veces la resistencia de los especímenes.

Los muros en este estudio fueron reforzados con tres franjas de mallas electrosoldadas con un área total de acero longitudinal de  $113 \text{ mm}^2$ . Basado en las ecuaciones del Capítulo 4 el muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R tendría una resistencia ideal (sin factores de reducción) de 1,6 g y una resistencia de diseño de 1,3 g, mientras que el muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R tendría una resistencia ideal de 1,31 g y una resistencia de diseño de 1,03 g, suponiendo que todas las cargas las soportan las franjas y que el apoyo lateral no aumenta su resistencia.

En conclusión, los resultados experimentales y estudios teóricos de otras investigaciones coinciden con los modelos teóricos y los resultados experimentales presentes en el estudio. El aumento de resistencia no es directamente comparable con los otros estudios porque las cuantías de acero utilizadas en cada ensayo son diferentes, pero el modelo teórico utilizado para calcular el aumento de la resistencia si es capaz de predecir el comportamiento del muro reforzado. Los ensayos reforzados en esta investigación fallaron por el desprendimiento entre la unión del muro y la franja, usar conectores podría mejorar aún más el comportamiento del muro y así acercarse más a la resistencia teórica.

## 8. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Este estudio fue hecho gracias al patrocinio del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en convenio con la Universidad EAFIT y bajo el acompañamiento de la fundación Build Change. Este estudio hizo parte de un proyecto más grande que buscaba aunar esfuerzos para la evaluación experimental del comportamiento de muros de mampostería no reforzada y reforzamiento de viviendas con este sistema estructural, en el marco del plan metropolitano de gestión del riesgo sísmico. Por otro lado, este estudio buscaba comparar la respuesta a aceleraciones fuera del plano de muros de mampostería, no reforzada y reforzada con mortero y franjas de mallas electrosoldadas, con dimensiones y condiciones de borde específicas. En este estudio se caracterizaron 61 viviendas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con el propósito de conocer las dimensiones y las condiciones de apoyo típicas, se elaboraron distribuciones de probabilidad y un estudio de estadística descriptiva.

En este estudio se realizaron siete ensayos de muros de mampostería no reforzada y dos reforzados por medio de franjas de mallas electrosoldadas y mortero. Los ensayos de los muros buscaban evaluar la influencia de la calidad del mortero de pega, la carga axial y las franjas de mallas electrosoldadas y mortero en la capacidad de los muros a aceleraciones fuera del plano. Los ensayos fueron realizados en la mesa vibradora de la Universidad EAFIT, en donde se les aplicaba a los muros señales pseudo sinusoidales que iban aumentando por etapas hasta su colapso. Los resultados muestran que la capacidad última a aceleraciones fuera del plano se ve influenciada por la resistencia a tracción del mortero de pega, la carga axial y la presencia de reforzamiento con franjas de mallas electrosoldadas.

Todos los muros de este estudio tenían una altura libre de 2,4 m y un espesor de 9 cm, las otras características se presentan en la Tabla 8.1. En los muros se utilizaron tres tipos de apoyo: T1 – Apoyo con restricción al giro en la parte inferior y articulado en la parte superior, T2 – Apoyo con restricción al giro en la parte inferior y un costado y articulado en la parte superior y T3 – Apoyo con restricción al giro en la parte superior, inferior y un costado.

**Tabla 8.1 Características geométricas y condiciones de apoyo de los muros ensayados**

Espécimen	Longitud efectiva (m)	Condición de apoyo ver Título 5	f <sub>cp</sub> (MPa) **	Carga axial (kN/m)	Refuerzo	Aceleración máxima resistida	¿El muro falló?
1-T3-7-328-V-S	3,28	T3	7	variable	No	0,95	No
2-T3-7-408-V-S	4,08	T3	7	variable	No	0,95	No
3-T2-7-328-0-S	3,28	T2	7	0	No	1,05	No
4-T2-7-408-0-S	4,08	T2	7	0	No	1,05	SI
5-T1-7-325-0-S	3,25	T1	7	0	No	0,89	SI
6-T1-1-325-0-S	3,25	T1	1	0	No	0,18	SI
7-T2-1-408-0-S	4,08	T2	1	0	No	0,39	SI
8-T1-1-325-0-R	3,25	T1	1	0	Si	0,81	SI
9-T2-1-408-0-R	4,08	T2	1	0	Si	0,98	SI

\*\* Resistencia a compresión del mortero

Al comparar las figuras 7.1 y 7.2 se concluye que la presencia de carga axial hace que la resistencia a aceleraciones fuera del plano y la estabilidad del muro aumente. Este aumento de la resistencia y estabilidad concuerda con los modelos teóricos y con los resultados presentes en la literatura. Se resalta que los muros con carga axial y mortero de 7 MPa soportaron aceleraciones basales equivalentes a la gravedad sin colapsar, el valor de esta resistencia indica que los muros de mampostería no son tan vulnerables a cargas fuera del plano cuando tienen carga axial. La razón para que esto ocurra es que la resistencia en esta clase de muros se da por mecanismos de estabilidad.

Al contrastar los resultados obtenidos en los ensayos 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S y los ensayos 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S, se observa que la resistencia fuera del plano se ve afectada por la calidad del mortero, específicamente por la resistencia a esfuerzos de tracción del mortero. Los ensayos 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S fueron hechos con un mortero cuya resistencia promedio,  $f'_m$ , equivalía a 7 MPa, mientras que los ensayos 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S fueron hechos con un mortero cuya resistencia promedio,  $f'_m$ , era 1 MPa y durante su construcción se fisuró la unión entre el mortero y el ladrillo, de los muros con mortero de 1 MPa, con el propósito de eliminar la resistencia a tracción del mortero. Los ensayos 4-T2-7-408-0-S y 5-T1-7-325-0-S resistieron una aceleración aproximada de 1,05 g y 0,89 g, mientras que los ensayos 6-T1-1-325-0-S y 7-T2-1-408-0-S resistieron una aceleración aproximada de 0,39 g y 0,18 g, respectivamente. Además de aumentar la resistencia, se observa en la Figura 7.3 que tener un mortero de mejor calidad implica que el muro va a ser más rígido, es decir va a soportar más aceleraciones con menores desplazamientos.

El reforzamiento con franjas de mallas electrosoldadas y mortero es más económico que otras metodologías de reforzamiento como reforzar todo el muro con anejo de corral o con otras mallas de linderos. La configuración de estas mallas de lindero o de corral hace que el acero pierda efectividad, además, el acero utilizado en estas otras mallas es normalmente de menor resistencia y menor calidad lo que implica utilizar más material y cubrir más superficie lo que incrementa el costo.

La resistencia última de los muros de mampostería reforzados con franjas de mallas electrosoldadas y mortero fue de 0,81 g para el muro del ensayo 8-T1-1-325-0-R y de 0,98 g para el muro del ensayo 9-T2-1-408-0-R, mientras que para estos mismos muros sin reforzamiento, la capacidad a aceleraciones fuera del plano para el muro del ensayo 6-T1-1-325-0-S fue de 0,18 g y para el muro del ensayo 7-T2-1-408-0-S fue de 0,39 g. Este reforzamiento aumentó la capacidad de los muros en 4,5 y 2,5 veces, respectivamente. En los ensayos el reforzamiento se diseñó de tal forma que las franjas resistieran toda la demanda del muro, pero durante los ensayos se observó que estas franjas ayudan a activar el mecanismo de flexión horizontal en los muros, lo que ayuda a que el muro tenga mayor integridad y permite que el muro no colapse tan fácilmente, ver figuras 6.24, 6.28 y 6.29.

Las curvas de aceleración versus desplazamiento indican que el reforzamiento con franjas de mallas electrosoldadas y mortero provocan que los muros tengan ciclos de histéresis más generosos que implica que el muro va a estar en la capacidad de disipar más energía y de tener un comportamiento más dúctil que si no tuviera el reforzamiento (Ver figuras 7.4

y 7.5). Por otro lado, durante el ensayo se observó problemas de adherencia entre la franja de reforzamiento y el muro de mampostería, por ende, esta capacidad podría ser mayor si se garantiza la unión entre las franjas y el muro mediante conectores y ganchos que anclen la franja al muro para evitar los desprendimientos.

Los ensayos muestran que bajo ciertas condiciones los muros de mampostería no reforzada pueden ser muy vulnerables ante esfuerzo fuera del plano, mientras que con otras condiciones los muros no lo son tanto. La capacidad de los muros fuera del plano puede aumentar sustancialmente si se garantizan ciertos aspectos constructivos como la viga de amarre sobre los muros que además de imponer una carga axial garantiza la integridad de la vivienda y, además, este estudio muestra que la metodología de reforzamiento por medio de franjas de mallas electrosoldadas y mortero puede mejorar el desempeño de los muros y de la vivienda ante sismos. La metodología de reforzamiento mostró ser efectiva, económica y técnicamente viable, sin embargo, se debe mejorar la adherencia entre la franja y el muro y se deben realizar más ensayos tanto para cargas en el plano como fuera del plano con el propósito de tener una base de datos estadísticamente confiable.

Este estudio es un esfuerzo más para estudiar y ayudar a disminuir la vulnerabilidad de las estructuras de mampostería no reforzada del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

## 9. REFERENCIAS

- ABK (1981). "Methodology for mitigation of seismic hazards in existing unreinforced masonry buildings: wall testing, out of plane,". *Topical Report 04*. Agbabian Associates, El Segundo.
- AIS (2010). "Reglamento colombiano de construcción sismo resistente". Bogotá, Colombia.
- Acevedo A., Jaramillo J., Yepes-Estrada C. and Silva V. (2017). "Seismic damage scenarios for unreinforced masonry structures of Bogotá, Medellín and Cali (Colombia)". *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago, Chile, Paper No. 905.
- ASTM (2010). "Standard test methods for flexural bond strength of masonry. E518/E518M-102010b."
- Blaikie, E.L. y Spurr, D.D. (1992), "Earthquake vulnerability of existing unreinforced masonry buildings,". *Research report*, New Zealand.
- Blondet. M., Vargas. y Groenenberg. R.J. (2012). "Evaluation of the efficacy of mud injection to repair seismic cracks on adobe structures via Full-Scale shaking table test". *15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*.
- Brzev S., Scawthorn C., Charleson A. W., Allen L., Greene M., Jaiswal K. and Silva V. (2013). GEM building taxonomy version 2.0. GEM Technical Report 2013-02 V1.0.0. GEM Foundation, Pavia, Italy.
- Build Change. (2015). "Manual de evaluación y reforzamiento sísmico para reducción de vulnerabilidad en viviendas". Bogotá, Colombia.
- Dazio. A. (2008) "The effect of the boundary conditions on the out-of-plane behaviour of unreinforced masonry wall". *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Derakhsham, H. y Ingham, J.M. (2011) "Out of plane testing of an unreinforced masonry wall subjected to one-way bending".
- Derakhsham, H., Lucas, W., Visintin, P. y Griffith, M.C. (2018) "Out-of-plane strength of existing two-way spanning solid and cavity unreinforced masonry walls". *Structures*, 13: 88-101.
- Doherty. K. T., Griffith. M. C., Lam. N y Wilson. J. (2002). "Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls". *JEarthquake Engineering and Structural dynamics*, 31: 833-850.

- Dolatshahi, K.M., Aref, A.J. y Whittaker, A.S. (2015) "Interaction curves for in-plane and out-of-plane behaviors of unreinforced masonry walls". *Journal of Earthquake Engineering*, 19: 60-84.
- Ehsani. M.R., Saadatmanesh. H. y Velazquez J.I. (1999) "Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading,". *Journal of composites for construction*. DOI:10.1061.
- Furtado. A., Rodrigues. H., Arêde. A. y Varum. H. (2016) "Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry infill walls". *Engineering structures*, 111: 48-63.
- Graziotti, F., Tomassetti, U., Penna, A. y Magenes, G. (2016) "Out-of-plane shaking table tests on URM single leaf and cavity walls". *Engineering structures*, 125: 455-470.
- Griffith, M.C., Margenes, G., Melis, G y Picchi, L. (2003) "Evaluation of out-of-plane stability of unreinforced masonry walls subjected to seismic excitation". *Journal of Earthquake Engineering*, 7(1): 141-169.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2002). "Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería: NTC 4925". Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2001). "Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción diagonal – cortante- en muretes de mampostería: NTC 3495". Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). "Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto: NTC 673". Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Jaramillo, J. (2002) "Mecanismo de transmisión de cargas perpendiculares al plano del muro en muros de mampostería no reforzada," *Revista de Ingeniería Sísmica* No. 67 53-78.
- Jaramillo, J., Morales, M. y Gonzalo, H. (2008) "Respuesta sísmica de muros de mampostería no reforzada sometidos a aceleraciones perpendiculares a su plano" *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 8(2) 183-200.
- Kadam, S.B., Singh, Y., Li, B. (2015) "Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry strengthened using ferrocement overlay". *Material and structures*. 48: 3187-3203.
- Lin, Y., Lawley, D., Wotherspoon, L. y Ingham, J.M. (2016) "Out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using ECC shortcrete". *Structures*. 7: 33-42.

- Melis, G (2002) "Displacement-based seismic analysis for out of plane bending of unreinforced masonry wall,". *Msc Thesis*, Instituto Universitario di Studi Superiori di Pavia y Università degli Studi di Pavia. Italy.
- Osorio, A. (2018). "Evaluación de la vulnerabilidad de estructuras de mampostería no reforzada". Tesis de doctorado en elaboración. Universidad EAFI. Medellín, Colombia.
- Penner, O. y Elwood, K.J. (2014) "Out-of-plane dynamic stability of unreinforced masonry walls in one-way bending: shake table testing". *Earthquake Spectra*. DOI:10.4231.
- Pleșu, R., Țăranu G., Covatariu, D. y Grădinariu I.D. (2011) "Strengthening and rehabilitation conventional methods for masonry structures". *Construcții. Arhitectură*. 54: 165-176.
- Priestley, M. J. N. (1985) "Seismic behaviour of unreinforced masonry walls". *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 18(2), 191-205.
- San Bartolomé, A., Quiun, D., Zegarra, L (2004) "Effective system for seismic reinforcement of adobe houses". *The 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Paper No. 3321. Vancouver, Canada.
- San Bartolomé, A., Quiun, D. (2012) "Comportamiento sísmico de viviendas de adobe en los terremotos de 2001 y 2007 en Perú". Lima, Peru.
- San Bartolomé, A., Quiun, D. (2015) "Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típica del Perú". *Revista de la facultad de Ingeniería U.C.V.* 30: 71-80.
- Shawa, O.A., Felice, G. Mauro, A. y Sorrentino, L. (2011) "Out-of-plane seismic behaviour of rocking masonry walls". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, DOI: 10.1002/eqe.1168.
- Shermi, C. y Dubey, R.N. (2017) "Study on out-of-plane behaviour of unreinforced masonry strengthened with welded wire mesh and mortar". *Construction and building materials*. 143: 104-120.
- Shrestha, K., Pareek, S., Suzuki, Y. y Araki, Y. (2013) "Pinning seismic retrofit of masonry constructions with application of polymer-cement pastes as bonding agents". *the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*. 1953-1971.
- Simsir, C.C., Aschheim, A. y Abrams, P. (2004) "Out-of-plane dynamic response of unreinforced masonry bearing walls attached to flexible diaphragms". *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Paper No 2045. Vancouver, B.C, Canada.

Walpole, R.E., Myers, R.H, Sharon, L.M y Ye, K. (2012) "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias". México: PEARSON.

Zoutenbier. J. (1986), "The seismic response of unreinforced masonry buildings". ME Project Report, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

## Anexo 1

El Anexo 1 presenta un conjunto de tablas en donde se hace registro de la aceleración máxima absoluta alcanzada en cada una de las etapas de cada ensayo. El acelerómetro 507 corresponde al que se encontraba en la base de la mesa vibradora y el acelerómetro 508 o 510 corresponde a los que estaban ubicados a la mitad de la altura de los muros.

**Tabla 9.1 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 1-T3-7-328-V-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico,	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 508 (g)
1	1,35	0,2	0,02	0,02
2	1,35	0,6	0,07	0,07
3	1,35	1,2	0,15	0,15
4	1,35	2	0,28	0,29
5	1,35	2,5	0,38	0,42
6	1,35	3	0,51	0,58
7	1,33	3	0,44	ND
8	1,36	3	0,58	ND
9	1,36	3,4	0,77	ND
10	1,36	3,6	0,95	ND

**Tabla 9.2 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 2-T3-7-408-V-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico.	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 510 (g)
1	1,35	0,2	0,02	0,02
2	1,35	0,6	0,07	0,07
3	1,35	1,2	0,15	0,15
4	1,35	2	0,28	0,29
5	1,35	2,5	0,38	0,42
6	1,35	3	0,51	0,60
7	1,33	3	0,44	ND
8	1,36	3	0,58	ND
9	1,36	3,4	0,77	ND
10	1,36	3,6	0,95	ND

**Tabla 9.3 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 3-T2-7-328-0-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 508 (g)
1	1,36	0,40	0,05	0,07
2	1,36	1,00	0,13	0,14
3	1,36	2,00	0,31	0,35
4	1,38	2,00	0,40	0,43
5	1,38	2,50	0,59	ND
6	1,38	3,00	0,90	ND
7	1,38	3,50	1,05	ND

**Tabla 9.4 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 4-T2-7-408-0-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico.	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 510 (g)
1	1,36	0,40	0,05	0,05
2	1,36	1,00	0,13	0,14
3	1,36	2,00	0,31	0,35
4	1,38	2,00	0,40	0,47
5	1,38	2,50	0,59	ND
6	1,38	3,00	0,90	ND
7	1,38	3,50	1,05	ND

**Tabla 9.5 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 5-T1-7-325-0-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico,	Aceleración Acc, 507 (g)
1	1,62	0,2	0,05
2	1,62	0,4	0,12
3	1,62	0,6	0,20
4	1,62	0,8	0,30
5	1,62	1,0	0,41
6	1,62	1,2	0,55
7	1,62	1,4	0,71
8	1,62	1,6	0,84
9	1,62	1,9	0,89

**Tabla 9.6 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 6-T1-1-325-0-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico.	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 508 (g)
1	1,6	0,2	0,18	0,18

**Tabla 9.7 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 7-T2-1-408-0-S**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico.	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 510 (g)
1	1,7	0,2	0,1	0,13
2	1,7	0,4	0,20	0,24
3	1,7	0,5	0,23	ND
4	1,7	0,6	0,27	ND
5	1,7	0,7	0,31	ND
6	1,7	0,8	0,33	ND
7	1,7	0,9	0,39	ND

**Tabla 9.8 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 8-T1-1-325-0-R**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico.	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 510 (g)
1	1,75	0,4	0,09	0,10
2	1,7	0,6	0,15	0,21
3	1,7	1,0	0,23	0,44
4	1,65	1,0	0,28	0,60
5	1,65	1,4	0,36	0,73
6	1,6	1,4	0,46	1,04
7	1,6	1,6	0,49	1,01
8	1,55	1,6	0,59	1,17
9	1,55	2,0	0,68	ND
10	1,55	2,5	0,77	ND
11	1,55	3,0	0,78	ND
12	1,55	3,0	0,81	ND
13	1,55	3,2	0,78	ND

**Tabla 9.9 Aceleraciones máximas absolutas registradas durante el ensayo número 9-T2-1-408-0-R**

Etapa	Frecuencia (Hz)	Desplazamiento (cm) del gato hidráulico.	Aceleración Acelerómetro 507 (g)	Aceleración Acelerómetro 510 (g)
1	1,75	0,4	0,09	0,11
2	1,7	0,6	0,15	0,20
3	1,7	1,0	0,23	0,33
4	1,65	1,0	0,28	0,40
5	1,65	1,4	0,36	0,57
6	1,6	1,4	0,46	0,70
7	1,6	1,6	0,49	0,81
8	1,55	1,6	0,59	1,04
9	1,55	2,0	0,68	ND
10	1,55	2,5	0,78	ND
11	1,55	3,0	0,784	ND
12	1,55	3,0	0,813	ND
13	1,55	3,2	0,776	ND
14	1,55	3,2	0,982	ND

## Anexo 2

El anexo 2 presenta el registro de cada etapa de cada ensayo del acelerómetro 507 que se encontraba en la base de la mesa vibradora.

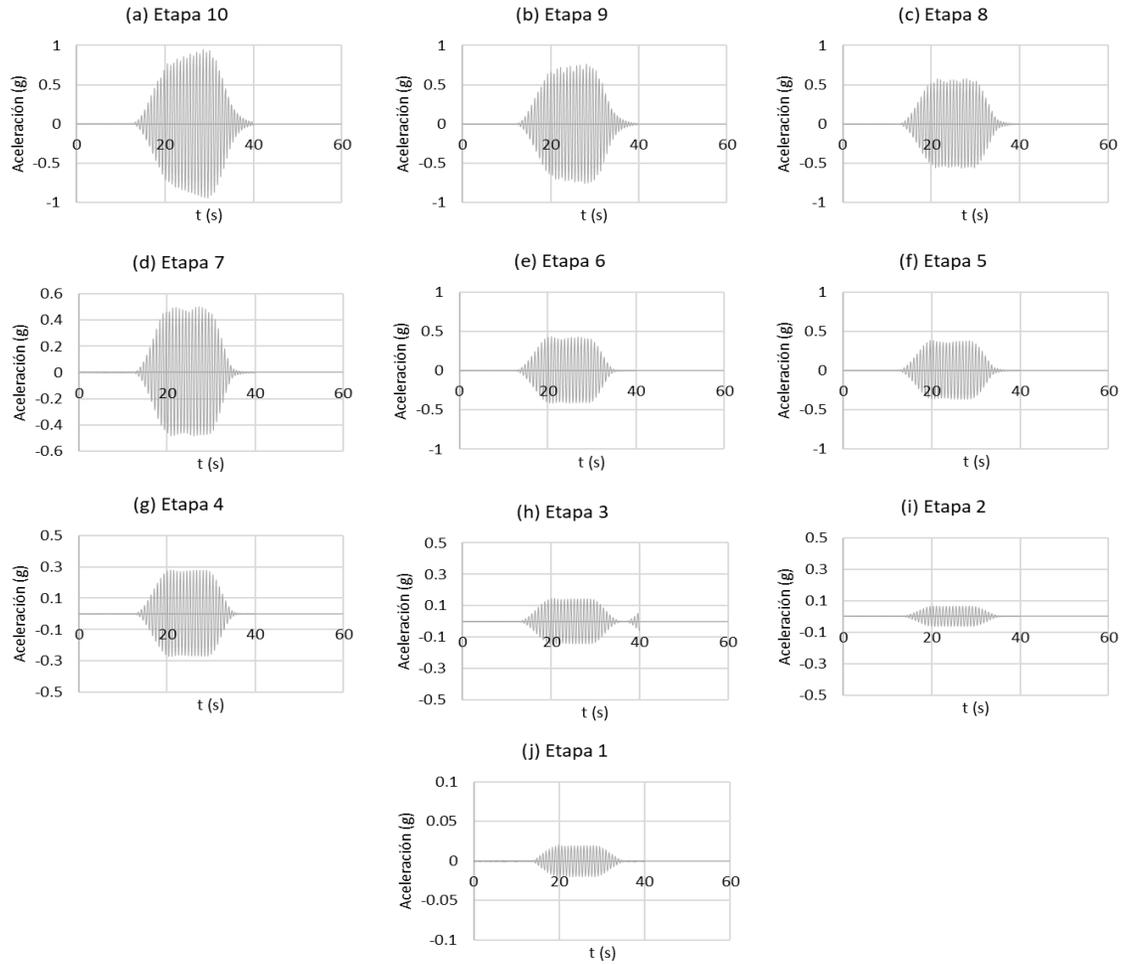


Figura 9.1 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 1-T3-7-328-V-S

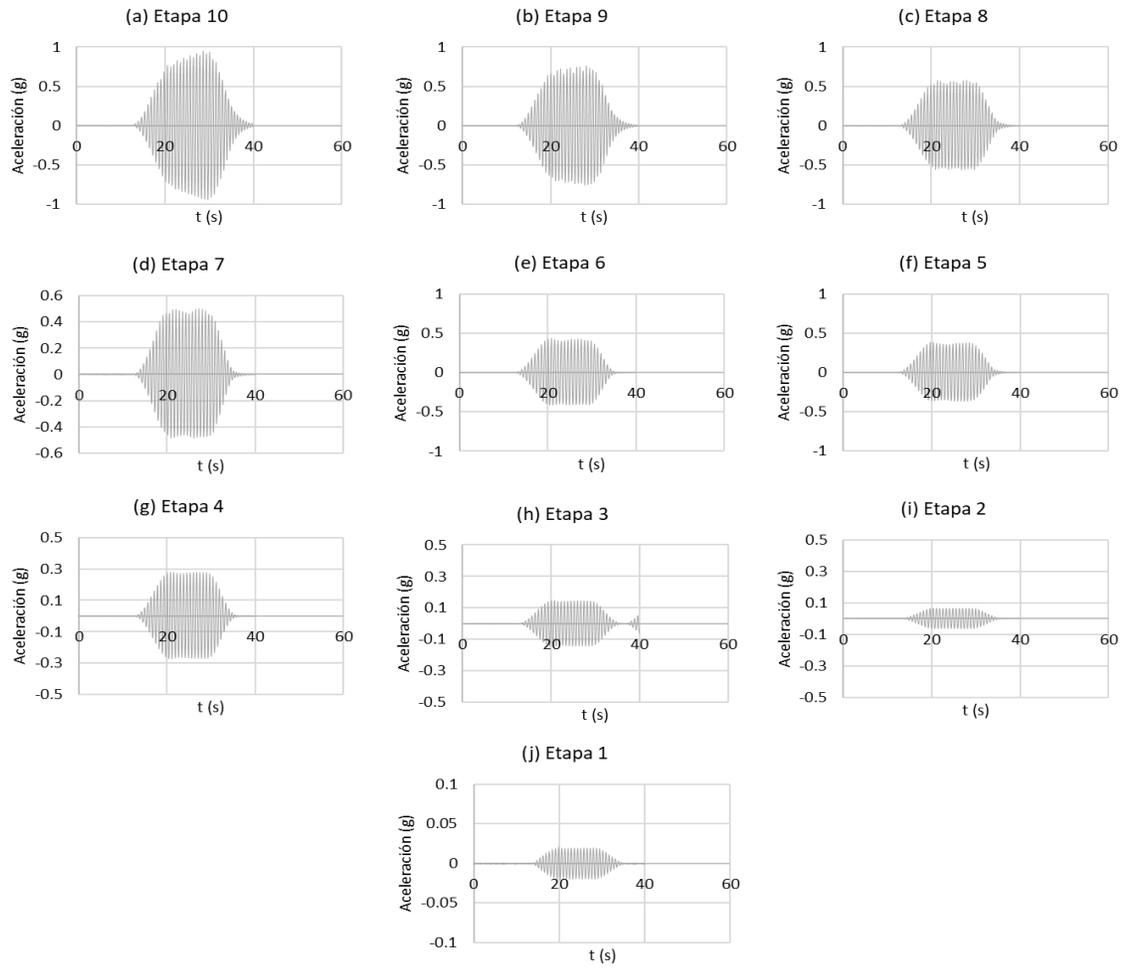
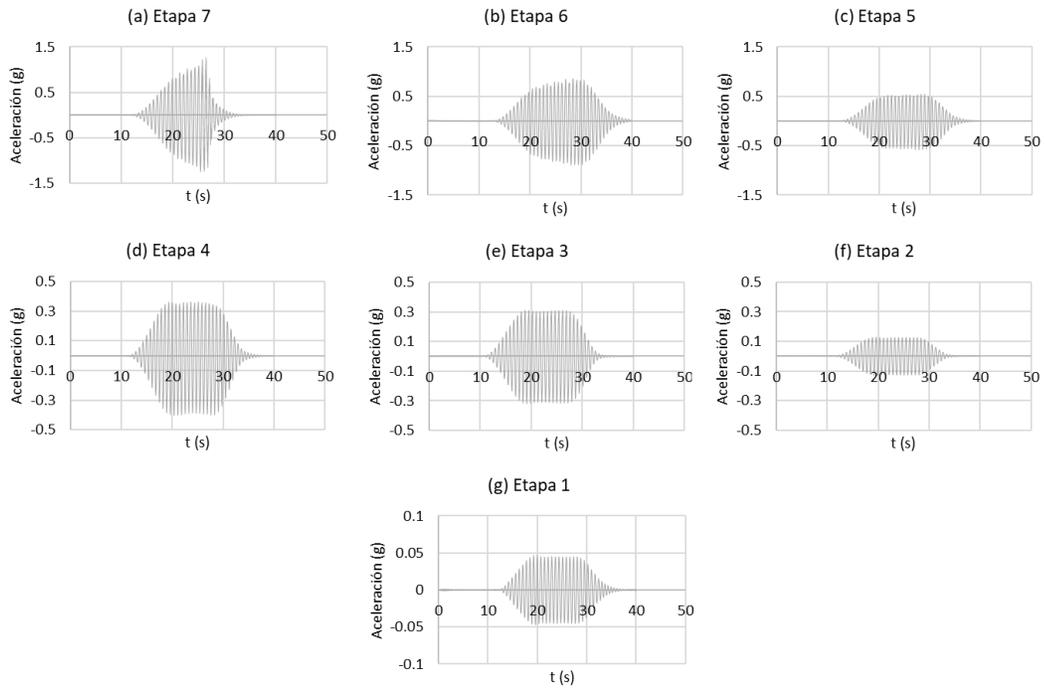
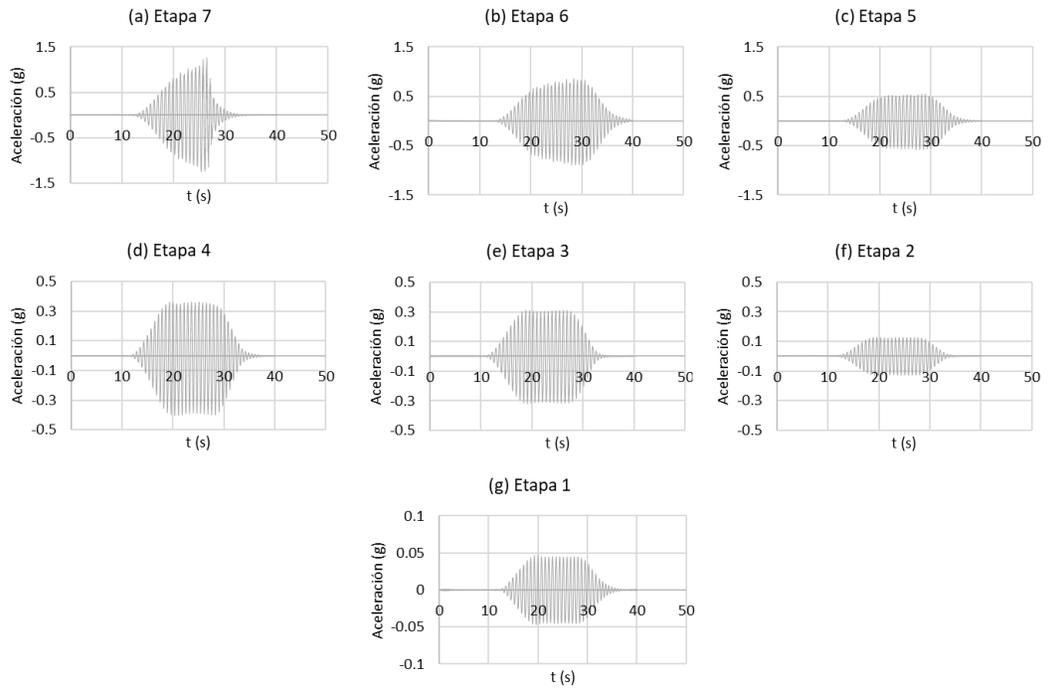


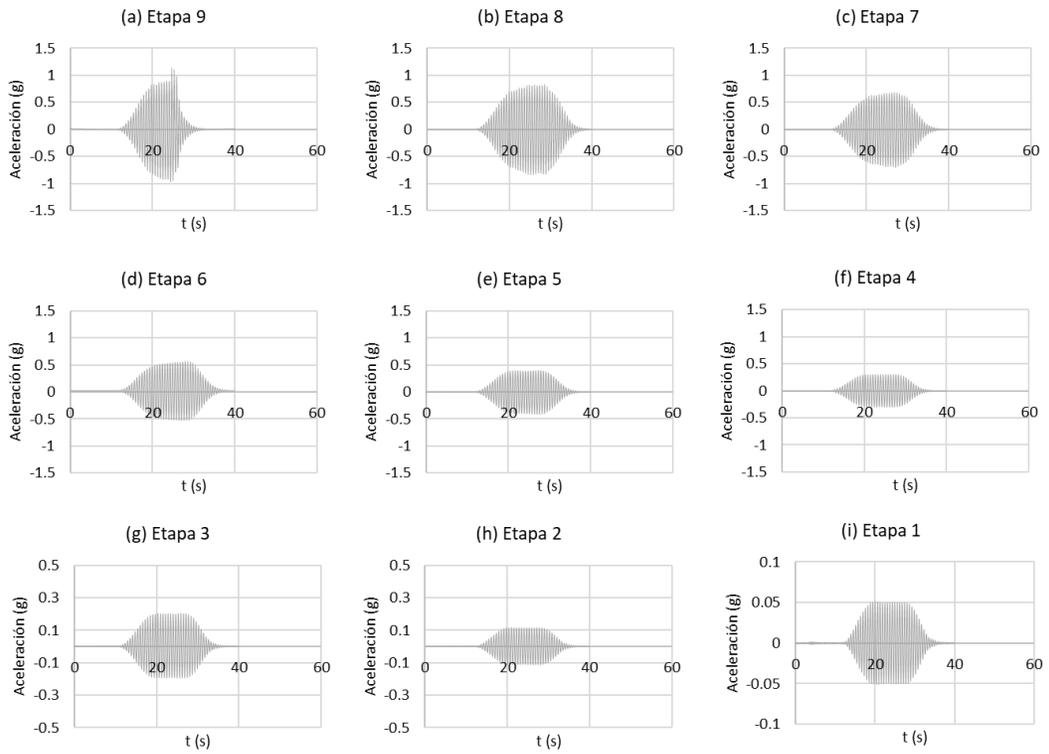
Figura 9.2 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 2-T3-7-408-V-S



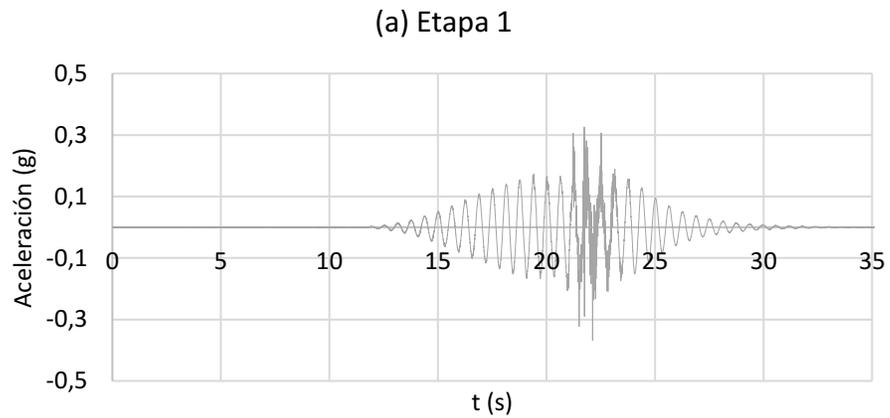
**Figura 9.3 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 3-T2-7-328-0-S**



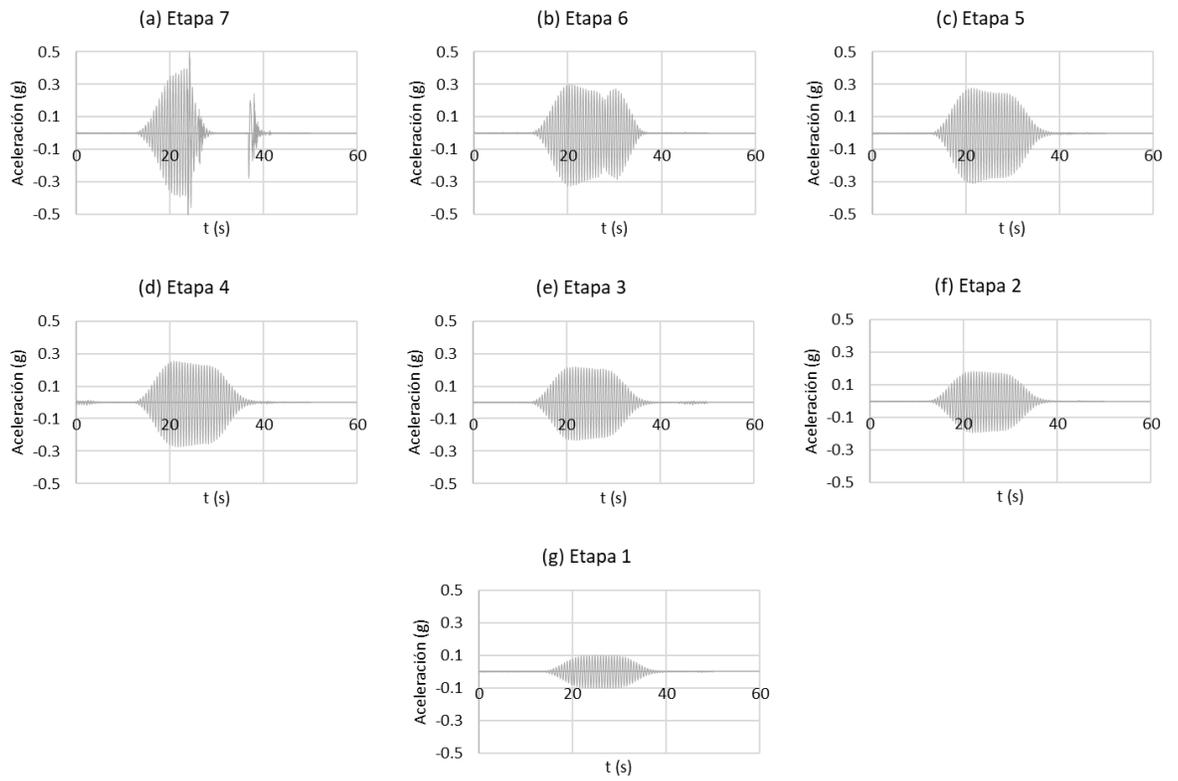
**Figura 9.4 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 4-T2-7-408-0-S**



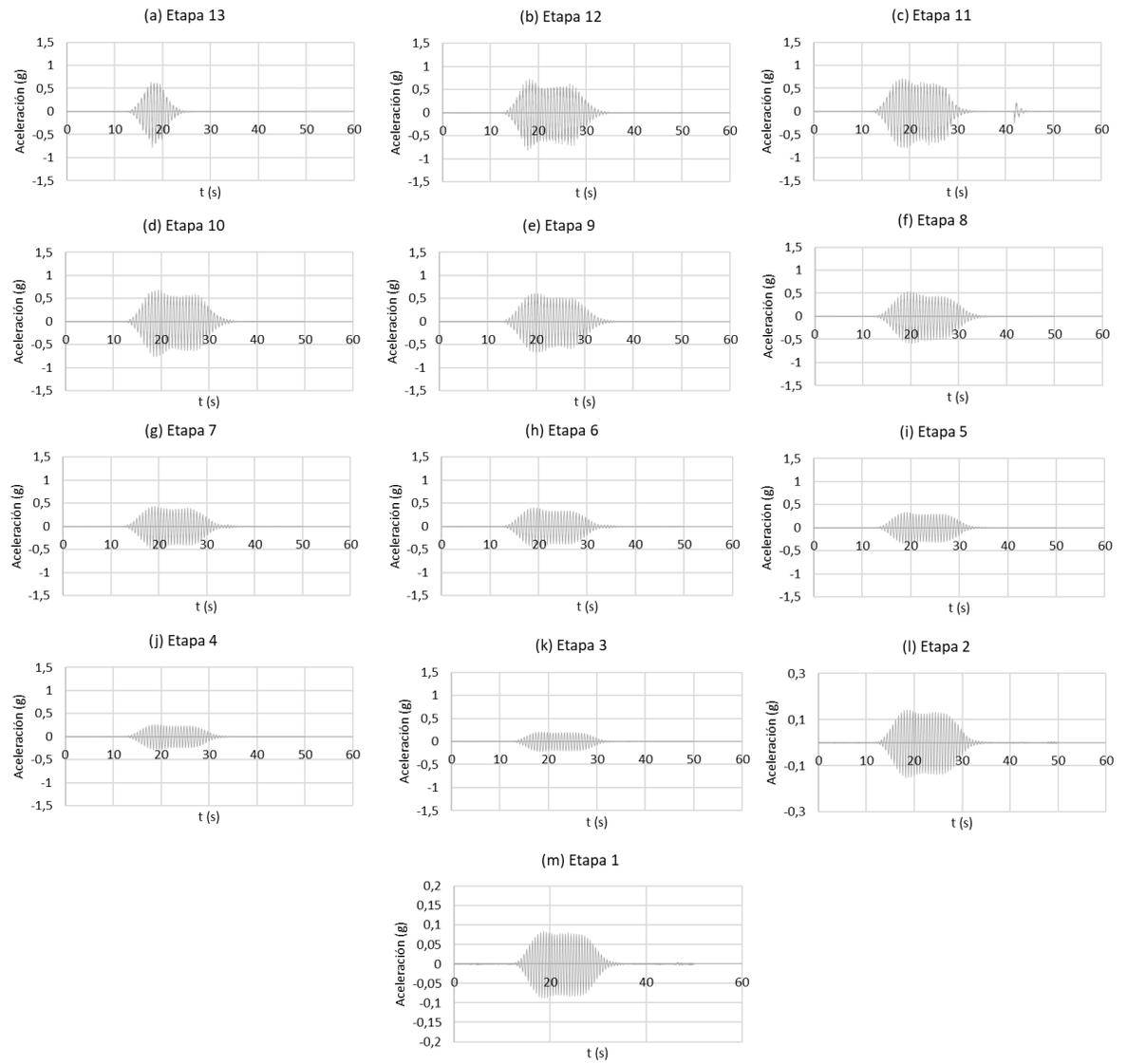
**Figura 9.5 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 5-T1-7-325-0-S**



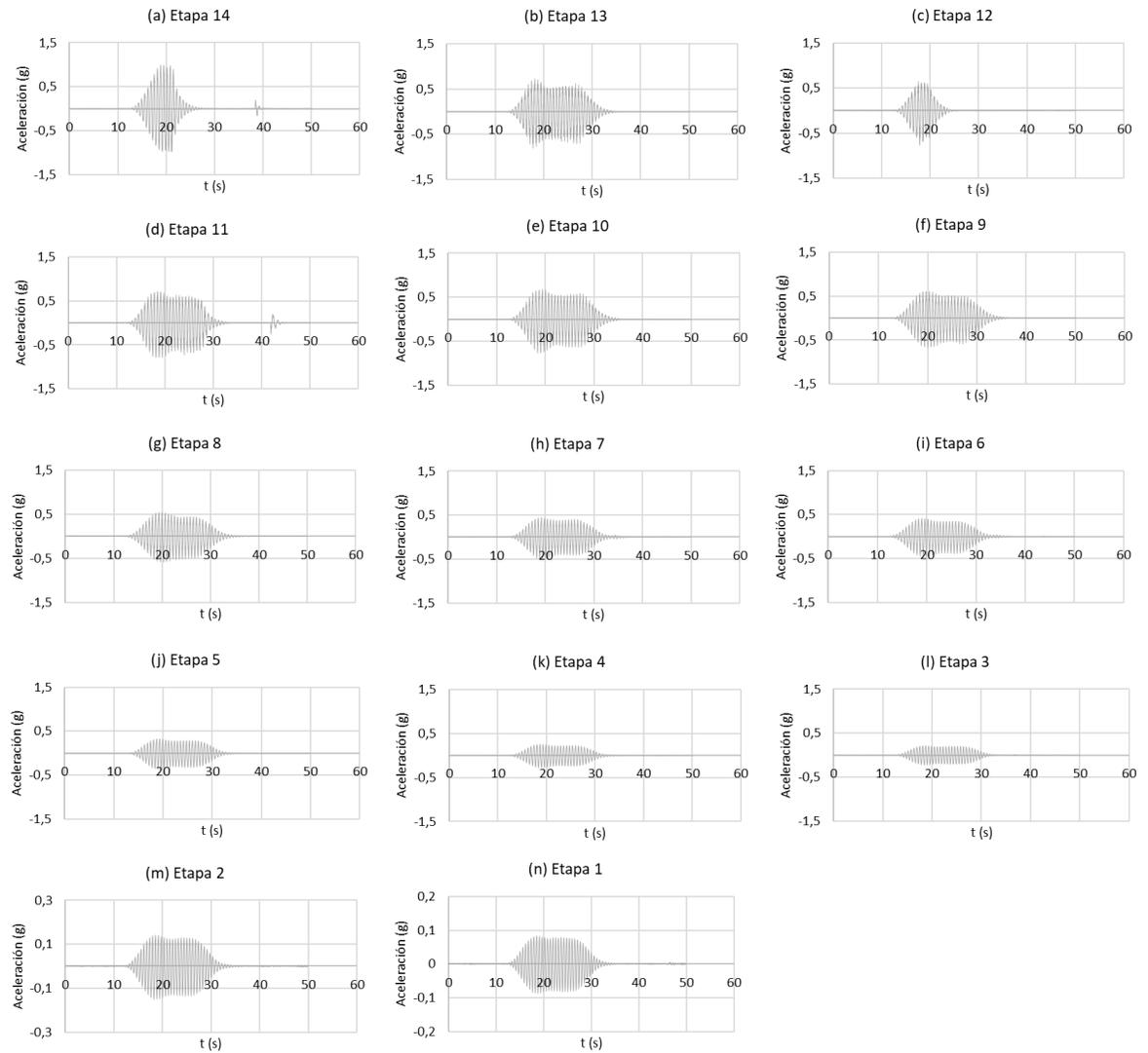
**Figura 9.6 Registro del acelerómetro 507 durante el ensayo número 6-T1-1-325-0-S**



**Figura 9.7 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 7-T2-1-408-0-S**



**Figura 9.8 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 8-T1-1-325-0-R**



**Figura 9.9 Registros del acelerómetro 507 durante el ensayo número 9-T2-1-408-0-R**



