

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SISMO-RESISTENTE DE UNA  
ESTRUCTURA ESPACIAL HEXAGONAL DE CAÑA GUADÚA  
REFORZADA CON LADRILLOS ARTESANALES, SOMETIDA A  
CARGA LATERAL CON INVERSIÓN Y UTILIZANDO UNA  
MODIFICACIÓN DE LA CONEXIÓN SIMÓN VÉLEZ**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCIÓN ESTRUCTURAS**

**SINGRID MICHELLE JARAMILLO FLÓREZ**  
singrid\_michelle@hotmail.com

**VERÓNICA MONSERRATH TORRES HERRERA**  
veromth@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. MBA. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA**  
german.luna@epn.edu.ec

**Quito, junio 2020**

## DECLARACIÓN

Nosotras Singrid Michelle Jaramillo Flórez y Verónica Monserrath Torres Herrera declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos que le correspondan de este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, en su Reglamento y por la Normativa Nacional vigente.

---

Singrid Michelle Jaramillo Flórez

---

Verónica Monserrath Torres Herrera

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Singrid Michelle Jaramillo Flórez y Verónica Monserrath Torres Herrera, bajo mi supervisión.

---

**ING. MBA. GERMÁN LUNA HERMOSA**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme con las oportunidades que me han conducido a lograr esta meta.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la FICA por concederme una excelente formación profesional en esta magnífica carrera.

Al Centro de Investigación de la Vivienda y Laboratorio de Ensayo de Materiales, Suelos y Rocas, por proporcionarnos el conocimiento, herramientas y personal para llevar a cabo este estudio.

Al ingeniero Germán Luna, por permitirse el tiempo y dedicación para dirigir este proyecto, por su disposición y ayuda a lo largo de toda la carrera y por ser parte de experiencias que han enriquecido mi vida personal y profesionalmente.

A mi compañera de tesis y amiga Verónica, por ser mi cómplice y apoyo durante toda esta experiencia.

A los mijisaurios, Bunbury, Ricky, demás amigos y compañeros que colaboraron en este proyecto y formaron parte de esta gran aventura que ha marcado mi vida con preciados recuerdos.

Singrid

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios, porque sin Él nada se realiza, nada se alcanza. Por ser mi amparo, fortaleza e iluminarme en el camino de la vida.

A mis padres, porque sin ellos no podría ser quien soy. Por su apoyo, cariño, paciencia, trabajo y sacrificio. Porque a pesar de los malos ratos, siempre salimos adelante. Gracias a mi madre, por ser mi motor, por su amor incomparable, por cuidarme y desear siempre lo mejor para mí. Gracias a mi padre, por confiar en mí y darme ánimos para llegar a la meta deseada.

A mis hermanas, por tenderme su mano, por brindarme días de alegría y distracción cuando más lo necesitaba.

A mi amiga y compañera de tesis, Singrid, por su amistad, sinceridad; por aventurarse conmigo en este camino y llegar juntas a la meta anhelada.

A mi director de tesis, Ing. Germán Luna, por su tiempo, orientación y conocimiento para que esta tesis llegara a su término.

A la Escuela politécnica Nacional, por ser la Institución Educativa en donde crecí como persona y profesional. A mis profesores, porque con su enseñanza y consejos, ayudaron a cristalizar esta grandiosa etapa de mi vida.

Al Centro de Investigación de la Vivienda (CIV), LEMSUR y a todo su personal por facilitar la realización de los ensayos y por su ayuda en el desarrollo de esta tesis.

A Bunbury y Ricky, amigos que demostraron serlo, al brindarnos su inconmensurable ayuda. Por siempre estar cuando más necesitábamos de su apoyo. Y por último quiero agradecer a mis amigos Francisco, Erick, Skarlet, Jósi, Sebastián E., Anita y Sebastián C., por ser claves en mi vida estudiantil y personal, por sus palabras de aliento acertadas, por tantas aventuras y por aprender de la vida junto a ustedes.

Verónica

## DEDICATORIA

Este y todos mis logros son dedicados a mis padres por creer en mí, ser mi guía, ejemplo y soporte a lo largo de mi existencia.

A mis abuelitas Marlene y Blanca por todo el amor y cuidado de madres que me brindaron, cimentando de la mejor manera mi formación personal.

A Slyter por su cariño, apoyo, confianza y motivación que me hace anhelar la superación día tras día.

## DEDICATORIA

A mis padres Eduardo y Silvana por ser mi apoyo incondicional, por enseñarme a que sin esfuerzo no hay recompensa, porque todas las metas que cumplo son por y para ellos.

A mi abuelita Michita, que desde el cielo sé que siempre estará conmigo celebrando mis triunfos y levantándose en cada derrota. Por todo el tiempo que pasamos juntas, por impartirme su sabiduría e inculcarme valores preciados para el resto de mi vida.

A mis abuelitos Ovidio y América por estar pendientes de todo lo que necesite, porque a pesar de no estar juntos todo el tiempo, sé que siempre me cuidarán y verán mi bienestar.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vi
CONTENIDO.....	vii
LISTADO DE FIGURAS .....	xiii
LISTADO DE TABLAS .....	xvi
LISTADO DE FOTOGRAFÍAS .....	xix
RESUMEN .....	xxi
ABSTRACT .....	xxii
PRESENTACIÓN .....	xxiii
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3. ALCANCE .....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	4
1.5. METODOLOGÍA .....	4

CAPÍTULO 2 .....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. MAMPOSTERÍA.....	6
2.1.1. LADRILLO CERÁMICO .....	7
2.1.1.1. Generalidades .....	7
2.1.1.2. Fabricación .....	10
2.1.1.3. Clasificación.....	13
2.1.1.4. Propiedades físicas y mecánicas.....	14
2.1.1.5. Requerimientos para la construcción.....	15
2.1.2. INFLUENCIA DE LA MAMPOSTERÍA EN ESTRUCTURAS .....	16
CAPÍTULO 3 .....	18
METODOLOGÍA.....	18
3.1. MATERIALES Y EQUIPOS.....	18
3.1.1. MATERIALES.....	18
3.1.1.1. Caña guadúa Angustifolia Kunth .....	18
3.1.1.2. Mortero para mampostería .....	19
3.1.1.3. Mortero expansivo para uniones.....	21
3.1.1.4. Ladrillo .....	22
3.1.1.5. Chicotes.....	22
3.1.1.6. Ganchos “J” .....	23
3.1.1.7. Pernos .....	24
3.1.2. EQUIPOS .....	25
3.1.2.1. Herramienta manual .....	25
3.1.2.2. Horno eléctrico.....	25
3.1.2.3. Balanza.....	26

3.1.2.4. Actuador dinámico .....	27
3.1.2.5. Dispositivos LVDT .....	27
3.1.2.6. Placas de anclaje.....	28
3.1.2.7. Placas de empuje .....	29
3.2. CONFIGURACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL HEXAGONAL.....	30
3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	39
3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA	39
3.3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS LADRILLOS.....	46
3.3.3. ENSAYO A CARGA LATERAL.....	48
3.4. PROCESAMIENTO DE DATOS .....	52
3.4.1. CURVA DE HISTÉRESIS.....	52
3.4.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	53
3.4.3. ENERGÍA DISIPADA.....	54
3.4.4. RIGIDEZ SECANTE .....	55
3.4.5. DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ .....	56
3.4.6. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE.....	56
3.4.7. DUCTILIDAD .....	57
3.4.8. FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA (R).....	58
3.4.9. ANÁLISIS DE FUERZAS Y DERIVAS.....	58
CAPÍTULO 4 .....	63
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
4.1. ENSAYO 1 .....	64
4.1.1. CURVA DE HISTÉRESIS.....	64
4.1.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	65

4.1.3.	ENERGÍA DISIPADA.....	66
4.1.4.	RIGIDEZ SECANTE .....	67
4.1.5.	AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	69
4.1.6.	DUCTILIDAD .....	70
4.1.7.	ANÁLISIS DE DERIVAS.....	74
4.1.8.	DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B.....	76
4.2.	ENSAYO 2 .....	78
4.2.1.	CURVA DE HISTÉRESIS.....	78
4.2.2.	ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	78
4.2.3.	ENERGÍA DISIPADA.....	79
4.2.4.	RIGIDEZ SECANTE .....	80
4.2.5.	AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	82
4.2.6.	DUCTILIDAD .....	83
4.2.7.	ANÁLISIS DE DERIVAS.....	85
4.2.8.	DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B.....	87
4.3.	ENSAYO 3 .....	89
4.3.1.	CURVA DE HISTÉRESIS.....	89
4.3.2.	ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	90
4.3.3.	ENERGÍA DISIPADA.....	91
4.3.4.	RIGIDEZ SECANTE .....	92
4.3.5.	AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	93
4.3.6.	DUCTILIDAD .....	94
4.3.7.	ANÁLISIS DE DERIVAS.....	97
4.3.8.	DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B.....	98
4.4.	ENSAYO 4 .....	100

4.4.1.	CURVA DE HISTÉRESIS.....	100
4.4.2.	ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	101
4.4.3.	ENERGÍA DISIPADA.....	102
4.4.4.	RIGIDEZ SECANTE .....	103
4.4.5.	AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	104
4.4.6.	DUCTILIDAD .....	105
4.4.7.	ANÁLISIS DE DERIVAS.....	108
4.4.8.	DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B.....	110
4.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS CUATRO ENSAYOS....	112
4.5.1.	ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	112
4.5.2.	ENERGÍA DISIPADA.....	114
4.5.3.	RIGIDEZ SECANTE .....	115
4.5.4.	AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	117
4.5.5.	DUCTILIDAD .....	118
4.5.6.	ANÁLISIS DE DERIVAS.....	119
4.6.	COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN DE HERRERA Y VITERI .....	122
4.6.1.	ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	122
4.6.2.	ENERGÍA DISIPADA.....	123
4.6.3.	RIGIDEZ SECANTE .....	124
4.6.4.	AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	125
4.6.5.	DUCTILIDAD .....	126
4.6.6.	ANÁLISIS DE DERIVAS.....	127
4.7.	ANÁLISIS VISUAL DE LAS ESTRUCTURAS ENSAYADAS.....	130
4.7.1.	ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CAÑA GUADÚA .....	131

4.4.1. MAMPOSTERÍA DE LADRILLO ARTESANAL.....	133
CAPITULO 5 .....	138
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	138
5.1. CONCLUSIONES .....	138
5.2. RECOMENDACIONES.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	143
ANEXOS .....	147

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1. Mampostería .....	6
Figura 2.2. Ladrillera Artesanal .....	8
Figura 2.3. Moldeado Semi-Industrial de Ladrillo .....	9
Figura 2.4. Planta industrial de ladrillo .....	9
Figura 2.5. Extracción de Arcilla.....	10
Figura 2.6. Mezclado con Ganado .....	11
Figura 2.7. Moldeado de Ladrillo.....	11
Figura 2.8. Secado de Ladrillo.....	12
Figura 2.9. Horno de Cocido .....	12
Figura 2.10. Requisitos de Resistencia Mecánica y Absorción a la Humedad.....	13
Figura 2.11. Tabla de Propiedades Físicas de las Unidades de Mampostería No Estructural .....	16
Figura 3.1. Configuración Geométrica del Gancho “J” .....	23
Figura 3.2. Disposición en Planta de Dispositivos LVDT.....	28
Figura 3.3. Configuración Estructural .....	30
Figura 3.4. Vista Frontal de la Modificación de la Conexión Simón Vélez.....	31
Figura 3.5. Vista en Planta de la Modificación de la Conexión Simón Vélez.....	31
Figura 3.6. Probeta para Ensayo a Tensión.....	42
Figura 3.7. Esquema del Ensayo de Flexión .....	43
Figura 3.8. Ensayo de Corte.....	45
Figura 3.9. Patrón de Desplazamiento Cíclico .....	49
Figura 3.10. Patrón de Desplazamiento Cíclico – $\Delta = 200\text{mm}$ .....	51
Figura 3.11. Patrón de Desplazamiento Cíclico – $\Delta = 60\text{mm}$ .....	52
Figura 3.12. Curva de Histéresis .....	53
Figura 3.13. Envolvente de la Curva de Histéresis.....	53
Figura 3.14. Curva Envolvente Promedio.....	54
Figura 3.15. Energía Disipada.....	55
Figura 3.16. Rigidez Secante .....	55

Figura 3.17. Espectro de Aceleración .....	60
Figura 3.18. Valores de deriva máxima, expresados como fracción de la altura de piso .....	61
Figura 4.1. Disposición en Planta de Dispositivos LVDT.....	63
Figura 4.2. Curva de Histéresis - Ensayo 1 - LVDT A .....	64
Figura 4.3. Curva de Histéresis y Envolvente - Ensayo 1 - LVDT A.....	65
Figura 4.4. Energía Disipada - Ensayo 1 - LVDT A .....	66
Figura 4.5. Energía Disipada por Serie - Ensayo 1 - LVDT A.....	67
Figura 4.6. Rigidez Secante - Ensayo 1 - LVDT A .....	67
Figura 4.7. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 1 - LVDT A.....	68
Figura 4.8. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 1- LVDT A .....	69
Figura 4.9. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 1 - LVDT A .....	70
Figura 4.10. Envolvente Promedio - Ensayo 1 - LVDT A .....	71
Figura 4.11. Curva EEEP - Ensayo 1 - LVDT A .....	72
Figura 4.12. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 1 - LVDT A .....	75
Figura 4.13. Curva de Histéresis – Ensayo 2 – LVDT A.....	78
Figura 4.14. Curva de Histéresis y Envolvente – Ensayo 2 – LVDT A .....	79
Figura 4.15. Energía Disipada por Serie - Ensayo 2 - LVDT A .....	80
Figura 4.16. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 2 - LVDT A.....	81
Figura 4.17. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 2 - LVDT A .....	81
Figura 4.18. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 2 - LVDT A .....	82
Figura 4.19. Envolvente Promedio - Ensayo 2 - LVDT A .....	83
Figura 4.20. Curva EEEP - Ensayo 2 - LVDT A .....	84
Figura 4.21. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 2 - LVDT A .....	86
Figura 4.22. Curva de Histéresis - Ensayo 3 - LVDT A .....	89
Figura 4.23. Curva de Histéresis y Envolvente - Ensayo 3 - LVDT A.....	90
Figura 4.24. Energía Disipada por Serie - Ensayo 3 - LVDT A .....	91
Figura 4.25. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 3 - LVDT A.....	92
Figura 4.26. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 3 - LVDT A .....	93
Figura 4.27. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 3 - LVDT A .....	94

Figura 4.28. Envolvente Promedio - Ensayo 3 - LVDT A .....	95
Figura 4.29. Curva EEEP - Ensayo 3 - LVDT A .....	96
Figura 4.30. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 3 - LVDT A .....	97
Figura 4.31. Curva de Histéresis – Ensayo 4 – LVDT A.....	100
Figura 4.32. Curva de Histéresis y Envolvente – Ensayo 4 – LVDT A .....	101
Figura 4.33. Energía Disipada por Serie - Ensayo 4 - LVDT A .....	102
Figura 4.34. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 4 - LVDT A.....	103
Figura 4.35. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 4 - LVDT A .....	104
Figura 4.36. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 4 - LVDT A .....	105
Figura 4.37. Envolvente Promedio - Ensayo 4 - LVDT A .....	106
Figura 4.38. Curva EEEP - Ensayo 4 - LVDT A .....	107
Figura 4.39. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 4 - LVDT A .....	109
Figura 4.40. Curvas Envolventes Promedios de los 4 Ensayos .....	112
Figura 4.41. Curva Envolvente Experimental .....	113
Figura 4.42. Energía Disipada por Serie de los 4 Ensayos .....	115
Figura 4.43. Rigidez Secante por Serie de los 4 Ensayos .....	116
Figura 4.44. Degradación Rigidez de los 4 Ensayos.....	116
Figura 4.45. Variación del Amortiguamiento Viscoso de los 4 Ensayos.....	117
Figura 4.46. Curva EEEP .....	118
Figura 4.47. Curva Fuerza Vs. Deriva .....	121
Figura 4.48. Curvas Envolventes Promedios .....	123
Figura 4.49. Energía Disipada por Serie .....	124
Figura 4.50. Rigidez Secante por Serie.....	124
Figura 4.51. Degradación Rigidez .....	125
Figura 4.52. Variación del Amortiguamiento Viscoso Equivalente .....	125
Figura 4.53. Curvas EEEP .....	126
Figura 4.54. Análisis de Derivas.....	127
Figura 4.55. Curva Fuerza Vs. Deriva Elástica.....	129
Figura 4.56. Curva Fuerza Vs. Deriva Inelástica.....	129

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Resumen de Resultados Ensayo a Compresión Mortero para Mampostería .....	20
Tabla 3.2. Resumen de Resultados Ensayo a Compresión Mortero para Uniones .....	21
Tabla 3.3. Resultados de las Propiedades Físicas.....	46
Tabla 3.4. Resultados de las Propiedades Mecánicas.....	46
Tabla 3.5. Resumen Resultados de Ensayo a Compresión de Mampuestos.....	48
Tabla 3.6. Método de Prueba C – Amplitud del Ciclo Primario.....	49
Tabla 3.7. Protocolo de Carga para $\Delta = 200$ mm .....	50
Tabla 3.8. Protocolo de Carga para $\Delta = 60$ mm .....	51
Tabla 3.9. Análisis de Fuerza Sísmica .....	59
Tabla 4.1. Puntos Envolvente - Ensayo 1 - LVDT A.....	65
Tabla 4.2. Energía Disipada - Ensayo 1 - LVDT A .....	66
Tabla 4.3. Rigidez Secante - Ensayo 1 - LVDT A.....	68
Tabla 4.4. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 1 - LVDT A.....	69
Tabla 4.5. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 1 - LVDT A.....	70
Tabla 4.6. Datos Curva EEEP - Ensayo 1 - LVDT A .....	71
Tabla 4.7. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 1 - LVDT A.....	74
Tabla 4.8. Análisis de Derivas - Ensayo 1 - LVDT A .....	75
Tabla 4.9. Relación de Deformaciones - Ensayo 1 .....	76
Tabla 4.10. Relación de Energía Disipada y Absorbida - Ensayo 1 .....	76
Tabla 4.11. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente - Ensayo 1 .....	77
Tabla 4.12. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico - Ensayo 1 .....	77
Tabla 4.13. Puntos Envolvente – Ensayo 2 – LVDT A .....	78
Tabla 4.14. Energía Disipada - Ensayo 2 - LVDT A .....	79
Tabla 4.15. Rigidez Secante - Ensayo 2 - LVDT A.....	80

Tabla 4.16. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 2 - LVDT A .....	82
Tabla 4.17. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 2 - LVDT A.....	83
Tabla 4.18. Datos Curva EEEP - Ensayo 2 - LVDT A .....	84
Tabla 4.19. Tabla Variables - Ensayo 2 - LVDT A.....	85
Tabla 4.20. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 2 - LVDT A.....	86
Tabla 4.21. Análisis de Derivas – Ensayo 2 – LVDT A.....	87
Tabla 4.22. Relación de Deformaciones – Ensayo 2.....	87
Tabla 4.23. Relación de Energía Disipada y Absorbida – Ensayo 2 .....	88
Tabla 4.24. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente – Ensayo 2 .....	88
Tabla 4.25. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico – Ensayo 2 .....	88
Tabla 4.26. Puntos Envolvente - Ensayo 3 - LVDT A.....	90
Tabla 4.27. Energía Disipada - Ensayo 3 - LVDT A .....	91
Tabla 4.28. Rigidez Secante - Ensayo 3 - LVDT A.....	92
Tabla 4.29. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 3 - LVDT A .....	93
Tabla 4.30. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 3 - LVDT A.....	94
Tabla 4.31. Datos Curva EEEP - Ensayo 3 - LVDT A .....	95
Tabla 4.32. Tabla Variables - Ensayo 3 - LVDT A.....	96
Tabla 4.33. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 3 - LVDT A.....	97
Tabla 4.34. Análisis de Derivas - Ensayo 3 - LVDT A .....	98
Tabla 4.35. Relación de Deformaciones - Ensayo 3 .....	98
Tabla 4.36. Relación de Energía Disipada y Absorbida - Ensayo 3 .....	99
Tabla 4.37. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente - Ensayo 3.....	99
Tabla 4.38. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico - Ensayo 3.....	99
Tabla 4.39. Puntos Envolvente – Ensayo 4 – LVDT A .....	101
Tabla 4.40. Energía Disipada - Ensayo 4 - LVDT A .....	102
Tabla 4.41. Rigidez Secante - Ensayo 4 - LVDT A.....	103

Tabla 4.42. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 4 - LVDT A.....	104
Tabla 4.43. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 4 - LVDT A.....	105
Tabla 4.44. Datos Curva EEEP - Ensayo 4 - LVDT A.....	106
Tabla 4.45. Tabla Variables - Ensayo 4 - LVDT A.....	107
Tabla 4.46. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 4 - LVDT A.....	108
Tabla 4.47. Análisis de Derivas – Ensayo 4 – LVDT A.....	109
Tabla 4.48. Relación de Deformaciones – Ensayo 4.....	110
Tabla 4.49. Relación de Energía Disipada y Absorbida – Ensayo 4.....	110
Tabla 4.50. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente – Ensayo 4.....	111
Tabla 4.51. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico – Ensayo 4.....	111
Tabla 4.52. Curva Envolvente Promedio de los 4 Ensayos.....	112
Tabla 4.53. Energía Disipada.....	114
Tabla 4.54. Rigidez Secante.....	115
Tabla 4.55. Amortiguamiento Viscoso Equivalente de los 4 Ensayos.....	117
Tabla 4.56. Datos Curva EEEP.....	118
Tabla 4.57. Tabla Variables.....	119
Tabla 4.58. Derivas Elástica e Inelástica.....	120
Tabla 4.59. Análisis de Derivas.....	122
Tabla 4.60. Tabla Variables.....	127
Tabla 4.61. Derivas Elástica e Inelástica.....	128
Tabla 4.62. Análisis de Derivas.....	130

## LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.1. Ladrillo Cerámico .....	7
Fotografía 2.2. Absorción de Agua.....	14
Fotografía 2.3. Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	15
Fotografía 3.1. Caña Guadúa Angustifolia Kunth .....	19
Fotografía 3.2. Preparación de Mortero para Mampostería .....	19
Fotografía 3.3. Ensayo a Compresión de Mortero para Mampostería.....	20
Fotografía 3.4. Mortero Expansivo .....	21
Fotografía 3.5. Ladrillo Cerámico .....	22
Fotografía 3.6. Chicote .....	23
Fotografía 3.7. Gancho "J" .....	23
Fotografía 3.8. Perno 3/8" .....	24
Fotografía 3.9. Perno 3/4" .....	24
Fotografía 3.10. Herramientas Manuales .....	25
Fotografía 3.11. Horno Eléctrico.....	26
Fotografía 3.12. Balanza .....	26
Fotografía 3.13. Actuador Dinámico.....	27
Fotografía 3.14. Dispositivo LVDT.....	28
Fotografía 3.15. Estructura Anclada.....	29
Fotografía 3.16. Placas de Empuje y Halado .....	29
Fotografía 3.17. Placas de Empuje y Halado Instaladas .....	30
Fotografía 3.18. Entalladura en Arriostramientos .....	32
Fotografía 3.19. Unión Viga-Columna Mediante Gancho "J" .....	33
Fotografía 3.20. Módulo Ensamblado .....	33
Fotografía 3.21. Conformación de la Estructura.....	34
Fotografía 3.22. Pretensión de Placas de Anclaje.....	35
Fotografía 3.23. Corte de Columnas .....	36
Fotografía 3.24. Colocación de Pernos 3/8" .....	36
Fotografía 3.25. Colocación de Perno 3/4".....	37

Fotografía 3.26. Vertido de Mortero en Uniones .....	37
Fotografía 3.27. Colocación de Chicotes .....	38
Fotografía 3.28. Modelo Terminado .....	39
Fotografía 4.1. Deslizamiento de Viga .....	131
Fotografía 4.2. Falla por Aplastamiento en Columna .....	132
Fotografía 4.3. Falla por Aplastamiento en Columna (Ensayo 3) .....	133
Fotografía 4.4. Falla a Corte en Viga .....	133
Fotografía 4.5. Separación Mampostería .....	134
Fotografía 4.6. Falla a Corte en Mampostería .....	135
Fotografía 4.7. Falla a Flexión en Mampostería .....	136
Fotografía 4.8. Falla por Tensión Diagonal en Mampostería.....	137

## RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se propone el análisis del comportamiento sismo-resistente de una estructura de caña guadúa, en la cual se implementa mampostería de ladrillo artesanal como modificación del diseño planteado originalmente en el proyecto de titulación *“Estudio del comportamiento sismo-resistente en una estructura espacial de caña guadua sometida a carga lateral con inversión, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez”*, desarrollado por Jonathan Herrera y Luis Viteri, en la Escuela Politécnica Nacional, en el año 2017. Esta propuesta tuvo como objetivo reducir las derivas de piso, mejorar su comportamiento sismo-resistente y aportar nueva información al conocimiento técnico preexistente acerca de la construcción con caña guadúa *Angustifolia Kunth*.

Los materiales empleados en la construcción de las estructuras: caña guadúa, ladrillo artesanal, mortero relación 1:3 para mampostería y mortero expansivo para las conexiones, fueron ensayados previamente, determinando sus propiedades físicas y mecánicas. Los prototipos fabricados fueron sometidos a ensayos de carga lateral cuasi-estática con inversión, registrando cargas y desplazamientos, valores con los cuales se procedió a realizar el procesamiento de datos, del cual se genera la curva de histéresis, que nos permitió determinar parámetros fundamentales para analizar el comportamiento sismo-resistente de los mismos. Estos parámetros fueron: energía disipada, rigidez secante, amortiguamiento viscoso, ductilidad y factor de reducción de comportamiento sísmico. Además, se elaboró la curva envolvente elasto-plástica de energía y se calcularon las derivas de piso elásticas e inelásticas.

Finalmente, se compararon los resultados de los dos estudios, demostrando la disminución significativa en las derivas de piso y el aumento de rigidez y estabilidad en las estructuras.

**Palabras clave:** Caña Guadúa, *Angustifolia Kunth*, Ladrillo Artesanal, Comportamiento Sismo-Resistente, Mampostería, Curva de Histéresis.

## ABSTRACT

In the present Project, a seismic-resistant behavior analysis is proposed based on a guadua cane structure, in which a masonry of handmade brick is implemented as a modification of the original design in the project *“Estudio del comportamiento sismo-resistente en una estructura espacial de caña guadua sometida a carga lateral con inversión, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez”*, developed by Jonathan Herrera and Luis Viteri, at Escuela Politécnica Nacional, in 2017. This proposal’s objective was to reduce the floor drift, improve its seismic-resistant behavior and contribute new information to the preexistent technical knowledge on guadua cane (*Angustifolia Kunth*) constructions.

The materials used in the construction of the structures: guadua cane, handmade brick, mortar rate 1:3 for masonry and expansive mortar for the connections, were previously tested, in order to determine their physical and mechanical properties.

The manufactured prototypes were subdued to quasi-static lateral force with inversion essays, recording loads and drifts, values that were taken for the data processing, from which the hysteresis curve is obtained, and allowing the determining of fundamental parameters to analyze the seismic-resistant behavior of the previously mentioned parameters. These parameters being: dissipated energy, drying stiffness, viscous muffling, ductility and the seismic behavior reduction factor. Furthermore, the equivalent energy elastic-plastic curve was made, and the elastic and inelastic floor drifts were estimated.

Finally, both studies results were compared, having demonstrated the significant reduction of the floor drifts and a stiffness increase and structure stability.

**Keywords:** Guadua Cane, *Angustifolia Kunth*, Handmade Brick, Seismic-Resistant Behavior, Masonry, Hysteresis Curve.

## **PRESENTACIÓN**

El contenido del presente trabajo se encuentra distribuido en cinco capítulos, que se encuentran detallados a continuación:

Capítulo 1, consta de introducción, donde se proporciona la información que antecede a este estudio, se plantea los objetivos, alcance, justificación y una síntesis de la metodología empleada en su desarrollo.

Capítulo 2, se define el marco teórico, que contiene descripciones acerca de la mampostería, ladrillo cerámico con sus generalidades, fabricación, clasificación, propiedades físicas y mecánicas, requerimientos para la construcción e influencia de la mampostería en estructuras.

Capítulo 3, se explica la metodología a seguir durante todo el proyecto, detallando materiales y equipos, procedimientos de ensayos y procesamiento de datos.

Capítulo 4, comprende el análisis de los resultados de cada ensayo a carga lateral, donde se presentan gráficas y tablas para facilitar la interpretación y comparación de los datos obtenidos.

Capítulo 5, abarca las conclusiones generadas al término del proyecto y recomendaciones basadas en la experiencia, que contribuyan en futuras investigaciones.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

En el Ecuador, existen materiales que son utilizados precariamente, uno de ellos es la caña guadúa, que al ser empleada en la construcción de viviendas en zonas marginales, sin un adecuado conocimiento técnico, ha originado que se la relacione con la pobreza. En el sector profesional se desconoce sus características y adecuado uso (Rea Lozano, 2012).

La caña guadúa es un material noble, poco explotado y amigable con el ambiente, que actualmente busca introducirse en el ámbito de la construcción ecuatoriana debido a las altas capacidades físicas y mecánicas que ésta presenta. La versatilidad de la guadúa permite la combinación de éste con otros materiales como el acero, hormigón y mampuestos, logrando maravillosos resultados en su funcionamiento y mejorando sus propiedades estructurales (Mendoza Castro & Rosales Salcedo, 2014).

En Colombia y Perú se ha intensificado la construcción de modelos arquitectónicos con caña guadúa, dando paso a diversas investigaciones que han sido desarrolladas con el fin de normar su uso en el ámbito constructivo. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente y las Normas Técnicas Peruanas han servido como referencia para el creación del capítulo correspondiente a estructuras de guadúa en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

En Ecuador, principalmente en la zona del litoral, se evidencia el uso tradicional que los campesinos han dado a la caña guadúa, transmitiendo de generación en generación sus conocimientos ancestrales sobre el procedimiento de cosecha y construcción con este recurso, demostrando su favorable adaptación al clima y entorno.

La experiencia de sismos recientes ha determinado que la excesiva deriva permitida por las estructuras aporricadas provoca daños importantes. Como una solución alternativa se plantea muros en ladrillo de arcilla, los cuales aumentan resistencia y rigidez de manera uniforme a la estructura, siempre y cuando sean adosados a las columnas del pórtico y se ubiquen simétricamente, reflejando una disminución apreciable de las derivas elásticas sin inducir efectos desfavorables (Rochel, 2012).

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un estudio técnico experimental, mediante un ensayo de carga lateral con inversión (cíclica cuasi-estática) aplicada a un prototipo físico, para determinar el comportamiento sismo-resistente de la estructura en función de la mampostería implementada en el diseño de caña guadúa del proyecto de titulación *“Estudio del comportamiento sismo-resistente en una estructura espacial de caña guadua sometida a carga lateral con inversión, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez”*, desarrollado por Jonathan Herrera y Luis Viteri, en la Escuela Politécnica Nacional, en el año 2017, y así comparar los resultados con los obtenidos anteriormente.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Examinar las propiedades físico-mecánicas del conjunto caña guadua-ladrillo, para establecer sus ventajas dentro de la construcción.
- Observar y analizar el comportamiento de la conexión Simón Vélez modificada, generado por la aplicación de la carga cíclica cuasi-estática, teniendo en cuenta el aporte que otorga la mampostería a la estructura espacial.

- Determinar si la mampostería de ladrillo incide en la disminución de las derivas de la estructura, por medio de sensores de desplazamiento LVDT, situados en varias uniones de la estructura espacial.
- Generar conclusiones y recomendaciones para enriquecer el conocimiento existente acerca de este sistema constructivo y mejorar su aplicación en la práctica profesional.

### **1.3. ALCANCE**

El propósito del presente estudio es analizar la influencia de la mampostería de ladrillo incorporada en la estructura hexagonal de caña guadúa planteada en el proyecto de titulación elaborado por J. Herrera y L. Viteri, esperando evidenciar una disminución significativa de las derivas obtenidas en dicho proyecto que son del orden del 26% para la deriva inelástica, y aportar nuevos conocimientos técnicos sobre el uso de estos materiales en el ámbito constructivo.

La evaluación del comportamiento sismo-resistente de la estructura espacial será mediante un ensayo que consiste en aplicar una carga lateral con inversión, registrando en cada ciclo la carga y deformación obtenida, hasta alcanzar los valores máximos con los que se produce la falla de la estructura. Los datos registrados serán procesados y analizados en base al estudio previo realizado como proyecto de titulación por J. Herrera y L. Viteri, con el fin de establecer una comparación cualitativa y cuantitativa entre estos dos proyectos de investigación.

Para justificar la validez de este estudio se obtendrá las curvas de histéresis de cinco modelos con el fin de determinar su envolvente, energía disipada, rigidez secante y su degradación, amortiguamiento viscoso equivalente, ductilidad, resistencia a corte, factor de reducción de comportamiento sísmico y derivas.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN**

El uso de materiales sostenibles es cada vez más importante por lo que, en base a esta premisa, se intenta demostrar que el uso de la caña guadúa como material de construcción puede traer beneficios tanto sociales, económicos y ambientales (Rea Lozano, 2012).

La construcción informal es uno de los principales problemas en el Ecuador, lo cual ha ocasionado un sin número de pérdidas humanas, evidenciadas en los registros de los sismos ocurridos en los últimos años. Este problema es consecuencia de la falta de aplicación de la normativa vigente, que plantea un conjunto de directrices y lineamientos para diseño sismorresistente, ejecución, control y mantenimiento en obras civiles, afectando primordialmente a las poblaciones más vulnerables.

Es importante crear y difundir nuevos conocimientos acerca de sistemas constructivos alternativos para viviendas de interés social, utilizando materiales económicos, renovables y con propiedades que garanticen un buen desempeño sísmico resistente, previniendo deformaciones significativas en la estructura.

El estudio pretende determinar el comportamiento de la estructura en función de la conexión propuesta y la implementación de mampostería de ladrillo, desde la consideración de las variables dinámicas. Se aplicarán ensayos de carga lateral con inversión en cada modelo físico y de esta forma se pretende generar nueva información acerca de la combinación de estos materiales para la práctica constructiva.

## **1.5. METODOLOGÍA**

Para la ejecución de este proyecto técnico-experimental se construirá cinco modelos físicos en base al diseño propuesto por J. Herrera y L. Viteri, que consiste en una estructura espacial hexagonal de caña guadúa, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez, que consta de la unión viga-columna por medio de un gancho “J”, que se introduce por la columna y se enlaza a un pasador incrustado en la viga, para posteriormente verter mortero en cada conexión.

Las estructuras serán ensayadas a carga lateral cíclica cuasi-estática, aplicada gradualmente por medio de un actuador dinámico, obteniendo los datos requeridos para analizarlos y procesarlos, en similares condiciones que la referencia de estudio.

Los ensayos se realizarán en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional con ayuda de personal calificado.

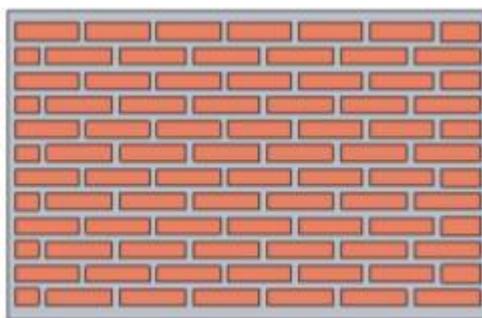
## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. MAMPOSTERÍA

Es el conjunto de dos fases materiales, la primera integrada por mampuestos que pueden ser macizos o huecos, los mismos que están fabricados de diferentes elementos como arcilla cocida, arena, hormigón, piedra, entre otros; y, la segunda, compuesta por juntas de mortero dispuestas en forma irregular o regular (López, Oller, & Oñate, 1998).

**Figura 2.1. Mampostería**



**Fuente:** (Capua, Pérez Gracia, & Gonzalez Drigo, 2010)

La mampostería tiene una gran variedad de aplicaciones que se ha evidenciado con el pasar de los años, modificando sus componentes y destacándose por su bajo costo. Sin embargo, al regirse a un método tradicional de colocación, el encarecimiento actual de la mano de obra ha originado su baja demanda respecto a materiales industrializados como el hormigón y el acero.

Una de las propiedades que destaca en la mampostería es su capacidad para transmitir cargas de compresión, la cual es controlada por las características mecánicas de los ladrillos. Por otro lado, las juntas de mortero son las limitantes en la capacidad resistente final, ya que constituyen planos de debilidad dependiendo de la dirección en la que estén dispuestas, provocando un desarrollo masivo de fisuración y finalmente el fallo de la estructura (López, Oller, & Oñate, 1998).

Ante la ocurrencia de un fenómeno natural como son los sismos, la falla de la mampostería se debe principalmente a que presenta una carente capacidad para asimilar deformaciones significativas en su plano y a que los diseñadores no lo consideran en el análisis y diseño estructural (Carrillo León, 2004).

La inclusión de mampostería en estructuras flexibles presenta algunas ventajas, entre las cuales destaca su gran aporte a la rigidez, aumentando la resistencia y disminuyendo derivas de piso; adicionalmente, en comparación a los muros de hormigón armado, existe una reducción en peso, lo cual permite disminuir masa sísmica, favoreciendo al comportamiento de la edificación ante la ocurrencia de un sismo. Al reducir peso de los muros se evidencia una ventaja económica ya que se necesita elementos estructurales de menor tamaño (Espinosa Jarrín, 2018).

### **2.1.1. LADRILLO CERÁMICO**

#### **2.1.1.1. Generalidades**

El ladrillo cerámico es un elemento utilizado en la industria de la construcción, su principal materia prima es la arcilla, la misma que es sometida a un proceso de humidificación, moldeado, secado y cocción, obteniendo un paralelepípedo rectangular con diversas dimensiones que son elegidas por el fabricante, considerando la proporcionalidad entre las mismas, tal como indica la norma INEN 3049. La selección del mampuesto depende del uso estructural o arquitectónico que se le vaya a dar (NTE INEN 3049 Parte 1, 2018).

#### **Fotografía 2.1. Ladrillo Cerámico**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Según investigaciones, se sabe que las civilizaciones prehispánicas ya tenían conocimiento sobre la fabricación y empleo de este material, así como de su técnica

constructiva en diferentes obras civiles, factores que no han tenido un progreso significativo hasta el presente (Rosas Tapia & Torres Maldonado, 2014).

Su utilización se originó debido a la abundancia de arcilla y la necesidad de protegerse del exterior al inicio del sedentarismo, en la actualidad, su empleo ha disminuido por la aparición de nuevos materiales con mejores propiedades.

La fabricación se puede realizar siguiendo tres procedimientos:

**Artesanal:** Su elaboración es de forma manual, desde la extracción de la materia prima hasta su cocción, siendo el método más común en el E. Se caracteriza por tener diferencias entre las unidades (Barranzuela Lescano, 2014).

**Figura 2.2. Ladrillera Artesanal**



**Fuente:** (Barranzuela Lescano, 2014)

**Semi-industrial:** En este proceso se combina la mano de obra, utilizada para la extracción y supervisión, con la maquinaria que se encarga de realizar la mezcla, moldeado y cocción. Se caracteriza por lucir una superficie lisa (Barranzuela Lescano, 2014).

**Figura 2.3. Moldeado Semi-Industrial de Ladrillo**



**Fuente:** (Camara Anculli, 2015)

**Industrial:** La fabricación es completamente mecanizada, obteniendo mayor rendimiento y calidad. La intervención humana es netamente para supervisión. Se caracteriza por su uniformidad (Barranzuela Lescano, 2014).

**Figura 2.4. Planta industrial de ladrillo**



**Fuente:** (Arquíñigo Trujillo, 2011)

### 2.1.1.2. Fabricación

Los ladrillos empleados en este estudio fueron fabricados artesanalmente, debido a su fácil adquisición, bajo costo y a que es el tipo de ladrillo más utilizado en nuestro medio. El desarrollo de manufactura se detalla a continuación:

**Extracción:** Se obtiene la arcilla de canteras cercanas, utilizando herramienta manual o maquinaria pesada y se transporta al lugar destinado para la producción.

**Figura 2.5. Extracción de Arcilla**



**Fuente:** (Arquíñigo Trujillo, 2011)

**Mezcla:** Para lograr una mezcla homogénea y uniforme es necesario retirar las pequeñas piedras del material extraído, añadir agua para conseguir la humedad precisa y pisotearla con la ayuda de ganado (Álvarez Guerrero, 2014).

**Figura 2.6. Mezclado con Ganado**



**Fuente:** (Álvarez Guerrero, 2014)

**Moldeo:** Esta etapa se realiza en un lugar cerrado, colocando aserrín en el piso con el fin de absorber el exceso de agua, sobre él se ubican los moldes de madera y se los llena con la mezcla, retirándolos inmediatamente (Álvarez Guerrero, 2014).

**Figura 2.7. Moldeado de Ladrillo**



**Fuente:** (Condori Apaza, 2013)

**Secado:** El secado se efectúa en el transcurso de dos a tres semanas, posteriormente se apilan los ladrillos durante un tiempo similar y finalmente se los sitúa en un lugar externo (Álvarez Guerrero, 2014).

**Figura 2.8. Secado de Ladrillo**



**Fuente:** (Rojas Rodríguez, Cortés Aburto, & Marín Dávila)

**Cocción:** Los ladrillos son colocados dentro del horno de manera que permita el flujo de calor, se intensifica el fuego alcanzando temperaturas entre 800°C y 1000°C, se cubre con barro el borde superior del horno y se procede a descargarlos transcurridos cinco días (Rosas Tapia & Torres Maldonado, 2014).

**Figura 2.9. Horno de Cocido**



**Fuente:** (Rojas Rodríguez, Cortés Aburto, & Marín Dávila)

### 2.1.1.3. Clasificación

Según la Norma INEN 3049 - Parte 3 - 2019 existen tres tipos de ladrillos cerámicos dependiendo la distribución de sus perforaciones y del volumen que ocupen, estos son ladrillos con perforación horizontal, perforación vertical y macizos; sin embargo, al no comprender una clasificación específica de ladrillos macizos, los mismos que serán objeto de este estudio, se toma como referencia la Norma INEN 297-2014.

Los ladrillos macizos se clasifican en tres tipos: tipo A, tipo B y tipo C, dependiendo su calidad, catalogándola de acuerdo a sus características físicas, como se detalla a continuación:

**Tipo A:** Ladrillo reprensado de color rojizo uniforme, con ángulos rectos y aristas rectas. Sin manchas, eflorescencias, quemados ni desconchados aparentes en caras y aristas.

**Tipo B:** Ladrillo de máquina de color rojizo, con ángulos rectos y aristas rectas, puede tener pequeñas imperfecciones en sus caras exteriores y variaciones de rectitud en sus aristas hasta de 5 mm.

**Tipo C:** Diferenciándose del tipo B en que puede ser fabricado a mano y tener imperfecciones en sus caras exteriores, así como variaciones de rectitud en sus aristas hasta de 8 mm (NTE INEN 297, 2014).

En cuanto a las propiedades físicas y mecánicas, según el tipo de ladrillo, se deben satisfacer los valores establecidos en la Figura 2.10.

**Figura 2.10. Requisitos de Resistencia Mecánica y Absorción a la Humedad**

Tipo De Ladrillo	Resistencia mínima a la compresión MPa* (ver nota 1)		Resistencia mínima a la flexión MPa* (Ver nota 1)	Absorción máxima de humedad %
	Promedio de 5 unidades	Individual	Promedio de 5 unidades	Promedio de 5 unidades
macizo tipo A	25	20	4	16
macizo tipo B	16	14	3	18
macizo tipo C	8	6	2	25

Fuente: (NTE INEN 297, 2014)

#### 2.1.1.4. Propiedades físicas y mecánicas

Conocer las propiedades físicas y mecánicas de los mampuestos es importante para comprobar que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad que se establece en la norma INEN 3049 - Parte 5, y así poder garantizar su aporte positivo en las construcciones. Las propiedades de los ladrillos cerámicos son:

**Absorción de agua:** Es un indicador de la porosidad del elemento, dependiendo de los materiales y las condiciones en que fue fabricado. Si tiene un alto índice de absorción quiere decir que es más poroso y por lo tanto menos resistente a la intemperie (Chávez Anyosa, 2017).

#### Fotografía 2.2. Absorción de Agua



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

**Resistencia a la compresión:** Es el esfuerzo que soporta el ladrillo ante la aplicación de una fuerza en dirección perpendicular a la superficie en la que se asienta. Determina su calidad estructural y su capacidad de resistir a distintas causas de deterioro (Chávez Anyosa, 2017).

### Fotografía 2.3. Ensayo de Resistencia a la Compresión



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

#### 2.1.1.5. Requerimientos para la construcción

El diseño de la mampostería debe regirse a la norma INEN 3049 y a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, capítulo Peligro Sísmico, diseño sismo resistente, en caso de que los requerimientos sean más rigurosos en la NEC, se debe dar prioridad a ésta (NTE INEN 3049 Parte 3, 2019).

En la Norma INEN 3049 Parte 3 se definen dos tipos de ladrillos para uso en mampostería no estructural, estos son: ladrillos comunes y ladrillos alivianados. Dichos mampuestos deben cumplir con los valores mínimos de resistencia a la compresión y absorción de agua, presentados en la Tabla 2.1., establecidos en la norma mencionada previamente (NTE INEN 3049 Parte 3, 2019).

**Figura 2.11. Tabla de Propiedades Físicas de las Unidades de Mampostería No Estructural**

Tipo	Resistencia mínima a la compresión		Absorción de agua máxima en % <sup>a, b</sup>	
	MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )		Interior	
	Promedio 5 unidades	Unidad	Promedio 5 unidades	Unidad
PH	3,0 (30)	2,0 (20)	17	20
PV	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20
M	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20
Unidades livianas PH	2,0 (20)	1,5 (15)	17	20

Fuente: (NTE INEN 3049 Parte 3, 2019)

### 2.1.2. INFLUENCIA DE LA MAMPOSTERÍA EN ESTRUCTURAS

Existen publicaciones, tales como las que se anotan a continuación, acerca de la influencia que ejerce la mampostería en estructuras, que han sido debidamente justificadas por medio de múltiples ensayos, concluyendo lo siguiente:

- Incorporar mampostería sin reforzamiento a una estructura produce una disminución significativa en las derivas y periodos de vibración, ocasionada por el aumento de rigidez que ésta proporciona (Lema Narváez & Méndez Estévez, 2019).
- En base a modelos computacionales, el desempeño estructural se ve perjudicado en estructuras de mayor altura, dado que al no poseer mampostería cumplen con el nivel de seguridad a la vida; sin embargo, al incluirla llegan al nivel de prevención al colapso y colapso, lo cual no ocurre en estructuras de menor altura con mampostería completamente rellena, que presentan un mejor comportamiento a causa de su mayor rigidez. (Lema Narváez & Méndez Estévez, 2019).
- Al incrementar la resistencia de la mampostería, se intensifica el efecto de torsión, a pesar de ello, el impacto es mínimo cuando se trata de estructuras regulares en planta (Lema Narváez & Méndez Estévez, 2019).
- La distribución de la mampostería y su resistencia a la compresión influyen en el porcentaje de rigidez que aumenta en la estructura, ocasionando una

reducción en su ductilidad, es decir, en su capacidad de deformación (Lema Narváez & Méndez Estévez, 2019).

- Las variaciones en amortiguamiento, rigidez, resistencia y ductilidad ocasionadas por la inclusión de mampostería facilitan el comportamiento inelástico de las estructuras para un sismo con un periodo de retorno que no exceda al de diseño, reduciendo los desplazamientos y por tanto sus consecuencias, por el contrario, para solicitaciones sísmicas prominentes, pueden llevar al colapso prematuro de las estructuras, provocado por fallas locales en elementos estructurales (Carrillo & González, 2007).

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

##### 3.1.1. MATERIALES

###### 3.1.1.1. Caña guadúa *Angustifolia Kunth*

Este material proviene del cantón Pedro Vicente Maldonado, ubicado al noroccidente de la provincia de Pichincha, una localidad con una temperatura que varía de 16°C a 25°C y una humedad relativa sobre el 70%, condiciones climáticas que favorecen su producción y comercialización. Para la elaboración de cada prototipo se utilizó aproximadamente 40 metros lineales de caña guadúa, considerando que cada culmo (tallo encima de la tierra), tiene una longitud de 6 metros y fueron construidos 5 modelos, se requirió 50 unidades de este material tomando en cuenta los desperdicios que se originan durante la fabricación y la selección de tramos con diámetros similares, garantizando simetría en las estructuras.

Las características geométricas promedio de los culmos son las siguientes:

- Diámetro Externo (cm): 10.20
- Diámetro Interno (cm): 8.14
- Espesor (cm): 0.79
- Área de sección transversal (cm<sup>2</sup>): 29.67

**Fotografía 3.1. Caña Guadúa Angustifolia Kunth**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

### **3.1.1.2. Mortero para mampostería**

El mortero utilizado para el pegado de los mampuestos se elaboró con relación 1:3 de cemento-arena, sin ningún tipo de aditivo.

**Fotografía 3.2. Preparación de Mortero para Mampostería**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Se realizó el ensayo a compresión en probetas de mortero tomadas durante la construcción de las estructuras, el resumen de resultados se presenta en la Tabla 3.1.

**Fotografía 3.3. Ensayo a Compresión de Mortero para Mampostería**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

**Tabla 3.1. Resumen de Resultados Ensayo a Compresión Mortero para Mampostería**

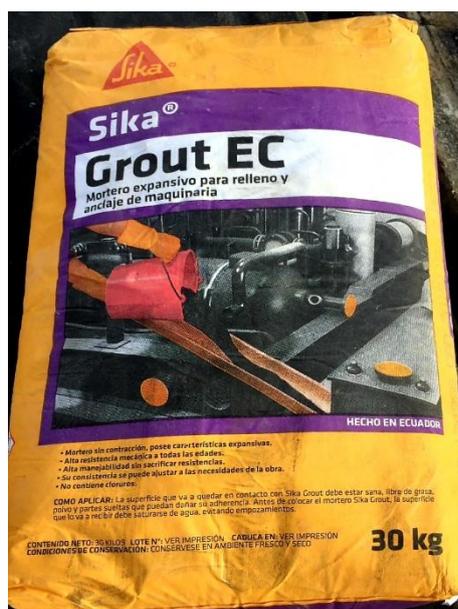
<b>RESUMEN ENSAYO MORTERO MAMPOSTERIA</b>		
Díámetro	cm	10.07
Altura	cm	20.12
Peso	kg	3.37
Peso Específico	g/cm <sup>3</sup>	2.10
Carga	kg	15132.65
Área Promedio	cm <sup>2</sup>	79.64
Resistencia a la Compresión	kgf/cm <sup>2</sup>	190.01

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

### 3.1.1.3. Mortero expansivo para uniones

Para rellenar las uniones de la estructura de caña guadúa, se utilizó mortero expansivo para relleno de fisuras y anclajes, marca Sika, compuesto por cemento, arena y aditivos. El motivo por el cual se decidió usar este material es debido a su facilidad de preparación, alta resistencia mecánica y alta manejabilidad.

Fotografía 3.4. Mortero Expansivo



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

Se recolectaron probetas de mortero expansivo utilizado en las uniones para su posterior ensayo a compresión, el resumen de resultados se exhibe en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resumen de Resultados Ensayo a Compresión Mortero para Uniones

RESUMEN ENSAYO MORTERO UNIONES		
Diámetro	cm	10.1
Altura	cm	19.93
Peso	kg	3.6
Peso Específico	g/cm <sup>3</sup>	2.25
Carga	kg	27301.02
Área Promedio	cm <sup>2</sup>	80.12
Resistencia a la Compresión	kgf/cm <sup>2</sup>	340.76

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 3.1.1.4. Ladrillo

Para la mampostería se utilizó ladrillo cerámico de medidas 24 x 12 x 8 cm, comúnmente llamado jaboncillo, la cantidad requerida para cada estructura fue de aproximadamente 480 unidades, dando un total de 2400 ladrillos. Adicionalmente se destinó 10 unidades para los ensayos de laboratorio pertinentes.

**Fotografía 3.5. Ladrillo Cerámico**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Las propiedades físicas de los mampuestos se obtuvieron en base a la norma INEN 3049 parte 5, donde se detallan los procedimientos de ensayo para determinar la resistencia a la compresión y absorción de agua

#### 3.1.1.5. Chicotes

Los chicotes se colocaron según los parámetros establecidos en el capítulo NEC-SE-VIVIENDA parte 2 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, donde se especifica lo siguiente:

En las columnas se dejan chicotes de anclaje, con barras de diámetro mínimo de 5.5 mm de  $f_y = 5000\text{kg/cm}^2$  cada tres hiladas de mampuesto y/o cada 60cm, con gancho y 15 cm de empotramiento y al menos 50 cm en la pared (NEC-SE-VIVIENDA-parte-2, 2015).

Considerando esta referencia, se colocaron chicotes con gancho, utilizando varilla de 8mm cada cuatro hiladas de mampuesto, es decir 40 cm y con una longitud de 50 cm incrustada en la pared.

**Fotografía 3.6. Chicote**



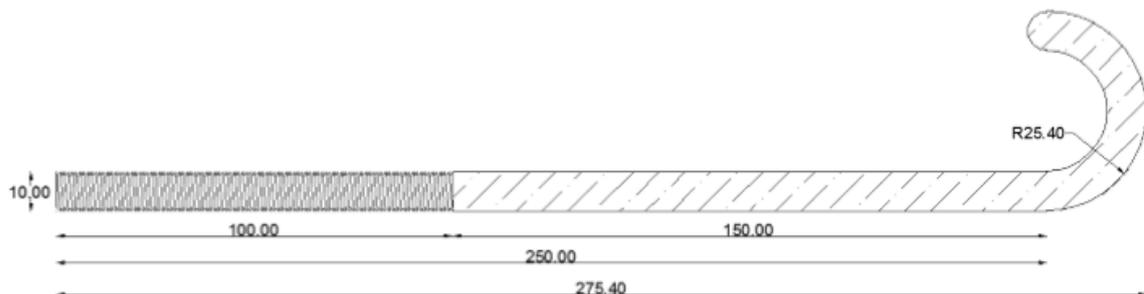
**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

### 3.1.1.6. Ganchos “J”

La conexión entre columnas y vigas se realizó mediante un gancho “J” fabricado específicamente para este fin, cuya configuración geométrica se puede observar en la Figura 3.1., detallada en milímetros.

La construcción de los cinco prototipos requirió de 80 ganchos con sus respectivos pasadores.

**Figura 3.1. Configuración Geométrica del Gancho “J”**



**Fuente:** (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

**Fotografía 3.7. Gancho "J"**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

### 3.1.1.7. Pernos

Para fijar la estructura en las bases se precisó de 24 pernos de 3/8" y 20 cm de longitud con arandelas y tuercas en sus dos extremos, los mismos que fueron reutilizados en los siguientes ensayos.

Adicionalmente, se utilizó un perno de 3/4" con una longitud de 50 cm con el objetivo de acoplar las tres cañas diagonales que actúan como riostras en la cubierta de la estructura.

**Fotografía 3.8. Perno 3/8"**



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

**Fotografía 3.9. Perno 3/4"**



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

### 3.1.2. EQUIPOS

#### 3.1.2.1. Herramienta manual

Las herramientas necesarias en el proceso de construcción fueron las siguientes:

- ❖ Amoladora eléctrica con disco de corte
- ❖ Sierra
- ❖ Taladro
- ❖ Martillo
- ❖ Llave de tuercas
- ❖ Alicata
- ❖ Destornillador
- ❖ Flexómetro
- ❖ Esmeril

**Fotografía 3.10. Herramientas Manuales**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

#### 3.1.2.2. Horno eléctrico

Con el horno eléctrico se realizó el secado de los mampuestos, que fue necesario para la ejecución de los ensayos de resistencia a la compresión y absorción. Los ladrillos permanecieron durante un tiempo de 24 horas dentro del horno a una temperatura de 110°C como indica la norma.

**Fotografía 3.11. Horno Eléctrico**

Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

### 3.1.2.3. Balanza

El peso de los ladrillos secos se los obtuvo con una balanza de precisión 0.1 gramos, dato fundamental para conseguir los resultados de laboratorio.

**Fotografía 3.12. Balanza**

Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

#### 3.1.2.4. Actuador dinámico

La aplicación de carga lateral cíclica con inversión fue mediante un actuador dinámico de pistón hidráulico de 18" marca Enerpac conectado a una celda de carga de 20 toneladas, la misma que es capaz de reproducir las cargas sísmicas conforme al protocolo seleccionado para el desarrollo del estudio.

El actuador es puesto en marcha a través de una bomba hidráulica de la misma marca, controlada con la ayuda de dos válvulas que permiten coordinar el movimiento del pistón para lograr los desplazamientos de empuje y retroceso, establecidos en cada ciclo de carga.

**Fotografía 3.13. Actuador Dinámico**



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

#### 3.1.2.5. Dispositivos LVDT

El transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) es un instrumento electro-mecánico, que permite la medición de desplazamientos, transformando el movimiento rectilíneo de su vástago, en una variación de voltaje que refleja el desplazamiento.

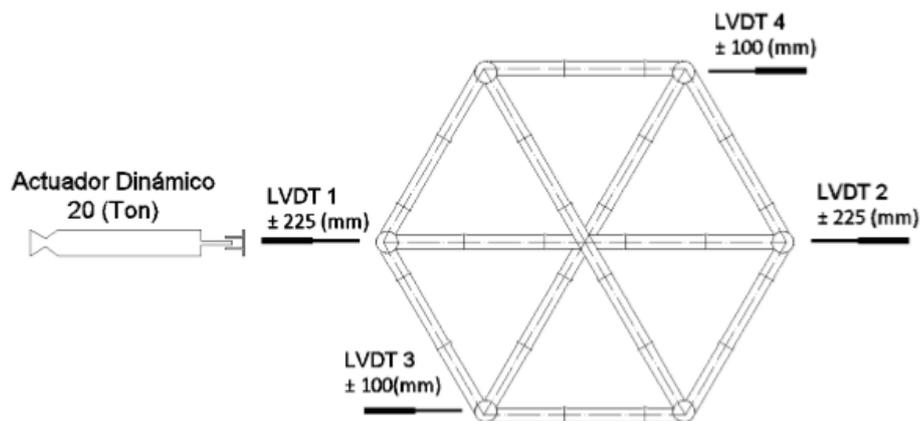
Para el ensayo se emplearon cuatro dispositivos ubicados en diferentes nudos de la estructura, con el fin de registrar los desplazamientos y analizar el comportamiento del prototipo ante la aplicación de fuerzas laterales.

**Fotografía 3.14. Dispositivo LVDT**



Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

**Figura 3.2. Disposición en Planta de Dispositivos LVDT**



Fuente: (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

### 3.1.2.6. Placas de anclaje

Con el propósito de anclar la estructura al suelo e impedir el movimiento de ésta, se fabricaron seis cilindros de 30 cm de altura y 13 cm de diámetro, que fueron soldados a placas de acero, ubicadas en base a la distribución geométrica de los agujeros de acople del Centro de Investigación de la Vivienda. Las placas poseen perforaciones que facilitan el paso de los ejes que atraviesan la losa, con el objetivo de asegurarlas y realizar la pretensión necesaria para el desarrollo del ensayo.

**Fotografía 3.15. Estructura Anclada**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

#### **3.1.2.7. Placas de empuje**

Para transmitir correctamente la fuerza generada por el actuador a toda la estructura, se colocaron tres placas de acero diseñadas especialmente para este modelo que fueron sujetadas entre sí mediante cuatro varillas de diámetro 3/4" con una rosca de 30 cm de longitud, de manera que se permita anclar una de estas al actuador con la ayuda de un pasador de 6 cm de diámetro.

**Fotografía 3.16. Placas de Empuje y Halado**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Fotografía 3.17. Placas de Empuje y Halado Instaladas

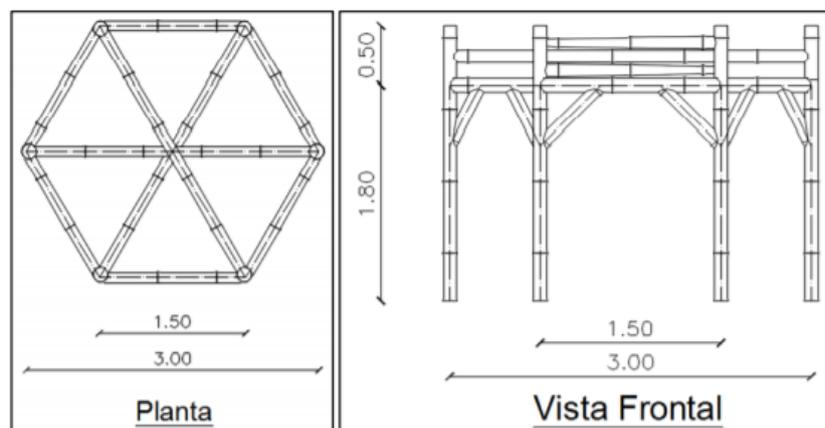


Fuente: Obtenido por Jaramillo y Torres

### 3.2. CONFIGURACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL HEXAGONAL

El diseño estructural aplicado fue el mismo que se utilizó en el proyecto de titulación “*Estudio del comportamiento sismo-resistente en una estructura espacial de caña guadua sometida a carga lateral con inversión, utilizando una modificación de la conexión Simón Vélez*”, desarrollado por Jonathan Herrera y Luis Viteri, en la Escuela Politécnica Nacional, en el año 2017; con el fin de realizar las comparaciones planteadas en los objetivos y sugeridas en las conclusiones de este trabajo previo. La configuración seleccionada se detalla en la Figura 3.3.

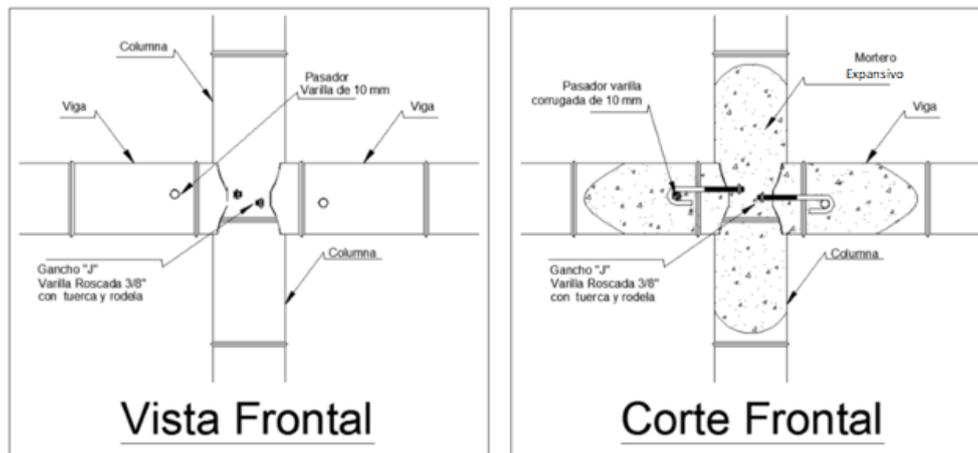
Figura 3.3. Configuración Estructural



Fuente: (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

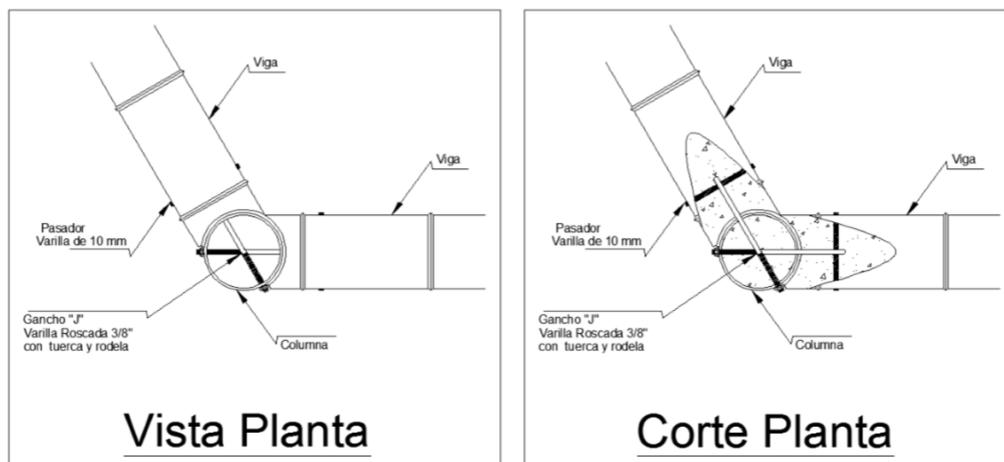
La razón por la que se escogió esta configuración es por su versatilidad al momento de construir obras como restaurantes, covachas, pérgolas, cabañas, viviendas, etc, además de que es adecuada para implementar la modificación de la conexión Simón Vélez que se muestra en la Figura 3.4. (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017).

**Figura 3.4. Vista Frontal de la Modificación de la Conexión Simón Vélez**



Fuente: (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

**Figura 3.5. Vista en Planta de la Modificación de la Conexión Simón Vélez**



Fuente: (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

Para la construcción de los prototipos a ser ensayados se adquirió cincuenta culmos de caña, cortándolos de diferentes longitudes, de acuerdo con la configuración planteada. Para la unión de los extremos de vigas y largueros con las columnas, es necesario realizar entalladuras en forma de boca de pescado; en cuanto a los extremos de los arriostramientos, las entalladuras serán en forma de pico de flauta.

**Fotografía 3.18. Entalladura en Arriostramientos**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Se ensamblaron tres módulos principales para cada estructura, formados por la unión de dos columnas a una viga, mediante el empleo de ganchos “J”; mientras que las arriostras inclinadas de cada unión, se fijaron únicamente con tirafondos. Este procedimiento permitió facilitar y agilizar la fabricación de los prototipos puesto que, con tres módulos, se tienen los lados alternados del hexágono de su configuración en planta. El proceso se aprecia en las siguientes fotografías.

**Fotografía 3.19. Unión Viga-Columna Mediante Gancho “J”**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

**Fotografía 3.20. Módulo Ensamblado**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Con los tres módulos ensamblados se procede a unir las vigas y arriostramientos restantes, conformando la estructura hexagonal, adicionalmente, se colocan los largueros entre columnas opuestas, a 50 cm por arriba de las vigas, con el objetivo de que la estructura se integre y trabaje en conjunto. En la investigación de Herrera y Viteri, los largueros fueron ajustados a las columnas por medio de tirafondos, a pesar de ello, en el presente estudio se implementó una modificación, reemplazando los tornillos por ganchos “J” para mejorar su acoplamiento. Se decidió hacer esta modificación al observar que los largueros se separaban de las columnas durante el primer ensayo del proyecto actual, impidiendo su culminación.

**Fotografía 3.21. Conformación de la Estructura**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

En el Centro de Investigación de la Vivienda, lugar donde se llevó a cabo el ensayo a carga lateral, se instalaron las placas de anclaje, considerando la ubicación y dimensión del actuador dinámico que debe coincidir con el nudo de la estructura para la correcta aplicación de la carga. Luego de la colocación de las placas de anclaje en la losa de reacción horizontal, se realizó la pretensión de éstas con una

presión de 211 kgf/cm<sup>2</sup> mediante una bomba manual, valor que se determinó tomando en cuenta el peso total de la estructura incluida la mampostería, evitando que se vuelque o deslice durante el ensayo.

**Fotografía 3.22. Pretensión de Placas de Anclaje**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Con el propósito de que el actuador dinámico ejerza su acción directamente sobre la unión viga- columna o nudo de la estructura, se debe ajustar la altura de las columnas, corrigiendo su dimensión con cortes adecuados en cada una de ellas. Asegurándose, además, la horizontalidad de la aplicación de cargas respecto a la geometría de la estructura, por tanto, se realizó un corte en cada columna de la estructura de aproximadamente 10 cm, para posteriormente introducirlas en las placas de anclaje y asegurarlas con 4 pernos de 3/8" que atraviesan cada una de las bases.

**Fotografía 3.23. Corte de Columnas**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

**Fotografía 3.24. Colocación de Pernos 3/8"**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Con el fin de lograr que la estructura fabricada trabaje de manera conjunta y como un solo cuerpo, se incorporó un perno de diámetro 3/4" y una longitud de 50 cm, uniendo los tres largueros de la cubierta y mejorando la repartición de carga en la estructura.

**Fotografía 3.25. Colocación de Perno 3/4"**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Para la conexión Simón Vélez modificada, se realizaron orificios en los extremos de las vigas utilizando una broca sacabocados de diámetro 2", los mismos que fueron rellenados con mortero expansivo hasta cubrir el gancho "J", de igual manera, se rellenó la sección de la columna en la cual se cruzan los ganchos de las dos vigas enlazadas, impidiendo su desplazamiento y mejorando su respuesta estructural (Salas Delgado, 2006).

**Fotografía 3.26. Vertido de Mortero en Uniones**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Para levantar la mampostería se preparó un mortero relación 1:3 y se utilizaron ladrillos de dimensiones 24x12x8 cm, los cuales fueron sumergidos en agua antes de su colocación, para garantizar la adherencia de éstos con la mezcla de mortero. Además de estos materiales se usaron chicotes de acero con un diámetro de 8 mm y una longitud de 60 cm que fueron situados cada cuatro hileras de mampuestos para fijar la mampostería a la estructura de caña guadúa.

**Fotografía 3.27. Colocación de Chicotes**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

Se manejaron dos alturas diferentes de mampostería para la conformación del modelo, en tres caras alternadas la mampostería fue de 1 m de alto y en las tres restantes intermedias fue de la altura completa, es decir, 1.8m. Se consideró esta distribución para observar los efectos de los vacíos como ventanas o puertas, que se generarían en este tipo de diseño.

**Fotografía 3.28. Modelo Terminado**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

### **3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS**

Una etapa previa a la construcción de los prototipos, es la verificación de las propiedades físicas y mecánicas de los elementos constructivos, para lo cual se requiere de muestras representativas sobre las cuales ejecutar ensayos de control de calidad, de esta manera se asegura que el modelo estructural de ensayo cumpla con el nivel de calidad que requiere esta investigación. A continuación se detalla las propiedades físicas y mecánicas especificadas en la Norma Técnica Colombiana 5525.

#### **3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA**

La Norma Técnica Colombiana 5525, especifica el procedimiento a seguir para obtener cada una de las propiedades físicas, como también mecánicas de la Guadúa *Angustifolia* Kunth, exponiendo lo siguiente:

**Contenido de Humedad:** Es la cantidad de agua que posee la guadúa, ésta se la determina en porcentaje, calculando la diferencia entre su peso húmedo y su peso seco, respecto al peso seco. Para el ensayo se debe tomar una

muestra de cada culmo a utilizar en la construcción, éstas deben ser prismáticas con dimensiones de 25 x 25 mm y espesor igual al de la pared, éstas deben ser pesadas previo al secado en horno eléctrico por 24 horas y a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , finalmente las piezas son retiradas del horno y pesadas para determinar su contenido de humedad (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$\%CH = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Donde:

%CH = Porcentaje contenido de humedad

Ph = Peso de la muestra húmeda

Ps = Peso de la muestra seca

**Densidad:** Es el valor que representa la masa por unidad de volumen de la muestra y se lo consigue pesando la muestra y midiendo sus dimensiones. Las probetas tienen las mismas características que para el contenido de humedad y los resultados deben expresarse en  $\text{kg}/\text{m}^3$  (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right) \times 10^6$$

Donde:

$\rho$  = Densidad, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

m = Masa de la muestra, en g

V = Volumen húmedo de la muestra, en  $\text{mm}^3$

La densidad puede ser básica o verde, la básica se calcula utilizando la masa seca que se obtiene después de 24 horas de haber sido ingresada al horno; y la verde se calcula utilizando la masa húmeda, en su estado natural.

**Resistencia a la Compresión:** Las probetas necesarias para este ensayo deben carecer de nudos y tener una longitud igual al diámetro externo de la guadúa, sin embargo, si éste es menor de 20 mm, su altura correspondería al doble de su diámetro externo. Estos especímenes se tienen que extraer de las partes inferior, media y superior del culmo (NTC 5525, 2007).

Previo a la ejecución del ensayo se aplica una carga menor a 1kN que permite el acomodo del espécimen, a continuación, se efectúa el ensayo aplicando una carga continua a una velocidad de 0.01 mm/s (NTC 5525, 2007).

Adicionalmente, por cada lectura de carga se obtiene la deformación generada, el instrumento destinado para esta medición puede ser cualquier tipo de deformímetro. Considerando estos datos se elabora un diagrama con el fin de determinar el módulo de elasticidad del material (NTC 5525, 2007).

El esfuerzo último de compresión se calcula con los valores de carga máxima y el área de la sección transversal de la probeta (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Donde:

$\sigma_{ult}$  = Esfuerzo último de compresión, en N/mm<sup>2</sup>

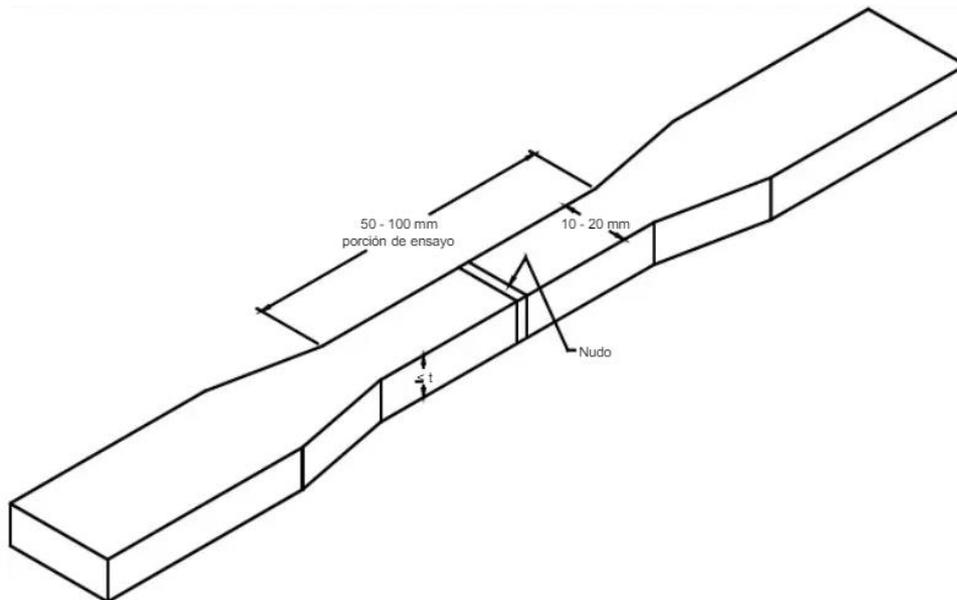
$F_{ult}$  = Carga máxima a la cual falla la probeta, en N

$A$  = Área de la sección transversal, en mm<sup>2</sup>

El módulo de elasticidad E es la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, en el rango de 10% a 60% de la carga última (NTC 5525, 2007).

**Tensión:** El ensayo se realiza en dirección paralela a las fibras en una sección longitudinal de caña que debe contener un nudo y se debe extraer de las partes inferior, media y superior del culmo. La configuración del espécimen se indica en la Figura 3.6.

**Figura 3.6. Probeta para Ensayo a Tensión**



**Fuente:** (NTC 5525, 2007)

El procedimiento consiste en tomar medidas de la sección transversal en tres lugares diferentes y calcular el promedio, asegurar la muestra en la máquina universal, aplicar la carga gradualmente creciente siguiendo una velocidad constante, leer la carga máxima y por último establecer el contenido de humedad. De ser necesario, el cálculo del módulo de elasticidad se lo efectúa de la misma manera que en la resistencia a la compresión (NTC 5525, 2007).

El esfuerzo último de tensión se define con los valores de carga máxima y el área de la sección transversal de la probeta (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Donde:

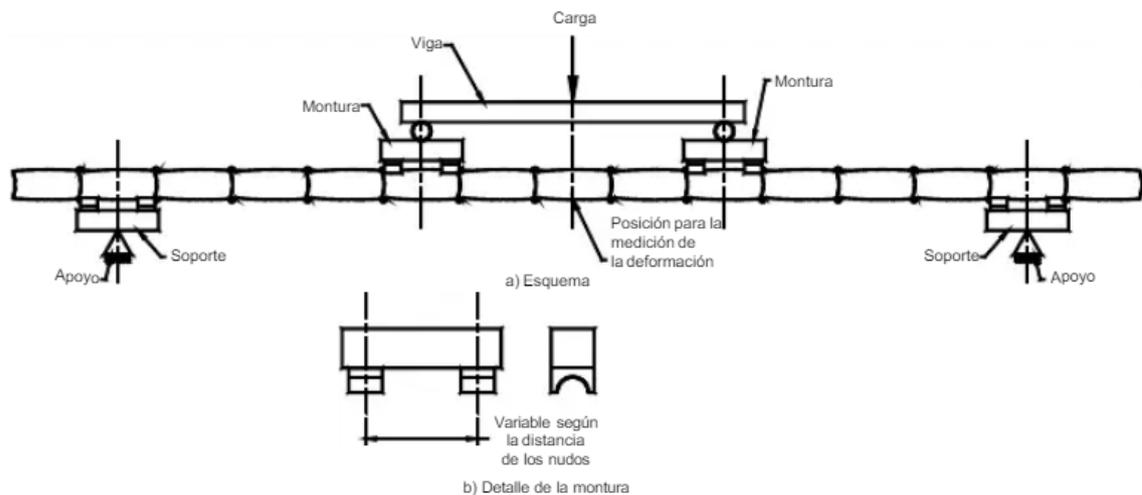
$\sigma_{ult}$  = Esfuerzo último de tensión, en N/mm<sup>2</sup>

$F_{ult}$  = Carga máxima a la cual falla la probeta, en N

$A$  = Área media de la sección transversal, en mm<sup>2</sup>

**Flexión:** Los culmos seleccionados para este ensayo no deben tener imperfecciones superficiales, su longitud debe ser igual a 30 diámetros externos más una longitud que asegure un entrenudo a continuación del apoyo en los extremos, la configuración para el desarrollo del ensayo se puede apreciar en la Figura 3.7. (NTC 5525, 2007).

**Figura 3.7. Esquema del Ensayo de Flexión**



**Fuente:** (NTC 5525, 2007)

Para iniciar el proceso del ensayo es necesario calcular el momento de inercia con la medida del diámetro externo representado por  $D$  y el espesor de la pared representado por  $t$ , este valor es importante para predecir el comportamiento durante el ensayo (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$I_B = \frac{\pi}{64} * [D^4 - (D - 2t)^4]$$

Seguido a este cálculo se ubica la muestra sobre los soportes de la máquina, las monturas y la viga de distribución de carga (Figura 3.7.), se aplica la carga uniformemente a una velocidad constante de 0.5mm/s hasta alcanzar su falla, se examina el culmo percatándose de sus fisuras y se detalla la forma de falla existente (NTC 5525, 2007).

Al finalizar el ensayo, se toman las medidas pertinentes para determinar nuevamente su inercia y se sustrae una muestra de un punto cercano a la falla para definir su contenido de humedad. Con estos datos se calcula la resistencia última (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$\sigma_{ult} = F * L * \frac{D}{6} * I_B$$

Donde:

F = Carga máxima, en N

L = Luz, en mm

D = Diámetro externo, en mm

I<sub>B</sub> = Momento de inercia, en mm<sup>4</sup>

Para definir el módulo de elasticidad, se calcula la pendiente del tramo lineal del diagrama deformación-carga (NTC 5525, 2007).

Ecuación:

$$E = 23 * F * \frac{L^3}{1296} * \delta * I_B$$

Donde:

F = Carga máxima, en N

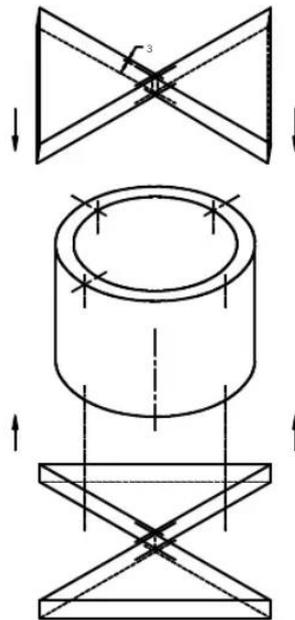
L = Luz, en mm

I<sub>B</sub> = Momento de inercia, en mm<sup>4</sup>

δ = Deflexión en el punto medio de la luz, en mm

**Corte:** Este ensayo es muy similar al de resistencia a la compresión, ya que los especímenes tienen las mismas características, la máquina a utilizar es la misma con la diferencia de que las placas de apoyo inferior y superior son en forma de cruz, generando cuatro áreas de corte, no obstante, su procedimiento es idéntico (NTC 5525, 2007).

**Figura 3.8. Ensayo de Corte**



**Fuente:** (NTC 5525, 2007)

Ecuación:

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\Sigma(t * L)}$$

Donde:

$T_{ult}$  = Resistencia última al corte, en MPa

$F_{ult}$  = Carga máxima de falla, en N

$t$  = Espesor de la pared, en mm

$L$  = Altura de la probeta, en mm

$\Sigma(txL)$  = Suma de los cuatro productos de  $t$  y  $L$

Se realizaron pruebas de control para comprobar que la caña guadúa usada en este estudio posee las mismas características de aquellas empleadas en el Proyecto de Titulación de J. Herrera y L. Viteri, ya que fueron obtenidas de la misma plantación; por consiguiente, se consideraron los mismos resultados en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas, valores que se observan en la Tabla 3.3. y Tabla 3.4.

**Tabla 3.3. Resultados de las Propiedades Físicas**

PROPIEDAD FÍSICA	RESULTADO
Contenido de Humedad Promedio (%)	14.6
Densidad Básica Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	0.62
Densidad Verde Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	0.71
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	0.66

Fuente: (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

**Tabla 3.4. Resultados de las Propiedades Mecánicas**

PROPIEDAD MECÁNICA	RESISTENCIA MÁXIMA (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
Compresión	38.85	15.25
Tensión	76.52	12.02
Flexión	71.79	15.82
Corte	2.08	-

Fuente: (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

### 3.3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS LADRILLOS

Los ensayos a realizarse en los ladrillos, se basan en la Norma INEN 3049 Parte 5, norma vigente, donde se describe los procesos a seguir para determinar sus propiedades físicas. Para el muestreo se apartan 10 unidades que sean representativas del lote entero y se valoran según su color, textura, dimensiones e imperfecciones superficiales, de estas se separa 5 unidades para el ensayo de absorción de agua y 5 unidades para el ensayo de resistencia a la compresión (NTE INEN 3049 Parte 5, 2019). Los procedimientos por seguir son:

**Absorción de Agua:** Inicialmente se secan las muestras ingresándolas al horno eléctrico durante 24 horas con una temperatura entre 110°C y 115°C, pasado ese tiempo se las deja enfriar al ambiente por aproximadamente 4 horas, ubicándolas con una separación adecuada; al finalizar el periodo de enfriamiento se pesan y se las introduce en agua limpia con una temperatura entre 15,5°C y 30°C por un lapso de 24 horas. Por último, se extraen los especímenes, se seca el exceso de agua con un paño húmedo y se pesan

sin dejar pasar un tiempo mayor a 5 minutos desde la extracción (NTE INEN 3049 Parte 5, 2019).

Ecuación:

$$\% \text{ absorción} = \frac{100x(W_{ss} - W_s)}{W_s}$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{100x(3755.72 - 2988.38)}{2988.38} = 25.69\%$$

Donde:

$W_{ss}$  = Masa de la muestra saturada, en g

$W_s$  = Masa de la muestra seca, en g

El resultado de 25.69% se obtuvo con el promedio de los datos de cinco muestras. El informe proporcionado por el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) se detalla en el Anexo 1.

**Resistencia a la compresión:** Se usa unidades secas que tengas la altura y ancho del ladrillo completo, pero con una longitud igual a la mitad del mampuesto entero  $\pm 25$  mm. Si las caras donde se aplicará la carga tienen defectos superficiales se debe nivelar con un relleno de mortero realizado con una relación 1:2 y esperar 24 horas antes de que el espécimen pueda ser ensayado. El relleno también puede ser con yeso o azufre (NTE INEN 3049 Parte 5, 2019).

La aplicación de la carga se realiza en la dirección que va a ser colocado el ladrillo en obra y la máquina a utilizar debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma ISO 7500-1 (NTE INEN 3049 Parte 5, 2019).

Ecuación:

$$C = \frac{W}{A}$$

Donde:

C = Resistencia a la compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>

W = Carga máxima de rotura, en kgf

A = Promedio de áreas superior e inferior del espécimen

**Tabla 3.5. Resumen Resultados de Ensayo a Compresión de Mampuestos**

<b>RESUMEN ENSAYO A COMPRESIÓN</b>		
Largo	cm	11.96
Ancho	cm	12.18
Altura	cm	7.5
Área Promedio	cm <sup>2</sup>	144.77
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	1.32
Carga	kgf	3505.73
Resistencia a la Compresión	kgf/cm <sup>2</sup>	24.22

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En el Anexo 1 se puede verificar el informe del ensayo a compresión de los mampuestos, realizado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR).

### **3.3.3. ENSAYO A CARGA LATERAL**

Al modelo previamente anclado, se le instalaron las placas de empuje, los dispositivos LVDT y el actuador dinámico por medio de un pasador. Con el montaje listo se ejecutó el ensayo en base a la Norma ASTM E2126-19.

Esta norma es aplicable en estructuras de madera y sugiere tres protocolos a seguir para la aplicación de la carga, de los cuales se seleccionó el Método de prueba C que involucra ciclos de desplazamientos agrupados en series o patrones que se van incrementando. La primera serie inicia con seis ciclos de la misma amplitud que se obtiene como el 5% de la deformación esperada. A partir de la segunda serie en adelante, la amplitud del primer ciclo de cada una, corresponde a un porcentaje establecido de la deformación esperada, tal como se indica en la Tabla 3.6.; y, en los ciclos posteriores, después del primero, de cada serie, la amplitud es el 75% de la amplitud del ciclo inicial (ASTM E2126-19, 2019).

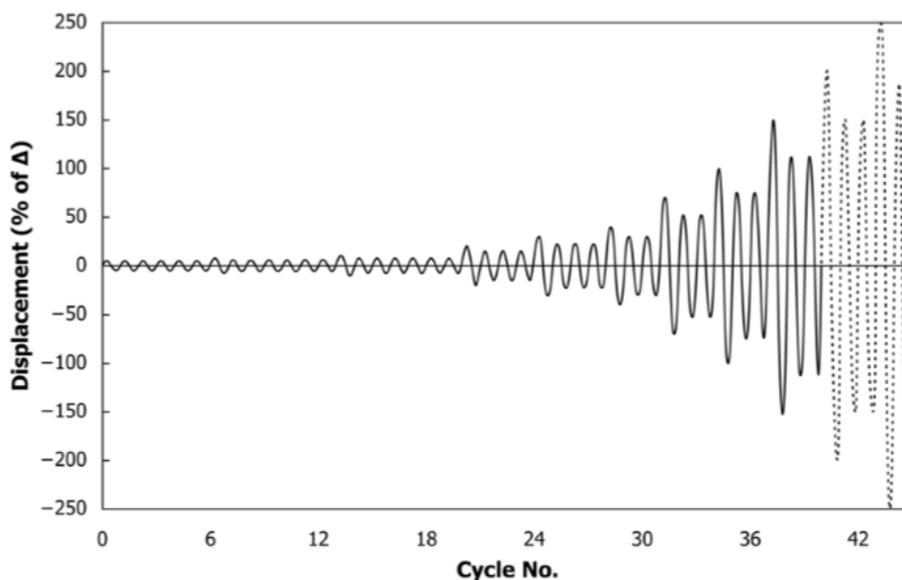
**Tabla 3.6. Método de Prueba C – Amplitud del Ciclo Primario**

Patrón	Paso	Número mínimo de ciclos	Amplitud del ciclo primario, % $\Delta$
1	1	6	5
2	2	7	7.5
	3	7	10
3	4	4	20
	5	4	30
4	6	3	40
	7	3	70
	8	3	100
	9	3	$100 + 100 \alpha^A$
	10	3	Incrementos adicionales de 100 $\alpha$ (hasta que el espécimen falle)

$$\alpha^A \leq 0.5$$

Fuente: (ASTM E2126-19, 2019)

**Figura 3.9. Patrón de Desplazamiento Cíclico**



Fuente: (ASTM E2126-19, 2019)

La deformación esperada se determinó considerando el aporte a la rigidez del conjunto con la implementación de las mamposterías, y tomando en cuenta la deformación obtenida en el Proyecto de Titulación de Herrera y Viteri que fue de 342 mm, de este modo, se estableció que se esperaba un 40% de reducción en la deformación por la rigidización, en consecuencia, el valor inicial de 200mm es considerado como deformación esperada para la primera estructura ensayada,

consiguiendo resultados que permitirán corregir este valor para los siguientes ensayos (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017).

**Tabla 3.7. Protocolo de Carga para  $\Delta = 200$  mm**

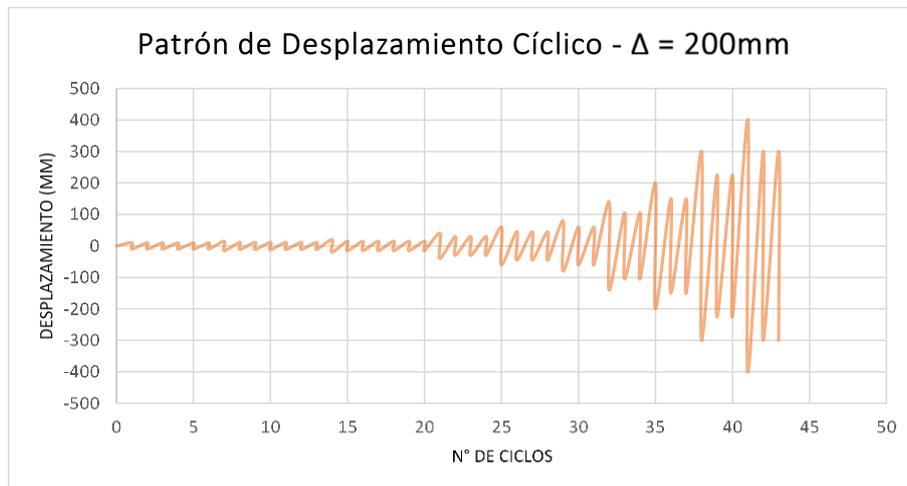
Patrón	Paso	Número mínimo de ciclos	Desplazamiento Objetivo (mm)								Amplitud del ciclo primario (% $\Delta$ )
			$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	
			$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	$\Delta (-)$	
1	1	6	10	10	10	10	10	10	10		5
			-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	
2	2	7	15	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	7.5
			-15	-11.3	-11.3	-11.3	-11.3	-11.3	-11.3	-11.3	
	3	7	20	15	15	15	15	15	15	15	10
			-20	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	
3	4	4	40	30	30	30					20
			-40	-30	-30	-30					
	5	4	60	45	45	45					30
			-60	-45	-45	-45					
4	6	3	80	60	60						40
			-80	-60	-60						
	7	3	140	105	105						70
			-140	-105	-105						
	8	3	200	150	150						100
			-200	-150	-150						
	9	3	300	225	225						200
			-300	-225	-225						
	10	3	400	300	300						330
			-400	-300	-300						

Delta (mm) 200

Alfa  $\leq$  0.5 0.5

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 3.10. Patrón de Desplazamiento Cíclico –  $\Delta = 200\text{mm}$**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

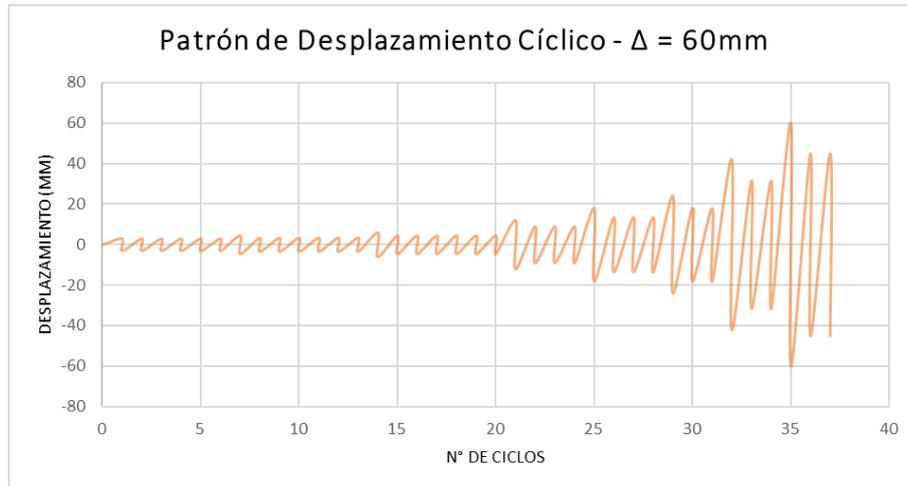
Al concluir el primer ensayo se determinó el desplazamiento máximo verdadero al que llega la estructura hasta el momento de su falla, modificándose el valor de  $\Delta$  a 60mm.

**Tabla 3.8. Protocolo de Carga para  $\Delta = 60\text{ mm}$**

Patrón	Paso	Número mínimo de ciclos	Desplazamiento Objetivo (mm)								Amplitud del ciclo primario (% $\Delta$ )
			$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	$\Delta (+)$	
1	1	6	3	3	3	3	3	3	3		5
			-3	-3	-3	-3	-3	-3			
2	2	7	4.5	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	7.5
			-4.5	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38		
	3	7	6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	10
			-6	-4.5	-4.5	-4.5	-4.5	-4.5	-4.5		
3	4	4	12	9	9	9				20	
			-12	-9	-9	-9					
	5	4	18	13.5	13.5	13.5				30	
-18			-13.5	-13.5	-13.5						
4	6	3	24	18	18					40	
			-24	-18	-18						
	7	3	42	31.5	31.5					70	
			-42	-31.5	-31.5						
	8	3	60	45	45					100	
			-60	-45	-45						
	9	3								$100 + 100\alpha$	
	10	3								$100 + 100\alpha$	

Delta (mm) 60  
Alfa  $\leq 0.5$  0.5

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 3.11. Patrón de Desplazamiento Cíclico –  $\Delta = 60\text{mm}$** 

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

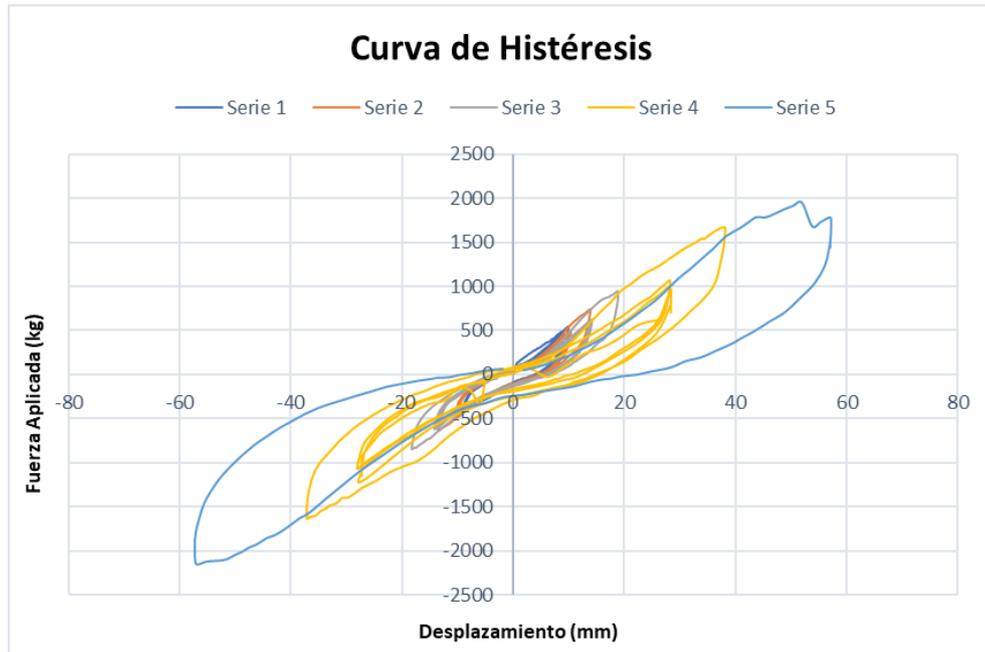
### 3.4. PROCESAMIENTO DE DATOS

Al finalizar los ensayos se obtuvo una base de datos con valores de fuerzas y deformaciones que permiten calcular y analizar ciertos indicadores, con el propósito de determinar el comportamiento de la estructura ante una carga lateral.

#### 3.4.1. CURVA DE HISTÉRESIS

Es una gráfica que representa la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento originado por ésta, tanto en empuje como en retroceso, de acuerdo con los ciclos de carga establecidos previamente en el protocolo de carga.

**Figura 3.12. Curva de Histéresis**

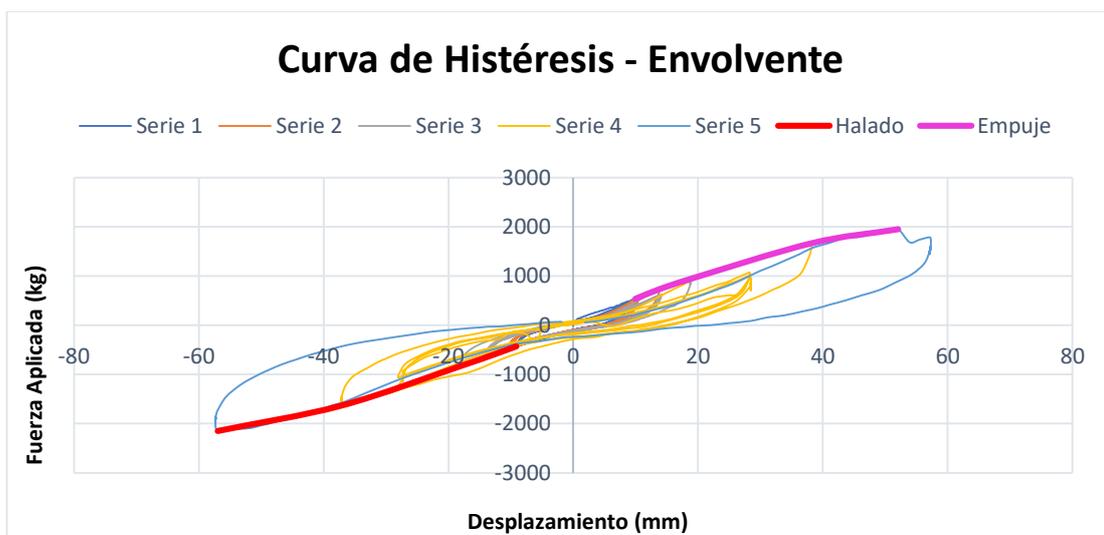


**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

### 3.4.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

Se genera a partir de los puntos máximos y mínimos de la carga en los ciclos con mayores amplitudes, originando un segmento curvilíneo positivo y otro negativo.

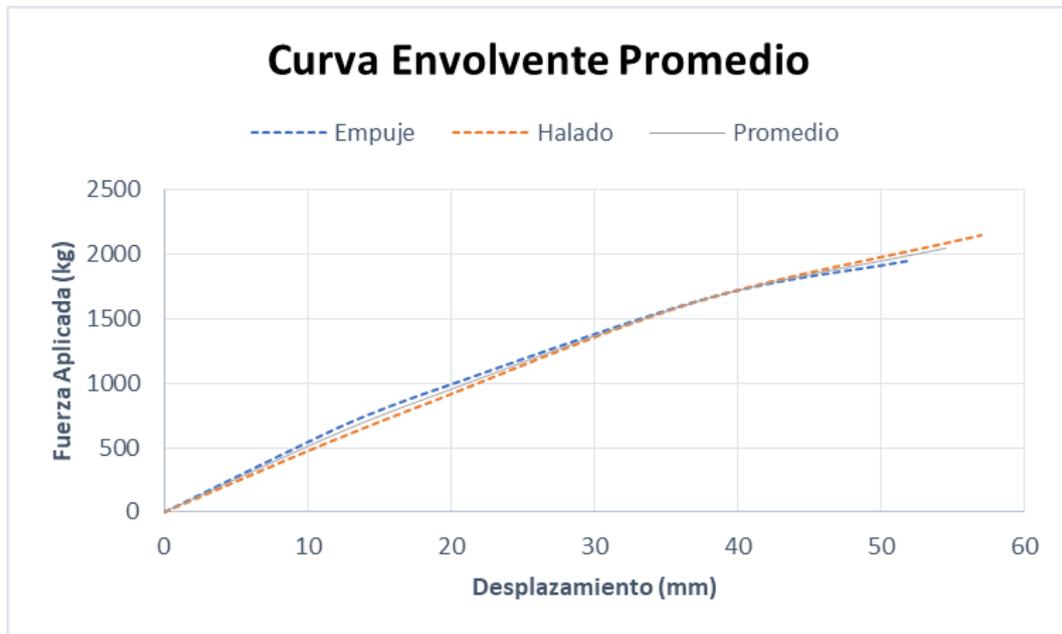
**Figura 3.13. Envoltente de la Curva de Histéresis**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Para entender de una mejor manera el comportamiento del prototipo ensayado, se utiliza el promedio del valor absoluto de estos dos segmentos.

**Figura 3.14. Curva Envolvente Promedio**

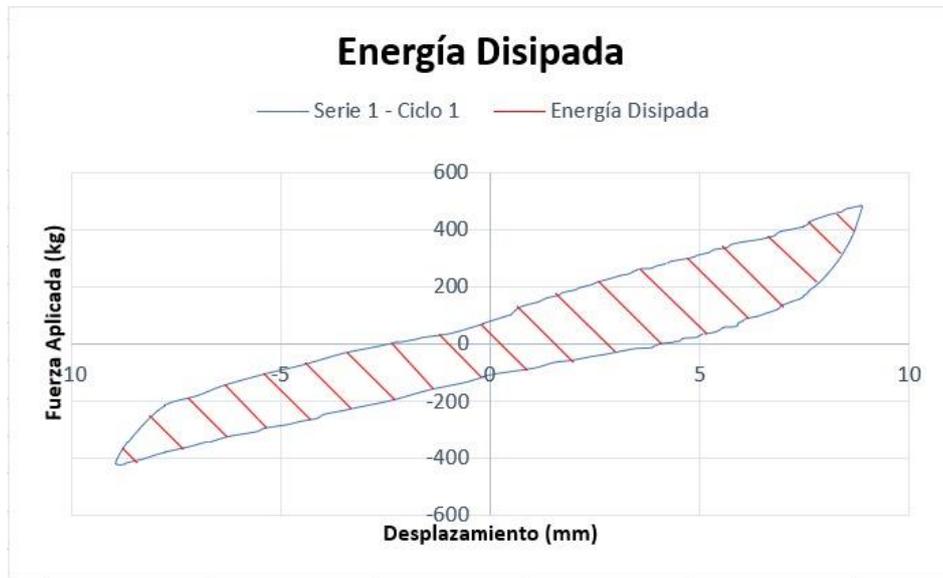


**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

### 3.4.3. ENERGÍA DISIPADA

En el presente estudio, este parámetro se define como la energía liberada en el proceso de deformación, a consecuencia de la aplicación de la carga lateral. Es un indicador importante del daño estructural, representado gráficamente como el área encerrada por la curva correspondiente a un ciclo histerético, como se muestra en la Figura 3.15.

**Figura 3.15. Energía Disipada**

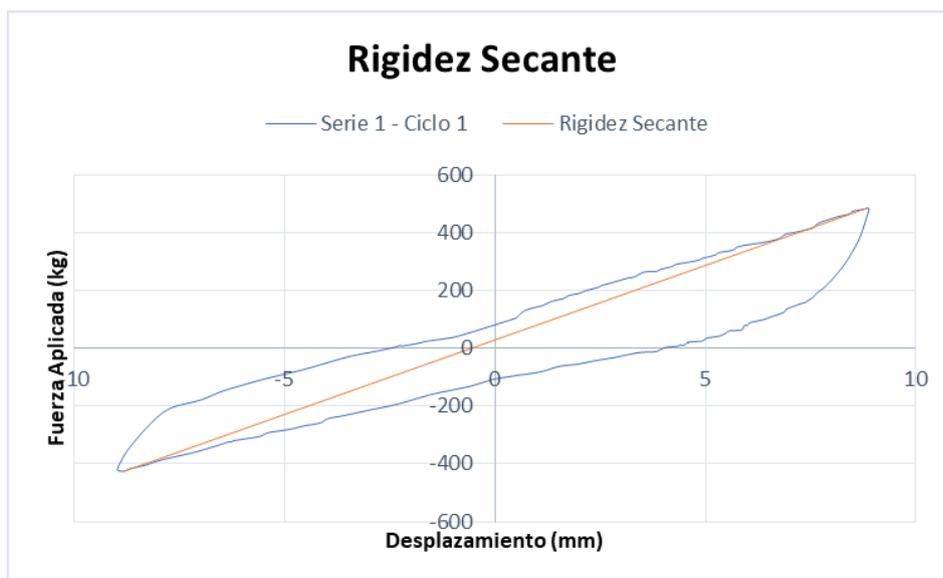


**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 3.4.4. RIGIDEZ SECANTE

Está asociada con la resistencia a la deformación que posee la estructura, determinada por la pendiente de la línea que va desde el punto máximo al mínimo de la gráfica correspondiente al mayor ciclo histerético en cada serie.

**Figura 3.16. Rigidez Secante**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

### 3.4.5. DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ

Describe la variación de la rigidez entre dos ciclos consecutivos, considerando que ésta disminuye conforme aumente la fuerza aplicada y en consecuencia su deformación.

### 3.4.6. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE

Es una alternativa para valorar la energía disipada de la estructura al aplicarle cargas externas.

Se calcula con la siguiente ecuación (Chopra, 2014):

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{So}}$$

Donde:

$\zeta_{eq}$  = Amortiguamiento viscoso equivalente

$E_D$  = Energía disipada

$E_{So}$  = Energía de deformación

La energía de deformación  $E_{So}$  se determina a partir de la siguiente ecuación (Chopra, 2014):

$$E_{So} = \frac{k u_o^2}{2}$$

Donde:

$k$  = Rigidez secante

$u_o$  = Desplazamiento máximo

### 3.4.7. DUCTILIDAD

Es la capacidad propia de los materiales que conforman la estructura, que le permite su deformación ante la acción de una fuerza, sin deteriorar su resistencia.

El factor de ductilidad se establece mediante la ecuación (Chopra, 2014):

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y}$$

Donde:

$\mu$  = Ductilidad

$\Delta_m$  = Deformación máxima

$\Delta_y$  = Deformación de fluencia

Es una relación adimensional. En el caso de que un sistema se encuentre deformado en el rango inelástico, por definición, la deformación máxima excede a la deformación de fluencia y el resultado es mayor que la unidad (Chopra, 2014).

Para que sea factible el uso de la ecuación de ductilidad es necesario que se cumpla la condición planteada en la norma ASTM E2126-19, esto es que, la rigidez secante obtenida al 0.4 de la carga pico debe ser mayor a la obtenida en la carga pico.

La deformación de fluencia  $\Delta_y$  se la consigue a partir del cálculo de la carga de fluencia, utilizando la siguiente ecuación (ASTM E2126-19, 2019):

$$P_y = \left( \Delta_m - \sqrt{\Delta_m^2 - \frac{2A}{K_e}} \right) K_e$$

$$K_e = \frac{0.4P_{pico}}{\Delta_e}$$

Si  $\Delta_m^2 < \frac{2A}{K_e}$ , se puede admitir un valor de  $P_y = 0.85P_{pico}$

Donde:

$P_y$  = Carga de fluencia

$A$  = Área bajo la curva envolvente desde cero hasta el desplazamiento último

$K_e$  = Rigidez al corte elástico

$\Delta_e$  = Desplazamiento al corte elástico, es decir, en  $0.4P_{pico}$

### 3.4.8. FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA SÍSMICA (R)

Este factor admite una disminución de las fuerzas sísmicas consideradas en el diseño, siempre y cuando las conexiones de la estructura sean diseñadas para presentar una falla previsible y con adecuada ductilidad, con lo que el daño se concentra en secciones previstas para funcionar como rótulas plásticas (NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-2, 2015).

Entre los requisitos para un diseño sismo resistente en construcciones con pórticos y diagonales de caña guadúa *Angustifolia Kunth*, se establece un factor de reducción de resistencia sísmica igual a 2 y una restricción a 2 pisos (NEC-SE-GUADÚA, 2016).

### 3.4.9. ANÁLISIS DE FUERZAS Y DERIVAS

Esta sección es fundamental para comprobar que el modelo probado cumple con los requisitos mínimos especificados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción, referentes a la filosofía de diseño sismo resistente, los cuales establecen que la estructura debe:

- Ser capaz de resistir las fuerzas especificadas por esta norma.
- Desarrollar las derivas de piso, ocasionadas por la aplicación de las fuerzas, con valores inferiores a las admisibles.
- Disipar energía de deformación inelástica (NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-1, 2015).

Para cumplir con los requisitos que establece la NEC se ha definido los parámetros mostrados en la Tabla 3.9., considerando la ubicación de implantación de este modelo estructural en la ciudad de Quito, con un suelo de cimentación tipo D.

**Tabla 3.9. Análisis de Fuerza Sísmica**

<b>Cuantificación de Carga Sísmica</b>	
Zona sísmica	V
Factor z	0.4
Caracterización de peligro sísmico	MUY ALTA
<b>Geología Local</b>	
Tipos de perfil de suelo para el diseño sísmico	D
<b>Coefficientes de Perfil de Suelo</b>	
Coef. De ampliación de suelo, Fa	1.2
Desplazamiento para diseño en roca, Fd	1.19
Comportamiento no lineal de suelos, Fs	1.28
<b>Componente Horizontal de Carga Sísmica</b>	
<i>Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones y desplazamiento, Sa Sd</i>	
Factor r	1
Relación de amplificación espectral $\eta$	2.48

<b>Periodos Límites de Vibración</b>	
Tc (seg)	0.70
TL (seg)	2.86
To (seg)	0.13
Sa (g)	1.19

<b>Análisis Espectral (Método Estático)</b>	
Período de vibración, Ta	0.11
Altura máxima, hn	1.8
Coef. Que depende del tipo de edificio, Ct	0.073
$\alpha$	0.75

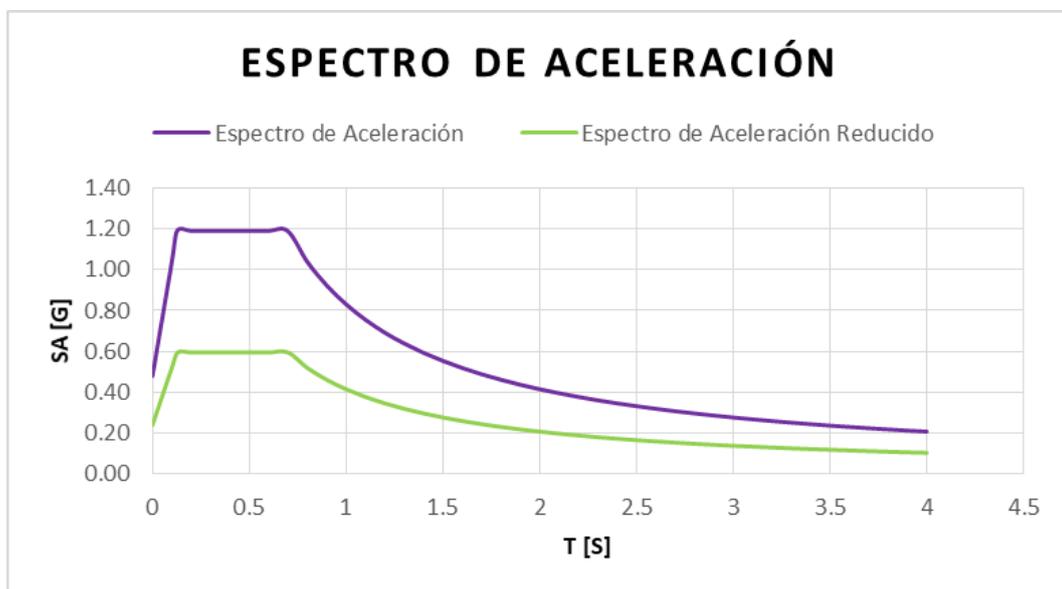
<b>Coefficientes Estructurales</b>	
Coeficiente de regularidad en planta	
$\phi_{PA}$	1
$\phi_{PB}$	1
$\phi_P$	1
Coeficiente de regularidad en elevación	
$\phi_{EA}$	1
$\phi_{EB}$	1
$\phi_E$	1

W=D	2009.00
Coef. De importancia, I	1
Factor de reducción de resistencia sísmica, R	2
Corte basal de diseño, V	1195.76
Coef. Relacionado con el período de vibración, k	0.81

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Con los valores obtenidos en el análisis de fuerza sísmica, se generó el siguiente espectro de aceleración:

**Figura 3.17. Espectro de Aceleración**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Para un período de vibración ( $T_a$ ) de 0.11 [s] se tiene una aceleración de 1.19 [g], evidenciada en la Figura 3.17., teniendo en cuenta estos valores se calcula el cortante basal de diseño, con la siguiente ecuación (NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-2, 2015):

$$V_B = \frac{I S a_{(T_a)}}{R \phi_P \phi_E} W$$

Donde:

$V_B$  = Cortante basal de diseño

$I$  = Coeficiente de importancia

$Sa_{(T_a)}$  = Espectro de diseño en aceleración

$R$  = Factor de reducción de resistencia sísmica

$\phi_P \phi_E$  = Coeficientes de configuración en planta o elevación

$W$  = Carga sísmica reactiva

$T_a$  = Período de vibración

$$V_B = \frac{1 * 1.19}{2 * 1 * 1} * 2009 [kg]$$

$$V_B = 1195.76 [kg]$$

El control de derivas se realiza mediante la estimación de las derivas inelásticas máximas de piso, siguiendo los criterios descritos en la NEC-SE-DS Peligro Sísmico parte 2:

$$\Delta_M = 0.75R\Delta_E$$

Donde:

$\Delta_M$  = Deriva máxima inelástica

$R$  = Factor de reducción de resistencia sísmica

$\Delta_E$  = Desplazamiento obtenido en la aplicación de carga lateral

El límite permisible para la deriva máxima de piso registrado en la NEC se puede observar en la siguiente figura:

**Figura 3.18. Valores de deriva máxima, expresados como fracción de la altura de piso**

Estructuras de:	$\Delta_M$ máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

Fuente: (NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-1, 2015)

El análisis de las derivas de piso no es imprescindible si se comprueba el criterio para acciones sísmicas de diseño, esto es que la resistencia lateral de la estructura ( $V_{MR}$ ), debe ser mayor o igual al cortante basal de diseño ( $V_B$ ) (NEC-SE-VIVIENDA-parte-1, 2015).

$$V_B \leq V_{MR}$$

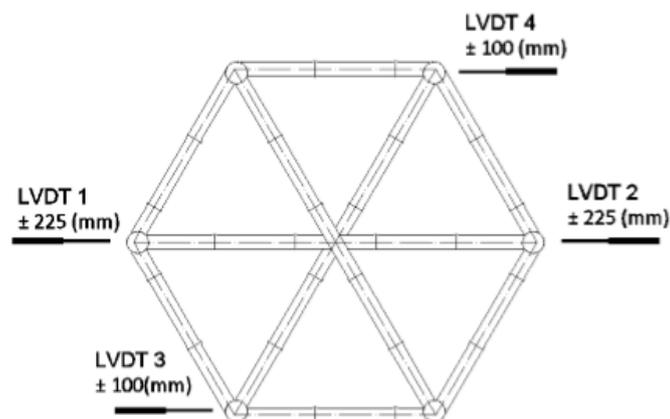
## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se detalla los resultados obtenidos en los ensayos de carga lateral cuasi-estática con inversión realizados en cuatro prototipos de los cinco planificados, ya que uno de ellos se empleó para procesos de calibración, rangos de carga y desplazamiento, así como el ajuste de procedimientos de medición.

Los datos de deformación fueron almacenados en el ordenador a partir de cuatro sensores de desplazamiento (LVDT), los cuales fueron promediados dependiendo su ubicación en la estructura, para facilitar la interpretación de los mismos. El promedio del LVDT 1 y LVDT 2, se nombrará como LVDT A y el promedio del LVDT 3 y LVDT 4, se nombrará como LVDT B.

**Figura 4.1. Disposición en Planta de Dispositivos LVDT**



**Fuente:** (Herrera Vaca & Viteri Aguirre, 2017)

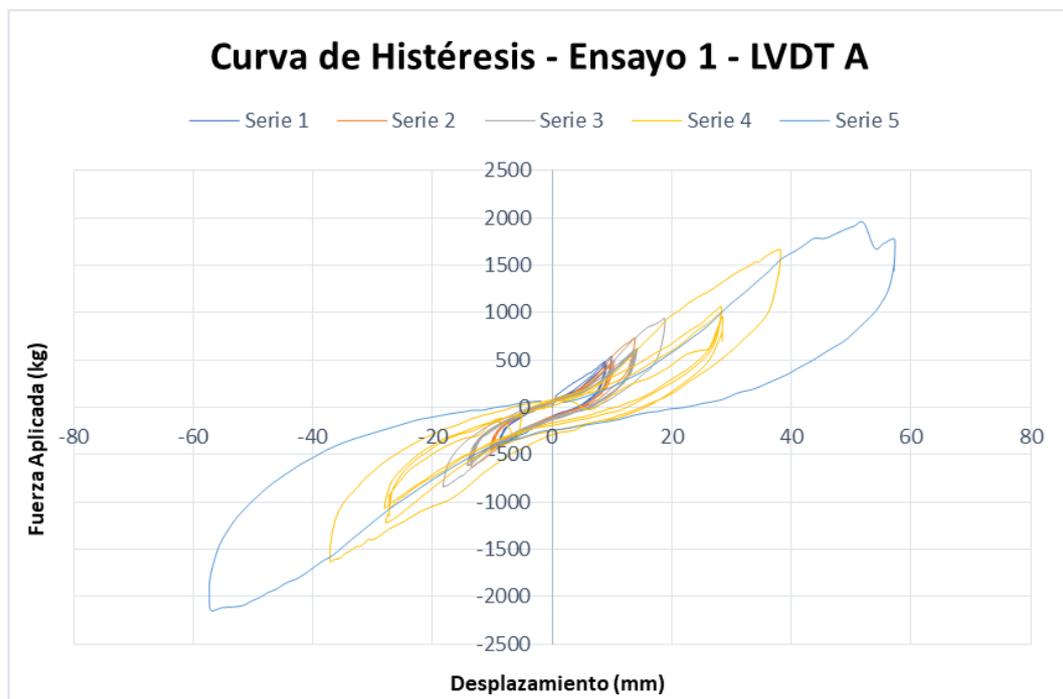
Para el protocolo de carga en el primer ensayo se utilizó una deformación máxima esperada de 200 mm, basada en los resultados del Proyecto de Titulación de Herrera y Viteri y considerando la implementación de mampostería. A partir del segundo ensayo se modificó esta deformación a 60 mm, justificada por los datos generados en el primer ensayo.

Considerando lo extenso del análisis de los resultados, se ve adecuado presentar aquí lo referente al LVDT A con sus respectivas descripciones, no obstante, lo relacionado con el LVDT B se detallará en el Anexo 2.

## 4.1. ENSAYO 1

### 4.1.1. CURVA DE HISTÉRESIS

Figura 4.2. Curva de Histéresis - Ensayo 1 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.2. se observa que la curva histerética es simétrica, por lo tanto, se puede deducir que la estructura tiene un comportamiento relativamente estable. Los ciclos histeréticos son estrechos, mostrando un indicio claro de una baja capacidad de disipación de energía de la estructura, atribuible a la presencia de los muros de mampostería.

#### 4.1.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

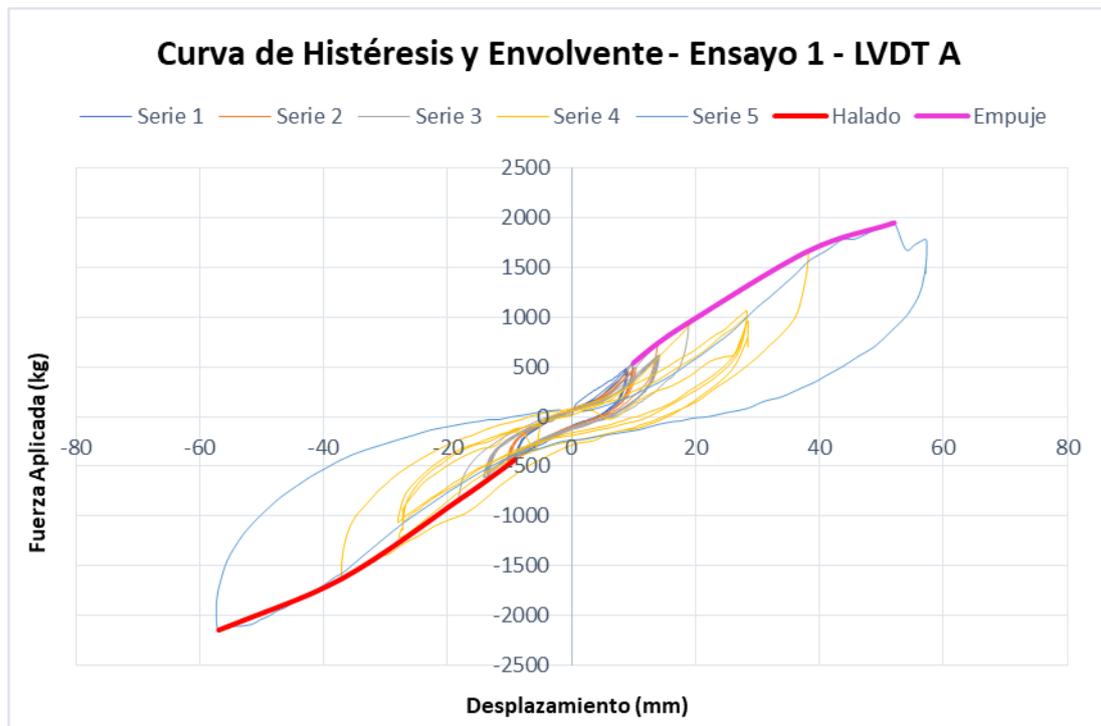
En la Tabla 4.1. se definen los puntos máximos y mínimos de cada serie, necesarios para representar gráficamente la envolvente de la curva de histéresis.

**Tabla 4.1. Puntos Envolvente - Ensayo 1 - LVDT A**

PUNTOS ENVOLVENTE - ENSAYO 1 - LVDT A				
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)	
	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)
Serie 1 - Ciclo 2	538.84	9.93	-432.45	-9.11
Serie 2 - Ciclo 1	734.37	13.79	-630.48	-13.43
Serie 3 - Ciclo 1	941.87	18.75	-840.38	-18.25
Serie 4 - Ciclo 1	1666.10	38.16	-1632.30	-37.11
Serie 5 - Ciclo 1	1950.84	52.05	-2148.72	-56.97

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.3. Curva de Histéresis y Envolvente - Ensayo 1 - LVDT A**



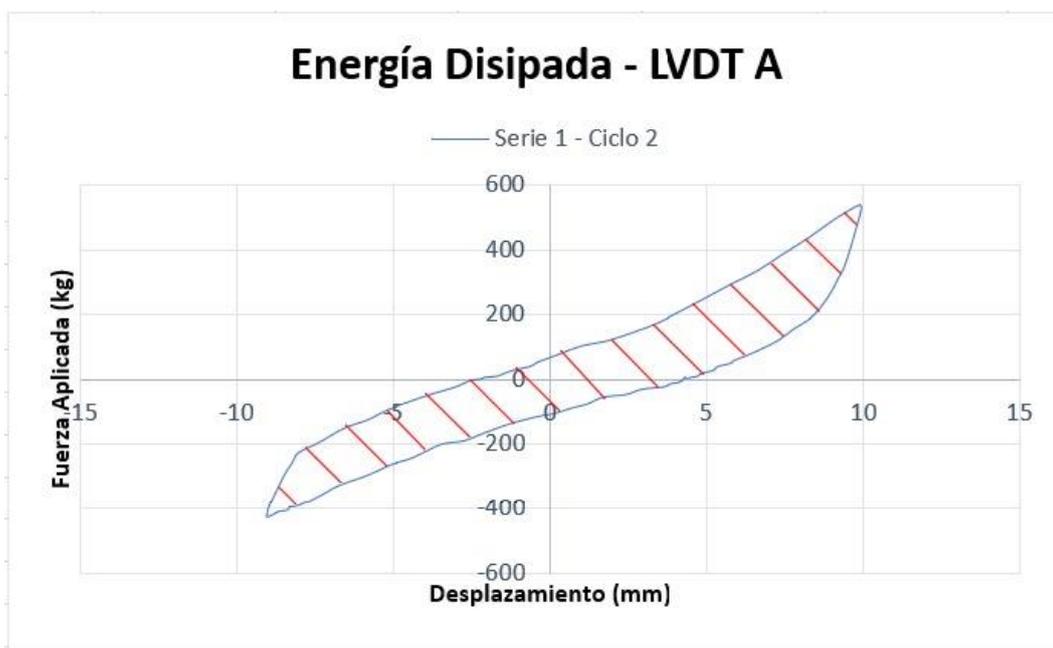
Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

La carga máxima en empuje fue de 1950.84 [kg] con una deformación de 52.05 [mm] y la carga máxima de halado fue de -2148.72 [kg] con una deformación de -56.97 [mm].

#### 4.1.3. ENERGÍA DISIPADA

En la Figura 4.4. se observa la energía disipada en el mayor ciclo de la primera serie, la misma que se representa como el área encerrada por la curva de un ciclo histerético.

Figura 4.4. Energía Disipada - Ensayo 1 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.2. se muestra la energía disipada del mayor ciclo de cada serie, la energía disipada acumulada por serie y la energía disipada total de la estructura en el Ensayo N°1, que fue de 2.6011 [kJ].

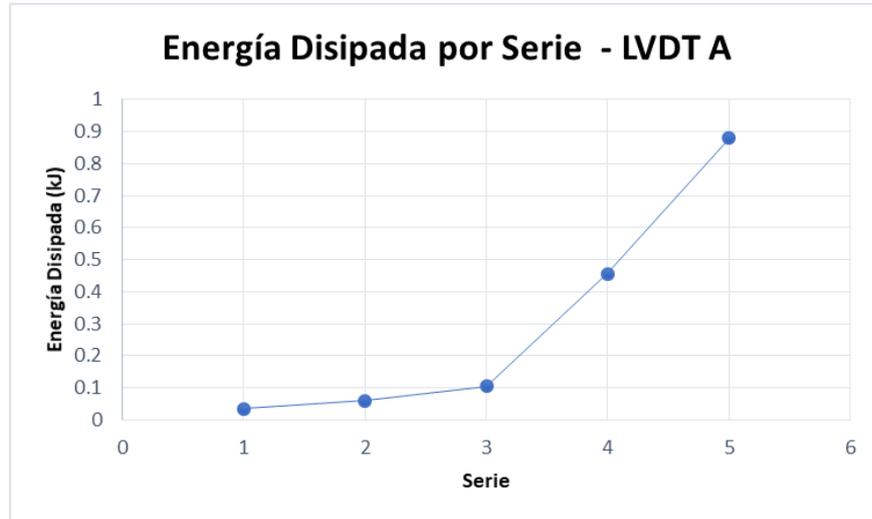
Tabla 4.2. Energía Disipada - Ensayo 1 - LVDT A

ENERGÍA DISIPADA - ENSAYO 1 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		ENERGÍA DISIPADA (kJ)	ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA (kJ)
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)		
Serie 1 - Ciclo 2	5.28	9.93	-4.24	-9.11	0.0346	0.1838
Serie 2 - Ciclo 1	7.20	13.79	-6.18	-13.43	0.0600	0.2496
Serie 3 - Ciclo 1	9.23	18.75	-8.24	-18.25	0.1051	0.3920
Serie 4 - Ciclo 1	16.33	38.16	-16.00	-37.11	0.4558	0.8964
Serie 5 - Ciclo 1	19.12	52.05	-21.06	-56.97	0.8793	0.8793
					<b>TOTAL</b>	<b>2.6011</b>

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.5. se aprecia la variación de energía disipada entre cada serie, que se va incrementando en función del aumento de carga y deformación.

**Figura 4.5. Energía Disipada por Serie - Ensayo 1 - LVDT A**

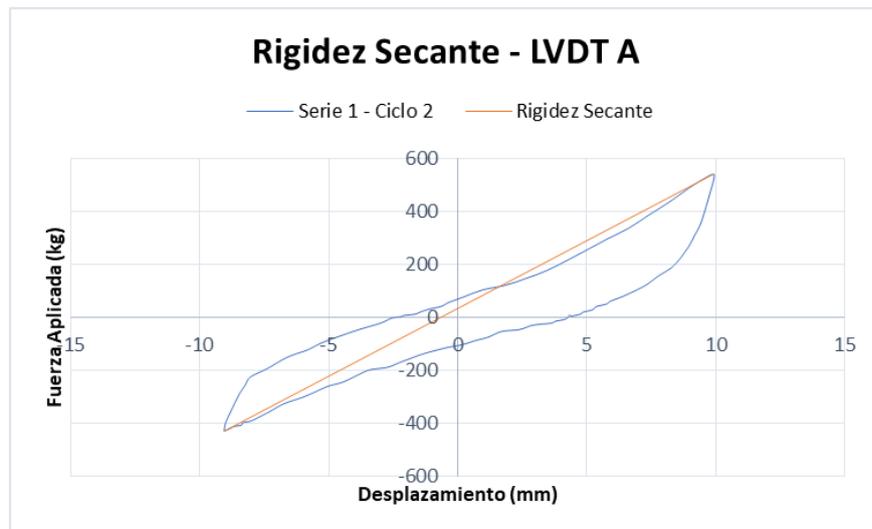


**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.1.4. RIGIDEZ SECANTE

En la Figura 4.6. se expone la representación gráfica de la rigidez secante en un ciclo histerético, definida como la pendiente de la recta que une los puntos máximos y mínimos de la curva del mayor ciclo de cada serie.

**Figura 4.6. Rigidez Secante - Ensayo 1 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.3. se detalla los valores de rigidez secante del mayor ciclo de cada serie y el porcentaje de degradación entre dos consecutivos.

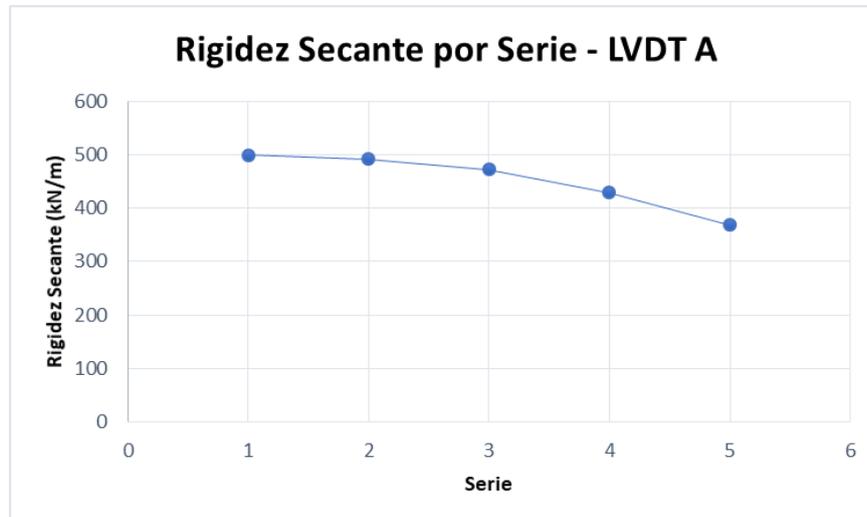
**Tabla 4.3. Rigidez Secante - Ensayo 1 - LVDT A**

RIGIDEZ SECANTE - ENSAYO 1 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		RIGIDEZ SECANTE	
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)	Ks (kN/m)	% degradación
Serie 1 - Ciclo 2	5.28	9.93	-4.24	-9.11	499.3024	
Serie 2 - Ciclo 1	7.20	13.79	-6.18	-13.43	491.4140	1.58%
Serie 3 - Ciclo 1	9.23	18.75	-8.24	-18.25	472.1338	3.92%
Serie 4 - Ciclo 1	16.33	38.16	-16.00	-37.11	429.4699	9.04%
Serie 5 - Ciclo 1	19.12	52.05	-21.06	-56.97	368.5229	14.19%

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

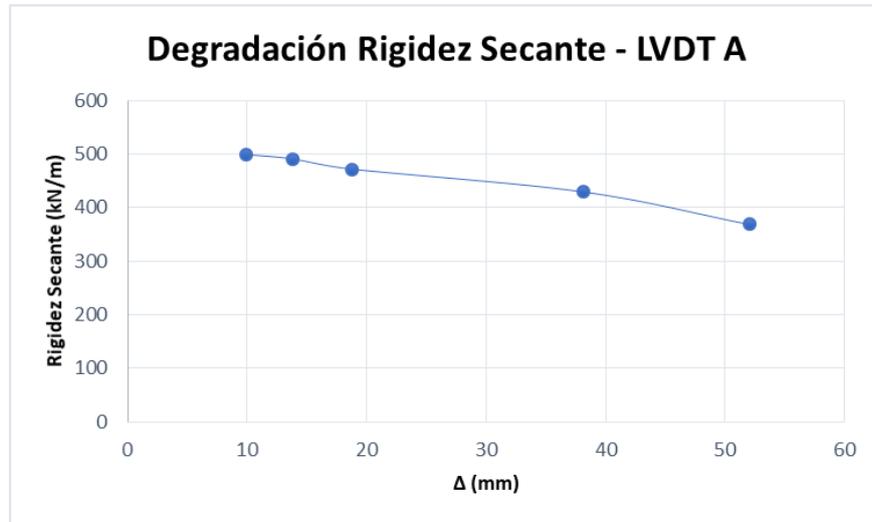
En las Figuras 4.7. y 4.8. se indica el descenso de rigidez secante que ocurre durante el ensayo al presentarse mayores desplazamientos, conforme avanzan las series.

**Figura 4.7. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 1 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.8. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 1 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.1.5. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

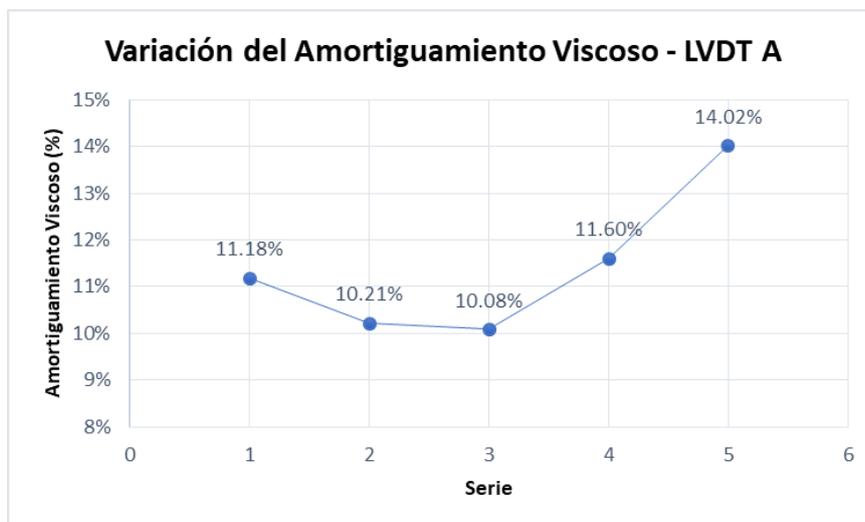
En la Tabla 4.4. se refleja los diversos amortiguamientos viscosos equivalentes producidos en el Ensayo N°1, dependiendo el número de series. El promedio de amortiguamiento viscoso obtenido en el Ensayo N°1 es de 11.42%. En la Figura 4.9. se grafica los resultados plasmados en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 1 - LVDT A**

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO - ENSAYO 1 - LVDT A					
N° CICLO	Ks (kN/m)	Δmáx (mm)	ESo(kJ)	ED (kJ)	ζ eq
Serie 1 - Ciclo 2	499.3024	9.93	0.0246	0.0346	11.18%
Serie 2 - Ciclo 1	491.4140	13.79	0.0467	0.0600	10.21%
Serie 3 - Ciclo 1	472.1338	18.75	0.0830	0.1051	10.08%
Serie 4 - Ciclo 1	429.4699	38.16	0.3126	0.4558	11.60%
Serie 5 - Ciclo 1	368.5229	52.05	0.4992	0.8793	14.02%
				<b>PROMEDIO</b>	<b>11.42%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.9. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 1 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.1.6. DUCTILIDAD

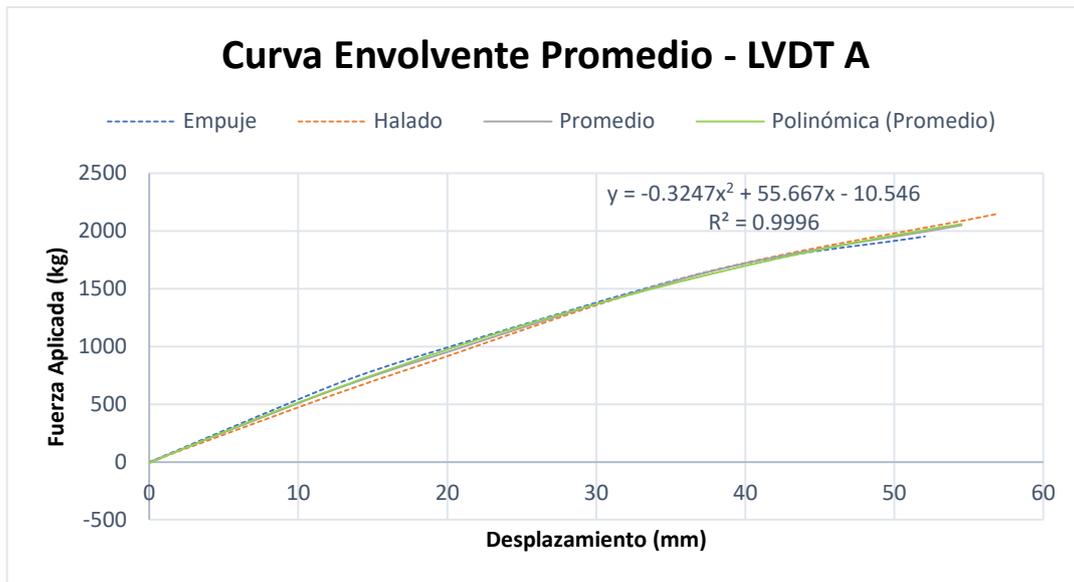
Para determinar la ductilidad que presenta la estructura, es necesario realizar un promedio entre los valores de fuerza y deformación en empuje y halado, estos resultados se muestran en la Tabla 4.5. y su representación gráfica en la Figura 4.10.

**Tabla 4.5. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 1 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A		
N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)
Serie 1 - Ciclo 2	485.6466	9.5216
Serie 2 - Ciclo 1	682.4254	13.6092
Serie 3 - Ciclo 1	891.1232	18.4969
Serie 4 - Ciclo 1	1649.2007	37.6328
Serie 5 - Ciclo 1	2049.7816	54.5091

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.10. Envoltente Promedio - Ensayo 1 - LVDT A



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

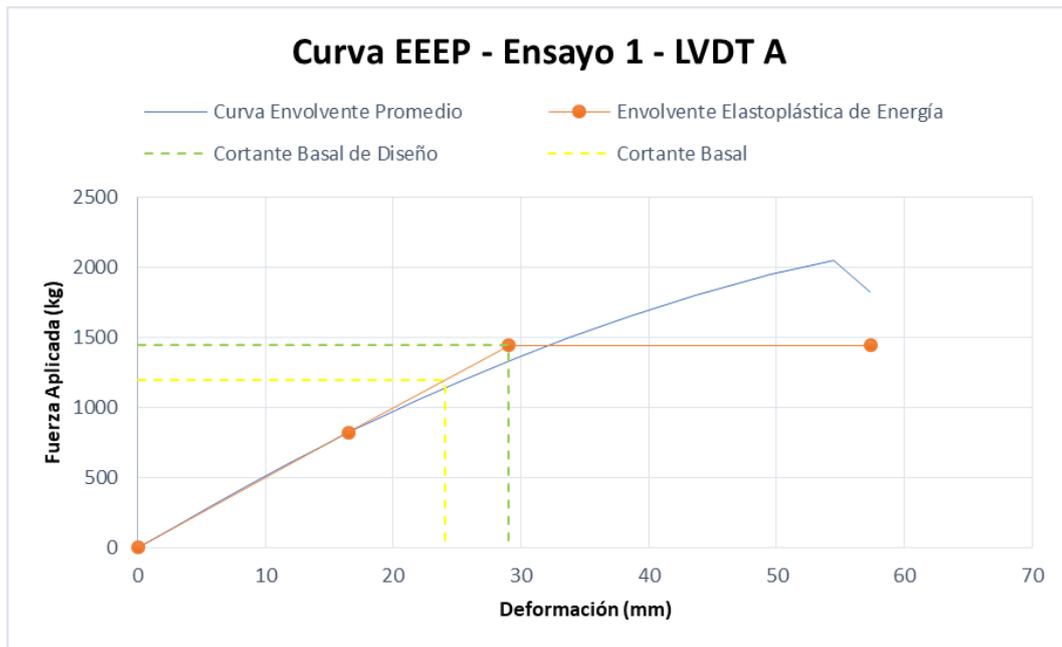
En base a la Norma ASTM E2126-19, es indispensable determinar diversos parámetros que permitan generar la gráfica Envoltente Elasto-Plástica de Energía (EEEP).

Tabla 4.6. Datos Curva EEEP - Ensayo 1 - LVDT A

DATOS CURVA EEEP - ENSAYO 1 - LVDT A			
$\Delta p_{\text{ico}}$ (mm)	54.51	$P_{\text{pico}}$ (kg)	2049.78
$\Delta e$ (mm)	16.51	$P_e$ (kg)	819.91
$\Delta m$ (mm)	57.32	$P_m$ (kg)	1820.42
$\Delta y$ (mm)	29.05	$P_y$ (kg)	1442.78
$k_e$ (kN/m)	49.67	$A$ (kg·mm)	61751.00

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.11. Curva EEEP - Ensayo 1 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Con los datos definidos anteriormente, se obtuvo las variables detalladas en la Norma ASTM E2126-19 con el fin de verificar el correcto desempeño de la estructura:

- **Resistencia a cortante:**

$$V_{pico} = \frac{P_{pico}}{L}$$

$$V_{pico} = \frac{2049.78}{3} * \frac{9.8}{1000} = 6.70 \left( \frac{kN}{m} \right)$$

- **Módulo de corte:**

$$G' = \frac{P}{\Delta} * \frac{H}{L}$$

$$G'_{0.4 P_{pico}} = \frac{819.91 * 9.8}{16.51} * \frac{1.8}{3} = 292.35 \left( \frac{kN}{m} \right)$$

$$G'_{P_{pico}} = \frac{2049.78 * 9.8}{54.51} * \frac{1.8}{3} = 221.34 \left( \frac{kN}{m} \right)$$

Para elaborar la Curva Elasto-Plástica de Energía se debe cumplir la siguiente condición:

$$G'_{0.4 P_{pico}} > G'_{P_{pico}}$$

$$292.35 \left( \frac{kN}{m} \right) > 221.34 \left( \frac{kN}{m} \right)$$

Como se puede observar en este ensayo se cumple la condición.

- **Ductilidad de desplazamiento:**

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y}$$

$$\mu = \frac{57.32}{29.05} = 1.97$$

- **Factor de reducción del comportamiento sísmico:**

$$R = \sqrt{2\mu - 1}$$

$$R = \sqrt{(2 * 1.97) - 1} = 1.72$$

El valor obtenido se aproxima a 2, tal como indica la NEC-SE-GUADÚA, de acuerdo al sistema estructural planteado.

- **Índice de estabilidad:**

Este índice es un parámetro para evaluar la estabilidad que presenta la estructura, considerándola estable cuando el índice sea menor o igual a 0.30, caso contrario, deberá ser rigidizada.

$$Q_i = \frac{P * \Delta}{V * h}$$

$$Q_i = \frac{2009 * 57.32}{1195.76 * 1.8 * 1000} = 0.05 \leq 0.30$$

La muestra del ensayo N°1 satisface este requisito, por lo cual se concluye que es una estructura estable.

▪ **Coeficiente de seguridad:**

$$Coef. Seguridad = \frac{P_{pico}}{V_{Basal}}$$

$$Coef. Seguridad = \frac{2049.78}{1195.76} = 1.71$$

Este valor demuestra que la capacidad de la estructura durante el ensayo N°1 es 1.71 veces el valor de diseño.

#### 4.1.7. ANÁLISIS DE DERIVAS

Se comprueba el criterio manifestado anteriormente en el numeral 3.4.9., que establece lo siguiente:

$$V_{Basal} < V_{MR}$$

$$1195.76 < 1442.78$$

A pesar de que esta condición haya sido verificada, se desarrollará el análisis de las derivas con el objetivo de estudiar la influencia de la mampostería en estructuras de caña guadúa.

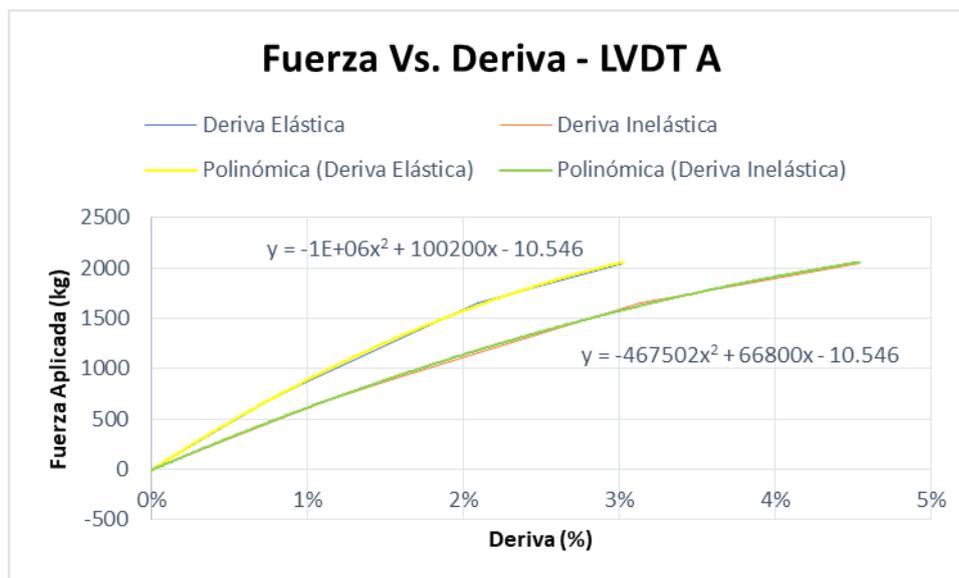
En la Tabla 4.7. se expone los valores de deriva elástica e inelástica para cada serie.

**Tabla 4.7. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 1 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A			DERIVA	DERIVA
N° CICLO	F (kg)	Δ (mm)	ELÁSTICA (%)	INELÁSTICA (%)
Serie 1 - Ciclo 2	485.65	9.52	0.53%	0.79%
Serie 2 - Ciclo 1	682.43	13.61	0.76%	1.13%
Serie 3 - Ciclo 1	891.12	18.50	1.03%	1.54%
Serie 4 - Ciclo 1	1649.20	37.63	2.09%	3.14%
Serie 5 - Ciclo 1	2049.78	54.51	3.03%	4.54%

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.12. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 1 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.8. se puede apreciar los valores referentes al análisis de derivas en base a las recomendaciones establecidas en el capítulo de Diseño Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

**Tabla 4.8. Análisis de Derivas - Ensayo 1 - LVDT A**

ELÁSTICA		INELÁSTICA	
Δ máx (mm)	57.32	Δ máx (mm)	85.98
Deriva	3.18%	Deriva	4.78%
Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado	
<b>Considerando:</b>		<b>Considerando:</b>	
<b>Deriva</b>	<b>2%</b>	<b>Deriva</b>	<b>2%</b>
Δ (mm)	36	Δ (mm)	24
F (kg)	1593.45	F (kg)	1138.45
<b>Considerando:</b>		<b>Considerando:</b>	
<b>V Basal (kg)</b>	<b>1195.76</b>	<b>V Basal (kg)</b>	<b>1195.76</b>
Deriva	1.40%	Deriva	2.12%
Δ (mm)	25.18	Δ (mm)	38.16
Cumple recomendación		Supera el 2% recomendado	

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.1.8. DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B

En las tablas que se muestran a continuación se presentan los resultados obtenidos en los LVDT A y LVDT B, expresando la relación existente entre sus valores. El LVDT A indica los datos generados en el eje de aplicación de carga, siendo un promedio del LVDT 1 y LVDT 2; mientras que, en el LVDT B se muestran los datos producidos en los ejes paralelos al de aplicación de carga, es decir, el promedio entre el LVDT 3 y LVDT 4.

**Tabla 4.9. Relación de Deformaciones - Ensayo 1**

N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)		
		LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 2	485.65	9.52	3.74	39.30%
Serie 2 - Ciclo 1	682.43	13.61	5.58	40.97%
Serie 3 - Ciclo 1	891.12	18.50	7.86	42.47%
Serie 4 - Ciclo 1	1649.20	37.63	17.25	45.83%
Serie 5 - Ciclo 1	2049.78	54.51	25.31	46.42%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>43.00%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Los desplazamientos obtenidos en los ejes diferentes al de aplicación de carga representan en promedio el 43% de los obtenidos en dicho eje.

**Tabla 4.10. Relación de Energía Disipada y Absorbida - Ensayo 1**

N° CICLO	F (kg)	ED (kJ)			ESo(kJ)		
		LVDT A	LVDT B	B/A	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 2	485.65	0.0346	0.0100	28.90%	0.0246	0.0112	45.56%
Serie 2 - Ciclo 1	682.43	0.0600	0.0186	31.00%	0.0467	0.0220	47.04%
Serie 3 - Ciclo 1	891.12	0.1051	0.0348	33.11%	0.0830	0.0408	49.19%
Serie 4 - Ciclo 1	1649.20	0.4558	0.1646	36.11%	0.3126	0.1687	53.97%
Serie 5 - Ciclo 1	2049.78	0.8793	0.3129	35.59%	0.4992	0.2746	55.02%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>32.94%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>50.16%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Las energías disipada y absorbida en los ejes paralelos son alrededor del 32.94% y 50.16% del eje principal, respectivamente.

**Tabla 4.11. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente - Ensayo 1**

N° CICLO	F (kg)	Ks (kN/m)			ζ eq		
		LVDT A	LVDT B	A/B	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 2	485.65	499.30	1263.75	39.51%	11.18%	7.09%	63.43%
Serie 2 - Ciclo 1	682.43	491.41	1199.55	40.97%	10.21%	6.73%	65.90%
Serie 3 - Ciclo 1	891.12	472.13	1111.75	42.47%	10.08%	6.79%	67.31%
Serie 4 - Ciclo 1	1649.20	429.47	937.18	45.83%	11.60%	7.76%	66.92%
Serie 5 - Ciclo 1	2049.78	368.52	793.81	46.42%	14.02%	9.07%	64.68%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>43.04%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>65.65%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Debido a las placas empleadas para la aplicación de carga durante el ensayo y su relación con el desplazamiento generado, la rigidez secante en el eje principal es aproximadamente el 43.04% de la resultante en los ejes laterales. En cuanto al amortiguamiento viscoso equivalente en los ejes paralelos es el 65.65% del eje principal.

**Tabla 4.12. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico - Ensayo 1**

VARIABLE	LVDT A	LVDT B	ERROR
μ	1.97	1.94	1.71%
R	1.72	1.70	1.15%

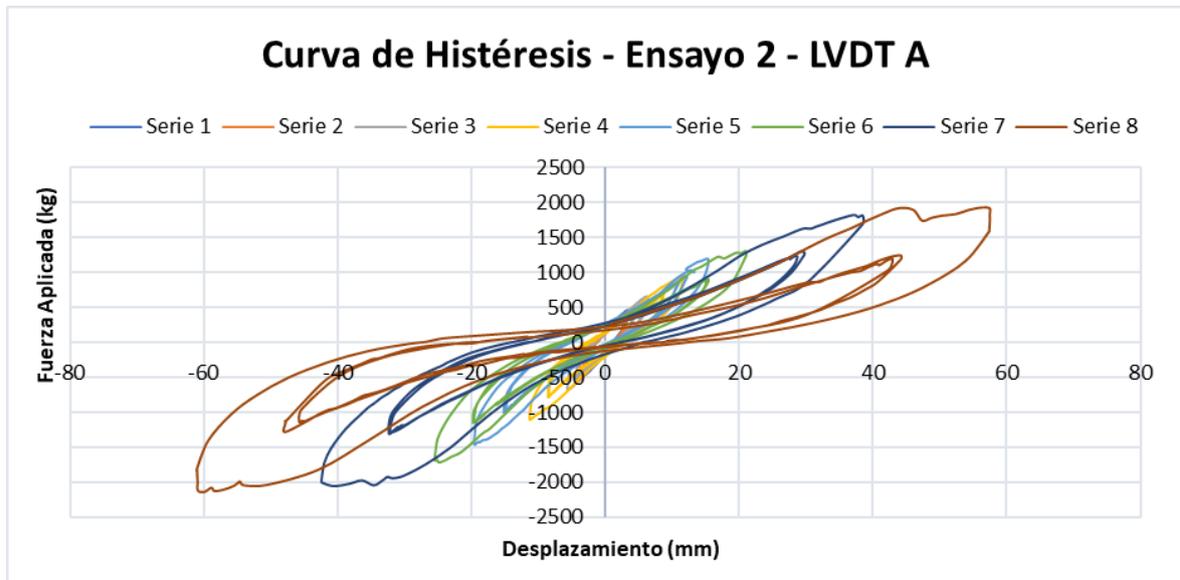
**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

La ductilidad en los diferentes ejes es similar, por lo que el factor R en los dos casos se aproxima a la recomendación de la NEC y el error resultante fue de 1.71% para ductilidad y 1.15% para el factor de reducción de comportamiento sísmico.

## 4.2. ENSAYO 2

### 4.2.1. CURVA DE HISTÉRESIS

Figura 4.13. Curva de Histéresis – Ensayo 2 – LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

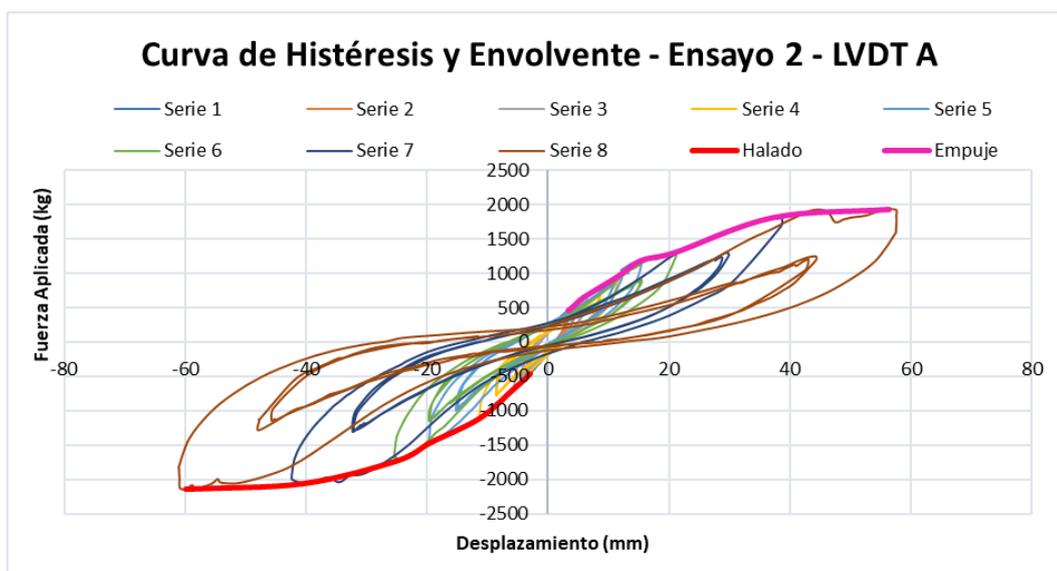
### 4.2.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

Tabla 4.13. Puntos Envolvente – Ensayo 2 – LVDT A

PUNTOS ENVOLVENTE - ENSAYO 2 - LVDT A				
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)	
	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)
Serie 1 - Ciclo 5	459.28	3.37	-454.52	-2.90
Serie 2 - Ciclo 1	526.88	4.32	-567.96	-4.25
Serie 3 - Ciclo 1	652.43	5.94	-676.59	-5.64
Serie 4 - Ciclo 1	956.75	11.54	-1106.49	-11.31
Serie 5 - Ciclo 1	1190.73	15.38	-1461.25	-19.46
Serie 6 - Ciclo 1	1306.64	20.98	-1719.64	-24.85
Serie 7 - Ciclo 1	1818.62	37.20	-2055.31	-40.51
Serie 8 - Ciclo 1	1936.73	56.34	-2137.16	-59.90

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.14. Curva de Histéresis y Envolvente – Ensayo 2 – LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

La carga máxima en empuje fue de 1936.73 [kg] con una deformación de 56.34 [mm] y la carga máxima de halado fue de -2137.16 [kg] con una deformación de -59.90 [mm].

#### 4.2.3. ENERGÍA DISIPADA

En la Tabla 4.14. se muestra la energía disipada del mayor ciclo de cada serie, la energía disipada acumulada por serie y la energía disipada total de la estructura en el Ensayo N°2, que fue de 4.0242 [kJ].

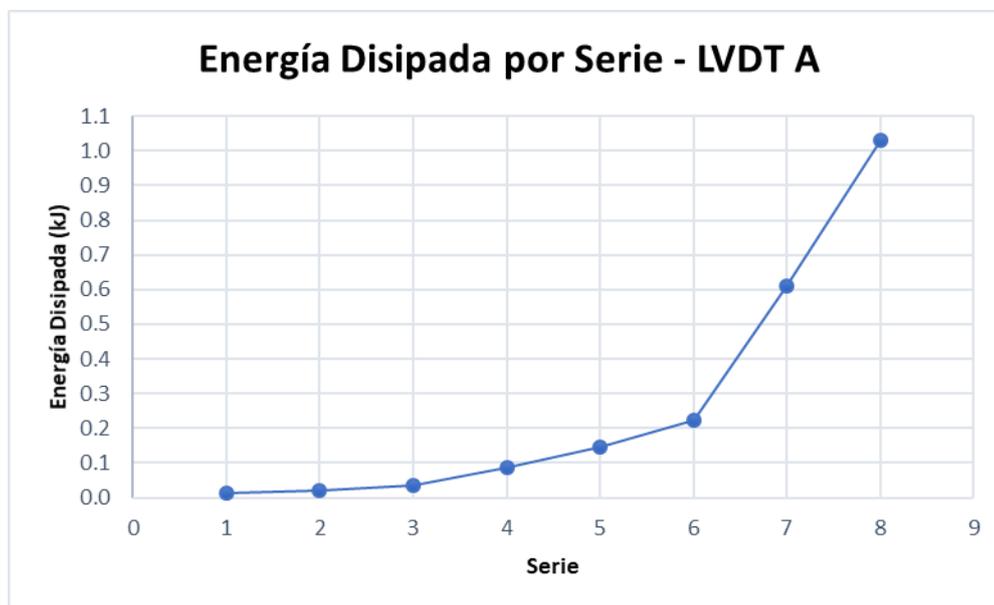
**Tabla 4.14. Energía Disipada - Ensayo 2 - LVDT A**

ENERGÍA DISIPADA - ENSAYO 2 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		ENERGÍA DISIPADA (kJ)	ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA (kJ)
	F (kN)	Δ (mm)	F (kN)	Δ (mm)		
Serie 1 - Ciclo 5	4.51	3.37	-4.46	-2.90	0.0145	0.0868
Serie 2 - Ciclo 1	5.17	4.32	-5.57	-4.25	0.0221	0.1082
Serie 3 - Ciclo 1	6.40	5.94	-6.64	-5.64	0.0343	0.1531
Serie 4 - Ciclo 1	9.39	11.54	-10.85	-11.31	0.0880	0.2221
Serie 5 - Ciclo 1	11.68	15.38	-14.33	-19.46	0.1476	0.3619
Serie 6 - Ciclo 1	12.82	20.98	-16.87	-24.85	0.2239	0.4183
Serie 7 - Ciclo 1	17.84	37.20	-20.16	-40.51	0.6090	1.0396
Serie 8 - Ciclo 1	19.00	56.34	-20.97	-59.90	1.0317	1.6342
					<b>TOTAL</b>	<b>4.0242</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.15. se aprecia la variación de energía disipada entre cada serie, que se va incrementando en función del aumento de carga y deformación.

**Figura 4.15. Energía Disipada por Serie - Ensayo 2 - LVDT A**



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.2.4. RIGIDEZ SECANTE

En la Tabla 4.15. se observa los valores correspondientes a la rigidez secante del mayor ciclo de cada serie, y la degradación de la misma, entre dos series consecutivas.

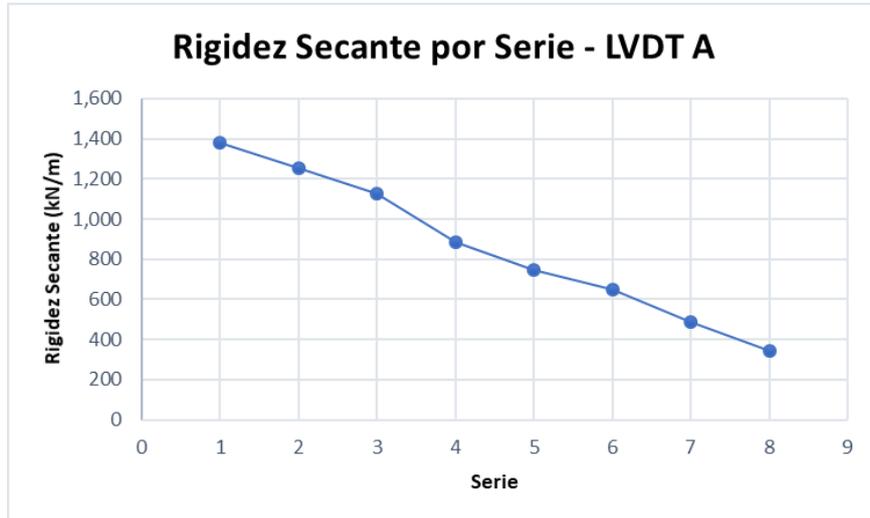
**Tabla 4.15. Rigidez Secante - Ensayo 2 - LVDT A**

RIGIDEZ SECANTE - ENSAYO 2 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		RIGIDEZ SECANTE	
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)	Ks (KN/m)	% degradación
Serie 1 - Ciclo 5	4.51	3.37	-4.46	-2.90	1379.34	
Serie 2 - Ciclo 1	5.17	4.32	-5.57	-4.25	1253.77	9.10%
Serie 3 - Ciclo 1	6.40	5.94	-6.64	-5.64	1125.19	10.26%
Serie 4 - Ciclo 1	9.39	11.54	-10.85	-11.31	885.91	21.27%
Serie 5 - Ciclo 1	11.68	15.38	-14.33	-19.46	746.75	15.71%
Serie 6 - Ciclo 1	12.82	20.98	-16.87	-24.85	647.80	13.25%
Serie 7 - Ciclo 1	17.84	37.20	-20.16	-40.51	489.00	24.51%
Serie 8 - Ciclo 1	19.00	56.34	-20.97	-59.90	343.80	29.69%

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

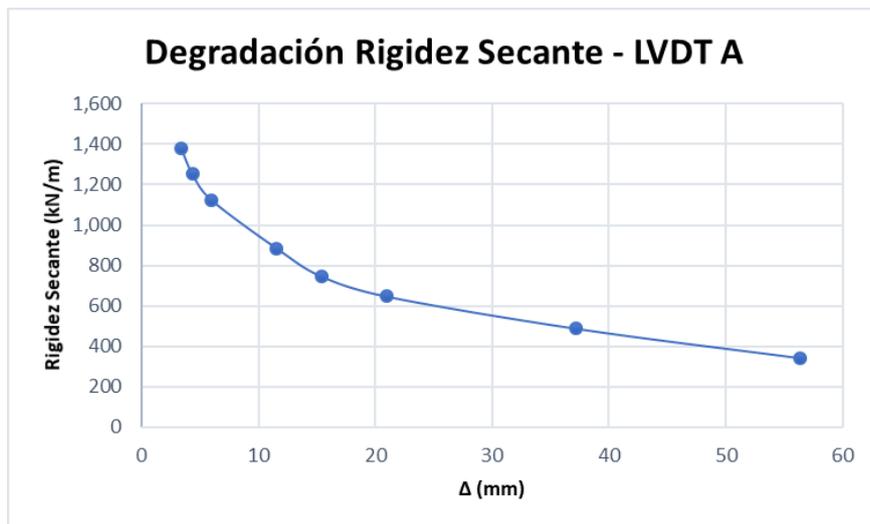
En las Figuras 4.16. y 4.17. se indica el descenso de rigidez secante que ocurre durante el ensayo al presentarse mayores desplazamientos, conforme avanzan las series.

**Figura 4.16. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 2 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.17. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 2 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.2.5. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

En la Tabla 4.16. se presenta los amortiguamientos viscosos equivalentes originados en cada serie, dando como resultado un promedio de 13.81% durante el Ensayo N°2.

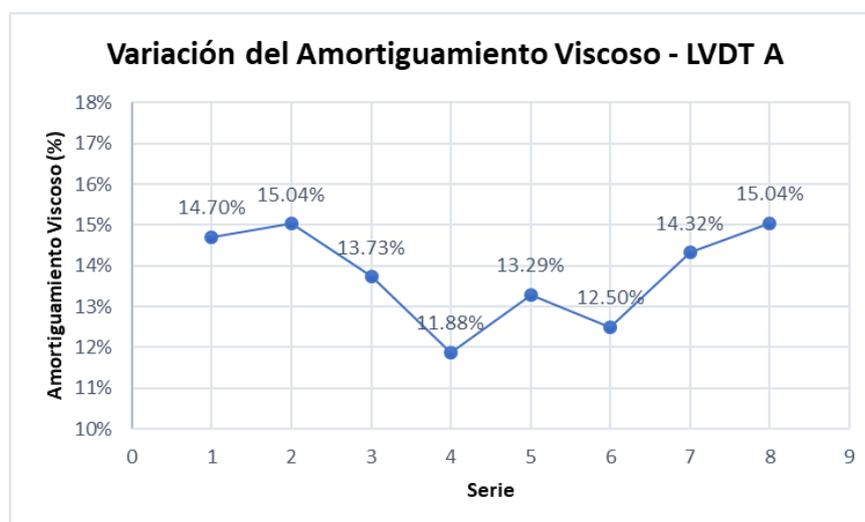
**Tabla 4.16. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 2 - LVDT A**

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO - ENSAYO 2 - LVDT A					
N° CICLO	Ks (KN/m)	$\Delta$ (mm)	ESo (KJ)	ED (KJ)	$\zeta$ eq
Serie 1 - Ciclo 5	1379.34	3.37	0.0078	0.0145	14.70%
Serie 2 - Ciclo 1	1253.77	4.32	0.0117	0.0221	15.04%
Serie 3 - Ciclo 1	1125.19	5.94	0.0199	0.0343	13.73%
Serie 4 - Ciclo 1	885.91	11.54	0.0590	0.0880	11.88%
Serie 5 - Ciclo 1	746.75	15.38	0.0883	0.1476	13.29%
Serie 6 - Ciclo 1	647.80	20.98	0.1426	0.2239	12.50%
Serie 7 - Ciclo 1	489.00	37.20	0.3384	0.6090	14.32%
Serie 8 - Ciclo 1	343.80	56.34	0.5457	1.0317	15.04%
				<b>PROMEDIO</b>	<b>13.81%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.18. se muestra que el mayor amortiguamiento viscoso para el Ensayo N°2 se genera en las series 2 y 8, debido a que existe una relación 1:47 aproximadamente, entre los valores de la energía disipada y rigidez secante de cada serie.

**Figura 4.18. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 2 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.2.6. DUCTILIDAD

En la Tabla 4.17. Se exponen los valores promedios de fuerza y deformación del empuje y halado; y en la Figura 4.19. se observa su gráfica.

**Tabla 4.17. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 2 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A		
Nº CICLO	F (kg)	Δ (mm)
	0	0
Serie 1 - Ciclo 5	456.90	3.14
Serie 2 - Ciclo 1	547.42	4.28
Serie 3 - Ciclo 1	664.51	5.79
Serie 4 - Ciclo 1	1031.62	11.42
Serie 5 - Ciclo 1	1325.99	17.42
Serie 6 - Ciclo 1	1513.14	22.91
Serie 7 - Ciclo 1	1936.96	38.86
Serie 8 - Ciclo 1	2036.95	58.12

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.19. Envolvente Promedio - Ensayo 2 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

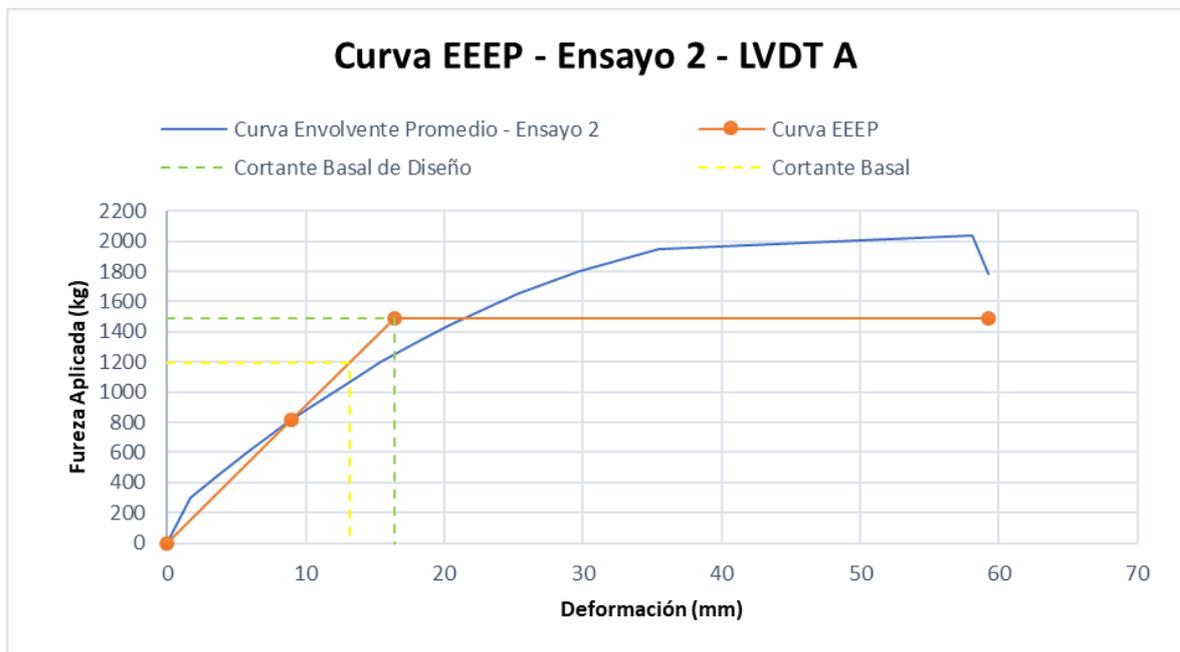
Se definieron los siguientes datos necesarios para generar la curva Elasto-Plástica de Energía (EEEP).

Tabla 4.18. Datos Curva EEEP - Ensayo 2 - LVDT A

DATOS CURVA EEEP- ENSAYO 2 -LVDT A			
$\Delta p_{ico}$ (mm)	58.12	$P_{pico}$ (kg)	2036.95
$\Delta e$ (mm)	8.97	$P_e$ (kg)	814.78
$\Delta m$ (mm)	59.27	$P_m$ (kg)	1787.01
$\Delta y$ (mm)	16.38	$P_y$ (kg)	1487.40
$k_e$ (kN/m)	891.02	$A$ (kg·mm)	86915.00

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.20. Curva EEEP - Ensayo 2 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Con los datos especificados anteriormente, se determinaron las siguientes variables:

**Tabla 4.19. Tabla Variables - Ensayo 2 - LVDT A**

L (m)	3
H (m)	1.8
$u$ pico (kN/m)	6.66
<b>G' (kN/m)</b>	
<b>G'0.4 Ppico &gt; G' Ppico</b>	
<b>G'0.4 Ppico</b>	<b>G' Ppico</b>
534.61	206.28
Se cumple la condición	
<b>u</b>	3.62
<b>R</b>	2.50
<b><math>Q_i \leq 0.3</math></b>	
<b>Q<sub>i</sub></b>	0.06
Se considera estructura estable	
<b>Coef. Seguridad</b>	1.70

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.2.7. ANÁLISIS DE DERIVAS

**V<sub>base</sub> (kg)** 1195.76

**V<sub>MR</sub> (kg)** 1487.40

**$V_{base} \leq V_{MR}$**

No es necesario el análisis de derivas

En este ensayo se muestra que no es necesario un análisis de derivas, sin embargo, al igual que en el ensayo anterior, se realizará con el objetivo de estudiar la influencia de la mampostería en estructuras de caña guadúa.

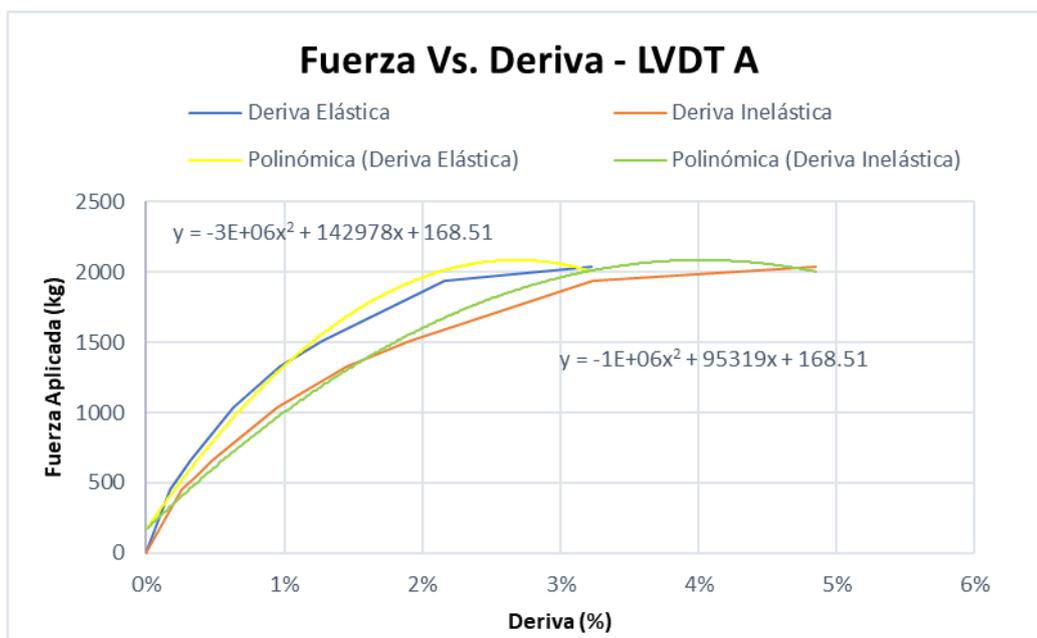
En la Tabla 4.20. se presenta las derivas elásticas e inelásticas de cada serie.

**Tabla 4.20. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 2 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A			DERIVA ELÁSTICA (%)	DERIVA INELÁSTICA (%)
N° CICLO	F (kg)	Δ (mm)		
Serie 1 - Ciclo 5	456.90	3.14	0.17%	0.26%
Serie 2 - Ciclo 1	547.42	4.28	0.24%	0.36%
Serie 3 - Ciclo 1	664.51	5.79	0.32%	0.48%
Serie 4 - Ciclo 1	1031.62	11.42	0.63%	0.95%
Serie 5 - Ciclo 1	1325.99	17.42	0.97%	1.45%
Serie 6 - Ciclo 1	1513.14	22.91	1.27%	1.91%
Serie 7 - Ciclo 1	1936.96	38.86	2.16%	3.24%
Serie 8 - Ciclo 1	2036.95	58.12	3.23%	4.84%

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.21. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 2 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.21. se muestra los valores del análisis de derivas, las mismas que se determinaron por medio de las ecuaciones reflejadas en la Figura 4.21. Se observa que la deriva elástica e inelástica supera el valor recomendado por la NEC del 2%; sin embargo, la deriva producida por el cortante basal, si cumple esta recomendación, por lo que se considera que la estructura no sufriría daños importantes ante la ocurrencia de un sismo con las características para el que fue diseñado, definidas en la sección 3.4.9.

Tabla 4.21. Análisis de Derivas – Ensayo 2 – LVDT A

ELÁSTICA		INELÁSTICA	
$\Delta$ máx (mm)	59.27	$\Delta$ máx (mm)	88.90
Deriva	3.29%	Deriva	4.94%
Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado	
Considerando:		Considerando:	
Deriva	2%	Deriva	2%
$\Delta$ (mm)	36	$\Delta$ (mm)	24
F (kg)	1828.07	F (kg)	1674.89
Considerando:		Considerando:	
V base (kg)	1195.76	V base (kg)	1195.76
Deriva	0.88%	Deriva	1.24%
$\Delta$ (mm)	15.87	$\Delta$ (mm)	22.30
Cumple recomendación		Cumple recomendación	

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.2.8. DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B

Tabla 4.22. Relación de Deformaciones – Ensayo 2

N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)		
		LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 5	456.90	3.14	1.23	39.2%
Serie 2 - Ciclo 1	547.42	4.28	1.80	42.1%
Serie 3 - Ciclo 1	664.51	5.79	2.67	46.1%
Serie 4 - Ciclo 1	1031.62	11.42	5.90	51.6%
Serie 5 - Ciclo 1	1325.99	17.42	8.98	51.6%
Serie 6 - Ciclo 1	1513.14	22.91	11.40	49.7%
Serie 7 - Ciclo 1	1936.96	38.86	18.27	47.0%
Serie 8 - Ciclo 1	2036.95	58.12	23.87	41.1%
PROMEDIO				46.1%

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

La relación de desplazamiento es del 46.1 % entre los ejes paralelos y el eje principal a la aplicación de carga.

**Tabla 4.23. Relación de Energía Disipada y Absorbida – Ensayo 2**

N° CICLO	F (kg)	ED (kJ)			ESo (KJ)		
		LVDT A	LVDT B	B/A	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 5	456.90	0.0108	0.0053	49.1%	0.0078	0.0035	45.0%
Serie 2 - Ciclo 1	547.42	0.0164	0.0083	50.6%	0.0117	0.0051	43.6%
Serie 3 - Ciclo 1	664.51	0.0251	0.0143	57.0%	0.0199	0.0090	45.1%
Serie 4 - Ciclo 1	1031.62	0.0835	0.0423	50.7%	0.0590	0.0264	44.8%
Serie 5 - Ciclo 1	1325.99	0.1459	0.0757	51.9%	0.0883	0.0477	54.0%
Serie 6 - Ciclo 1	1513.14	0.2212	0.1007	45.5%	0.1426	0.0618	43.3%
Serie 7 - Ciclo 1	1936.96	0.7087	0.2366	33.4%	0.3384	0.1418	41.9%
Serie 8 - Ciclo 1	2036.95	0.9090	0.3492	38.4%	0.5457	0.2226	40.8%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>47.1%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>44.8%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

El porcentaje entre los ejes laterales y el eje principal de energía disipada es del 47.1% y energía absorbida del 44.8%.

**Tabla 4.24. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente – Ensayo 2**

N° CICLO	F (kg)	Ks (KN/m)			$\zeta_{eq}$		
		LVDT A	LVDT B	A/B	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 5	456.90	1379.34	3510.99	39.3%	14.70%	11.95%	81.3%
Serie 2 - Ciclo 1	547.42	1253.77	2975.65	42.1%	15.04%	12.94%	86.0%
Serie 3 - Ciclo 1	664.51	1125.19	2440.26	46.1%	13.73%	12.69%	92.4%
Serie 4 - Ciclo 1	1031.62	885.91	1716.05	51.6%	11.88%	12.74%	107.3%
Serie 5 - Ciclo 1	1325.99	746.75	1448.31	51.6%	13.29%	12.62%	94.9%
Serie 6 - Ciclo 1	1513.14	647.80	1302.27	49.7%	12.50%	12.97%	103.8%
Serie 7 - Ciclo 1	1936.96	489.00	1040.28	47.0%	14.32%	13.28%	92.7%
Serie 8 - Ciclo 1	2036.95	343.80	837.26	41.1%	15.04%	12.49%	83.0%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>46.1%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>92.7%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

La rigidez secante en el eje de aplicación de carga es de 46.1% con respecto a los ejes paralelos y el amortiguamiento viscoso equivalente es de 92.7% en los ejes laterales con relación al eje principal.

**Tabla 4.25. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico – Ensayo 2**

VARIABLE	LVDT A	LVDT B	ERROR
<b>u</b>	3.62	3.45	4.7%
<b>R</b>	2.50	2.43	2.8%

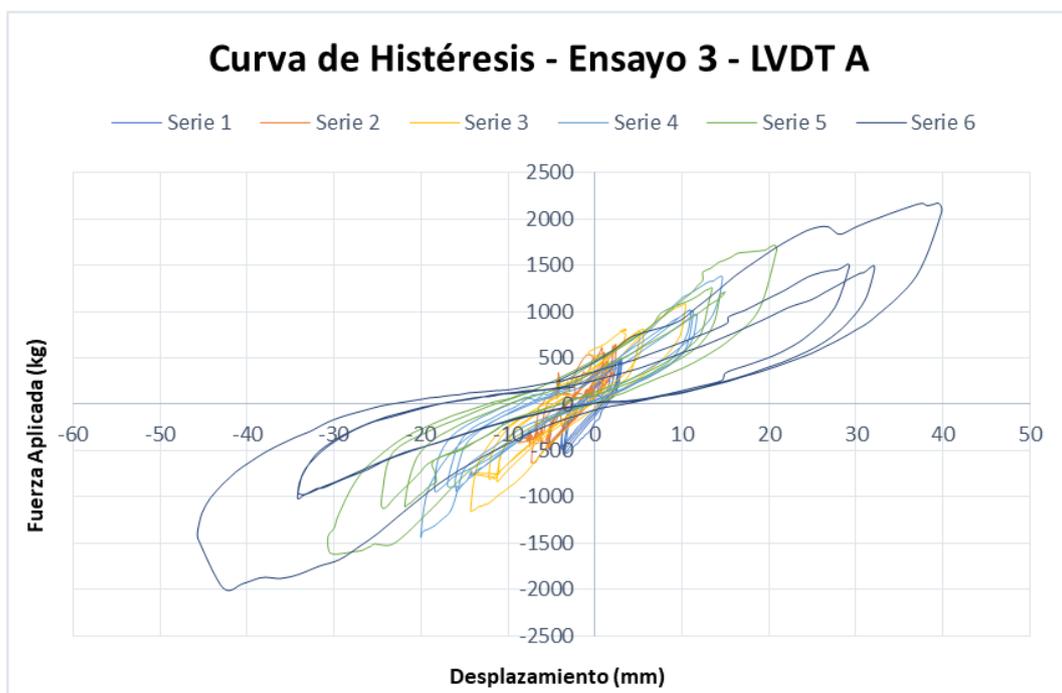
**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Se puede apreciar que el margen de error de la ductilidad y el factor de reducción del comportamiento sísmico es de 4.7% y 2.8% respectivamente, por este motivo se puede inferir que el factor R cumple la recomendación de la NEC-SE-GUADÚA.

### 4.3. ENSAYO 3

#### 4.3.1. CURVA DE HISTÉRESIS

Figura 4.22. Curva de Histéresis - Ensayo 3 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

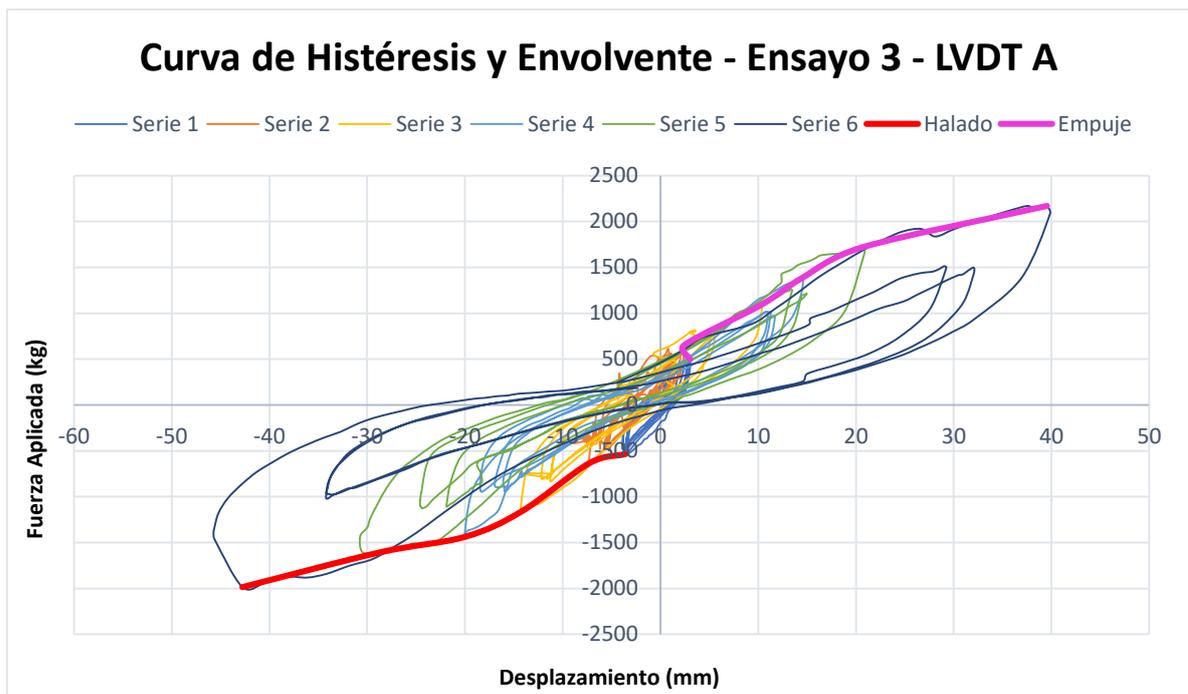
### 4.3.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

Tabla 4.26. Puntos Envolvente - Ensayo 3 - LVDT A

PUNTOS ENVOLVENTE - ENSAYO 3 - LVDT A				
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)	
	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)
Serie 1 - Ciclo 1	498.11	3.05	534.35	3.58
Serie 2 - Ciclo 1	650.15	2.42	635.62	7.29
Serie 3 - Ciclo 1	1089.24	10.27	1159.25	14.20
Serie 4 - Ciclo 1	1383.72	14.47	1436.85	20.01
Serie 5 - Ciclo 1	1719.31	20.65	1608.23	28.80
Serie 6 - Ciclo 1	2170.71	39.53	1984.79	42.77

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.23. Curva de Histéresis y Envolvente - Ensayo 3 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

La carga máxima en empuje fue de 2170.71 [kg] con una deformación de 39.53 [mm] y la carga máxima de halado fue de -1984.79 [kg] con una deformación de -42.77 [mm].

### 4.3.3. ENERGÍA DISIPADA

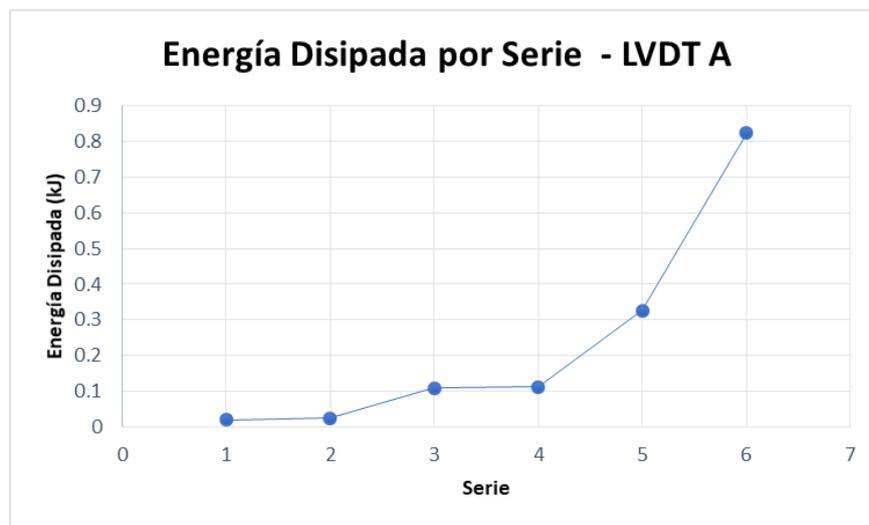
En la Tabla 4.27. se muestra la energía disipada total de la estructura en el Ensayo N°3, que fue de 2.7824 [kJ].

**Tabla 4.27. Energía Disipada - Ensayo 3 - LVDT A**

ENERGÍA DISIPADA - ENSAYO 3 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		ENERGÍA DISIPADA (kJ)	ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA (kJ)
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)		
Serie 1 - Ciclo 1	4.88	3.05	-5.24	-3.58	0.0206	0.1
Serie 2 - Ciclo 1	6.37	2.42	-6.23	-7.29	0.0249	0.1288
Serie 3 - Ciclo 1	10.67	10.27	-11.36	-14.20	0.1094	0.2474
Serie 4 - Ciclo 1	13.56	14.47	-14.08	-20.01	0.1125	0.4035
Serie 5 - Ciclo 1	16.85	20.65	-15.76	-28.80	0.3265	0.5539
Serie 6 - Ciclo 1	21.27	39.53	-19.45	-42.77	0.8243	1.3488
					<b>TOTAL</b>	<b>2.7824</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.24. Energía Disipada por Serie - Ensayo 3 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

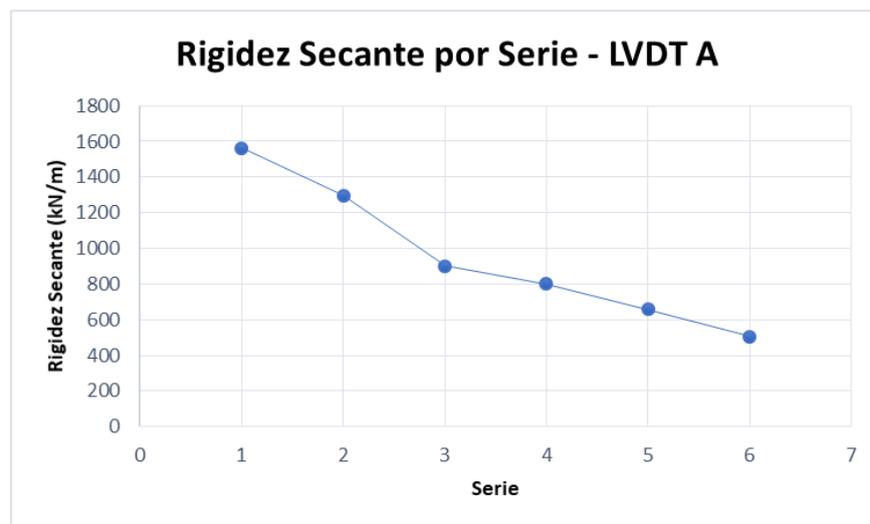
#### 4.3.4. RIGIDEZ SECANTE

Tabla 4.28. Rigidez Secante - Ensayo 3 - LVDT A

RIGIDEZ SECANTE - ENSAYO 3 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		RIGIDEZ SECANTE	
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)	Ks (kN/m)	% degradación
Serie 1 - Ciclo 1	4.88	3.05	-5.24	-3.58	1561.1028	
Serie 2 - Ciclo 1	6.37	2.42	-6.23	-7.29	1297.1924	16.91%
Serie 3 - Ciclo 1	10.67	10.27	-11.36	-14.20	900.4889	30.58%
Serie 4 - Ciclo 1	13.56	14.47	-14.08	-20.01	801.6277	10.98%
Serie 5 - Ciclo 1	16.85	20.65	-15.76	-28.80	659.5140	17.73%
Serie 6 - Ciclo 1	21.27	39.53	-19.45	-42.77	507.2248	23.09%

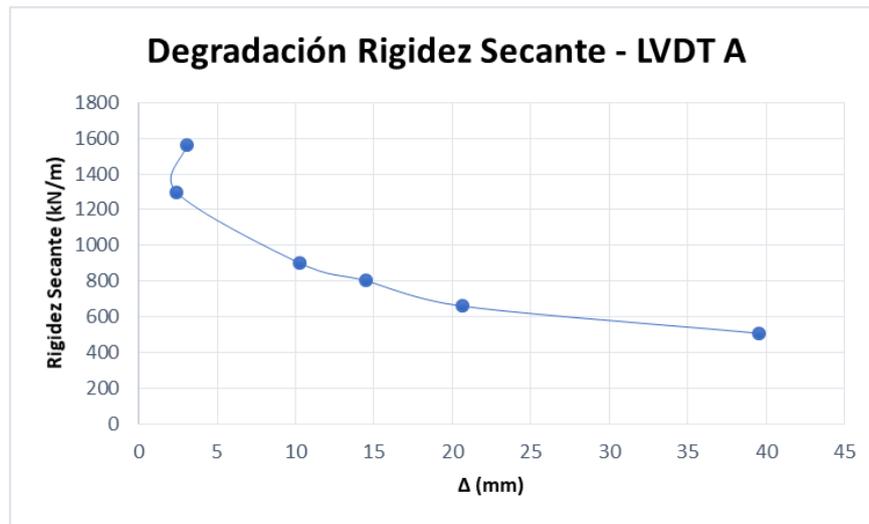
Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.25. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 3 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.26. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 3 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.3.5. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

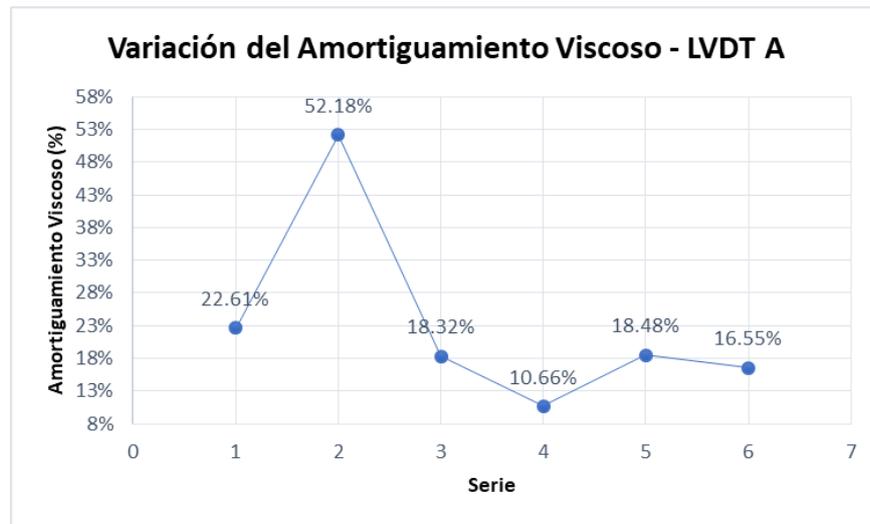
En la Tabla 4.29. y la Figura 4.27. se puede apreciar que el mayor amortiguamiento viscoso equivalente obtenido fue en la serie 2 con un valor de 52.18%.

**Tabla 4.29. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 3 - LVDT A**

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO - ENSAYO 3 - LVDT A					
N° CICLO	$K_s$ (kN/m)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	$E_{So}$ (kJ)	$E_D$ (kJ)	$\zeta_{eq}$
Serie 1 - Ciclo 1	1561.1028	3.05	0.0073	0.0206	22.61%
Serie 2 - Ciclo 1	1297.1924	2.42	0.0038	0.0249	52.18%
Serie 3 - Ciclo 1	900.4889	10.27	0.0475	0.1094	18.32%
Serie 4 - Ciclo 1	801.6277	14.47	0.0839	0.1125	10.66%
Serie 5 - Ciclo 1	659.5140	20.6470	0.1406	0.3265	18.48%
Serie 6 - Ciclo 1	507.2248	39.5333	0.3964	0.8243	16.55%
				<b>PROMEDIO</b>	<b>23.13%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.27. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 3 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

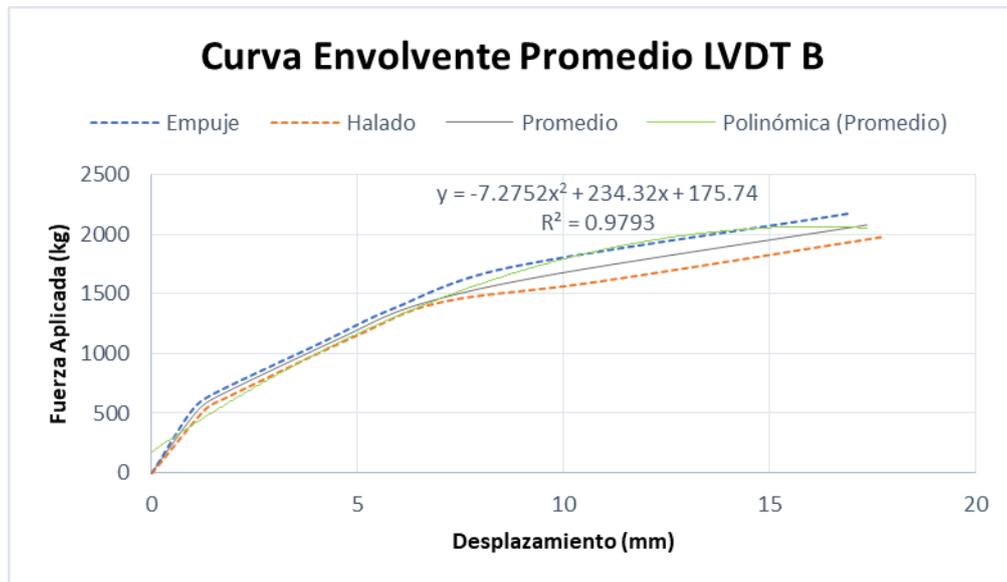
#### 4.3.6. DUCTILIDAD

**Tabla 4.30. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 3 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A		
N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)
Serie 1 - Ciclo 1	516.2298	3.3125
Serie 2 - Ciclo 1	642.8849	4.8569
Serie 3 - Ciclo 1	1124.2464	12.2351
Serie 4 - Ciclo 1	1410.2873	17.2409
Serie 5 - Ciclo 1	1663.7689	24.7227
Serie 6 - Ciclo 1	2077.7495	41.1495

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.28. Envoltente Promedio - Ensayo 3 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

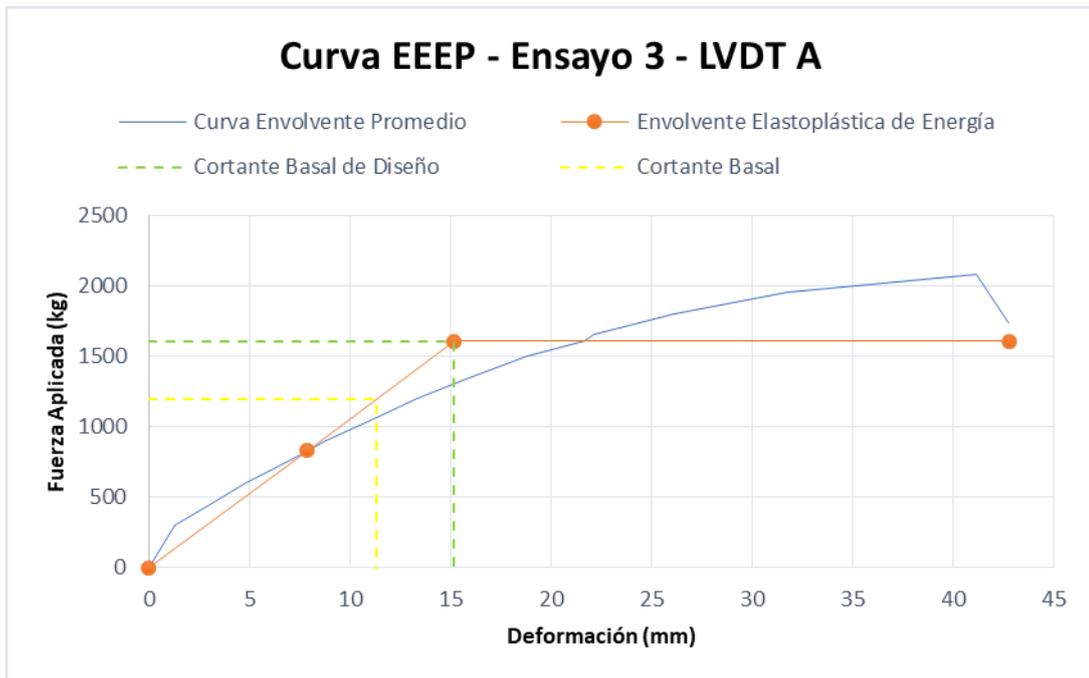
Se definieron los siguientes datos necesarios para generar la curva Elasto-Plástica de Energía (EEEP).

**Tabla 4.31. Datos Curva EEEP - Ensayo 3 - LVDT A**

DATOS CURVA EEEP - ENSAYO 3 - LVDT A			
$\Delta p_{\text{pico}}$ (mm)	41.15	$P_{\text{pico}}$ (kg)	2077.75
$\Delta e$ (mm)	7.87	$P_e$ (kg)	831.10
$\Delta m$ (mm)	42.79	$P_m$ (kg)	1739.71
$\Delta y$ (mm)	15.18	$P_y$ (kg)	1604.30
$k_e$ (kN/m)	105.67	$A$ (kg·mm)	56468.00

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.29. Curva EEEP - Ensayo 3 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Tabla 4.32. Tabla Variables - Ensayo 3 - LVDT A

L (m)	3
H (m)	1.8
u pico (kN/m)	6.79
<b>G' (kN/m)</b>	
<b>G'0.4 Ppico &gt; G' Ppico</b>	
<b>G'0.4 Ppico</b>	<b>G' Ppico</b>
621.96	297.20
Se cumple la condición	
<b>u</b>	2.82
<b>R</b>	2.15
<b>Qi ≤ 0.3</b>	
<b>Qi</b>	0.04
Se considera estructura estable	
<b>Coef. Seguridad</b>	1.74

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

### 4.3.7. ANÁLISIS DE DERIVAS

Vbase (kg) 1195.76

VMR (kg) 1604.30

$V_{base} \leq V_{MR}$

No es necesario el análisis de derivas

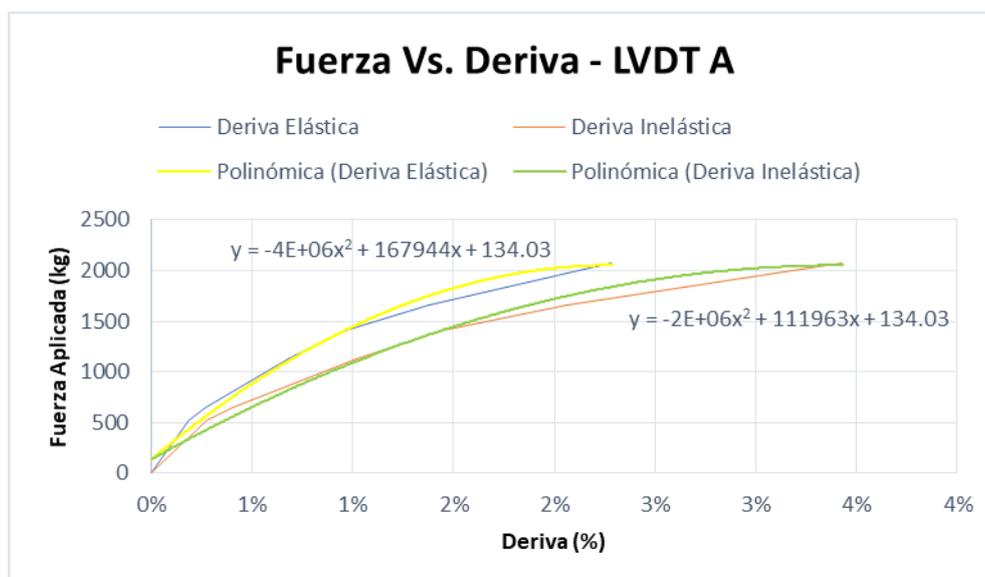
En este ensayo se muestra que no es necesario un análisis de derivas, no obstante, se realizará con el objetivo de estudiar la influencia de la mampostería en estructuras de caña guadúa. En la Tabla 4.33. se presenta las derivas elásticas e inelásticas de cada serie.

**Tabla 4.33. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 3 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A			DERIVA ELÁSTICA	DERIVA INELÁSTICA
N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)		
Serie 1 - Ciclo 1	516.2298	3.3125	0.18%	0.28%
Serie 2 - Ciclo 1	642.8849	4.8569	0.27%	0.40%
Serie 3 - Ciclo 1	1124.2464	12.2351	0.68%	1.02%
Serie 4 - Ciclo 1	1410.2873	17.2409	0.96%	1.44%
Serie 5 - Ciclo 1	1663.7689	24.7227	1.37%	2.06%
Serie 6 - Ciclo 1	2077.7495	41.1495	2.29%	3.43%

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.30. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 3 - LVDT A**



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.34. se aprecian los valores del análisis de derivas, las mismas que se determinaron por medio de las ecuaciones expresadas en la Figura 4.30., constatando que la deriva producida por el cortante basal, cumple la recomendación del 2% establecido en la NEC, por lo que se considera que la estructura no sufriría daños importantes ante la ocurrencia de un sismo con las características para el que fue diseñado, definidas en la sección 3.4.9.

**Tabla 4.34. Análisis de Derivas - Ensayo 3 - LVDT A**

ELÁSTICA		INELÁSTICA	
$\Delta$ máx (mm)	42.79	$\Delta$ máx (mm)	64.19
Deriva	2.38%	Deriva	3.57%
Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado	
<b>Considerando:</b>		<b>Considerando:</b>	
Deriva	2%	Deriva	2%
$\Delta$ (mm)	36	$\Delta$ (mm)	24
F (kg)	1845.46	F (kg)	1559.44
<b>Considerando:</b>		<b>Considerando:</b>	
V Basal (kg)	1195.76	V Basal (kg)	1195.76
Deriva	0.76%	Deriva	1.19%
$\Delta$ (mm)	13.70	$\Delta$ (mm)	21.40
Cumple recomendación		Cumple recomendación	

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.3.8. DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B

**Tabla 4.35. Relación de Deformaciones - Ensayo 3**

N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)		
		LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 1	516.23	3.05	0.91	29.88%
Serie 2 - Ciclo 1	642.88	2.42	1.42	58.59%
Serie 3 - Ciclo 1	1124.25	10.27	4.10	39.88%
Serie 4 - Ciclo 1	1410.29	14.47	5.91	40.82%
Serie 5 - Ciclo 1	1663.77	20.65	8.66	41.95%
Serie 6 - Ciclo 1	2077.75	39.53	16.93	42.84%
<b>PROMEDIO</b>				<b>42.33%</b>

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Los desplazamientos obtenidos en los ejes diferentes al de aplicación de carga representan en promedio el 42.33% de los obtenidos en dicho eje.

**Tabla 4.36. Relación de Energía Disipada y Absorbida - Ensayo 3**

N° CICLO	F (kg)	ED (kJ)			ESo(kj)		
		LVDT A	LVDT B	B/A	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 1	516.23	0.0206	0.0074	35.92%	0.0073	0.0019	26.75%
Serie 2 - Ciclo 1	642.88	0.0249	0.0102	40.96%	0.0038	0.0039	103.29%
Serie 3 - Ciclo 1	1124.25	0.1094	0.0421	38.48%	0.0475	0.0203	42.78%
Serie 4 - Ciclo 1	1410.29	0.1125	0.0666	59.20%	0.0839	0.0372	44.34%
Serie 5 - Ciclo 1	1663.77	0.3265	0.1198	36.69%	0.1406	0.0627	44.58%
Serie 6 - Ciclo 1	2077.75	0.8243	0.2768	33.58%	0.3964	0.1707	43.07%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>43.64%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>50.80%</b>

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Las energías disipada y absorbida en los ejes paralelos son alrededor del 43.64% y 50.80% del eje principal, respectivamente.

**Tabla 4.37. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente - Ensayo 3**

N° CICLO	F (kg)	Ks (kN/m)			$\zeta_{eq}$		
		LVDT A	LVDT B	A/B	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 1	516.23	1561.10281	4676.67793	33.38%	22.61%	30.36%	134.31%
Serie 2 - Ciclo 1	642.88	1297.19236	3903.17778	33.23%	52.18%	20.70%	39.66%
Serie 3 - Ciclo 1	1124.25	900.488918	2422.78571	37.17%	18.32%	16.48%	89.95%
Serie 4 - Ciclo 1	1410.29	801.627663	2132.97565	37.58%	10.66%	14.24%	133.52%
Serie 5 - Ciclo 1	1663.77	659.514014	1670.69337	39.48%	18.48%	15.21%	82.31%
Serie 6 - Ciclo 1	2077.75	507.224809	1190.68552	42.60%	16.55%	12.90%	77.96%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>37.24%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>92.95%</b>

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

La rigidez secante en el eje principal es aproximadamente el 37.24% de la resultante en los ejes laterales. En cuanto al amortiguamiento viscoso equivalente en los ejes paralelos es el 92.95% del eje principal.

**Tabla 4.38. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico - Ensayo 3**

VARIABLE	LVDT A	LVDT B	ERROR
$\mu$	2.82	2.78	1.51%
R	2.15	2.13	0.92%

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

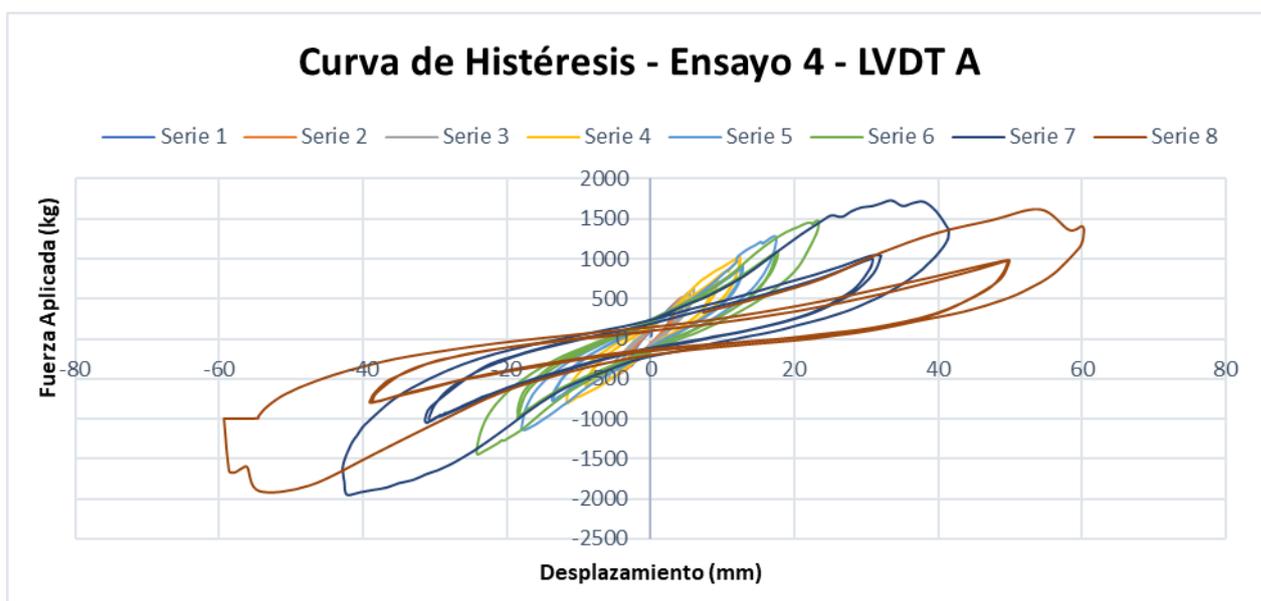
Se puede apreciar que el margen de error de la ductilidad y el factor de reducción del comportamiento sísmico es de 1.51% y 0.92% respectivamente.

La ductilidad en los diferentes ejes es similar, por lo que el factor R en los dos casos se aproxima a la recomendación de la NEC.

## 4.4. ENSAYO 4

### 4.4.1. CURVA DE HISTÉRESIS

Figura 4.31. Curva de Histéresis – Ensayo 4 – LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

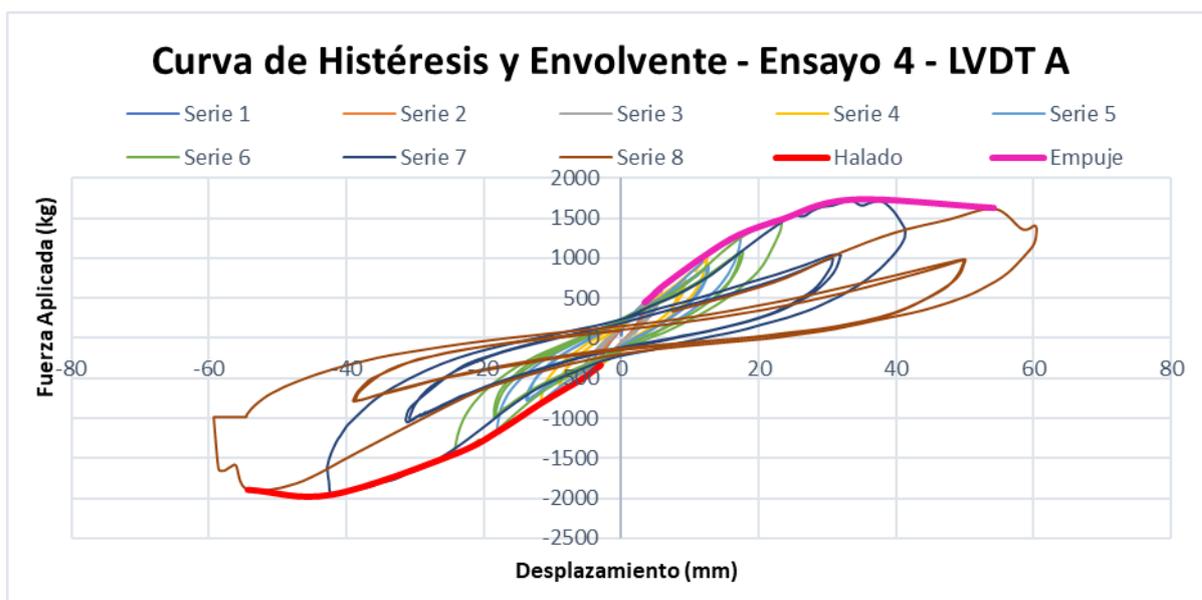
#### 4.4.2. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

Tabla 4.39. Puntos Envolvente – Ensayo 4 – LVDT A

PUNTOS ENVOLVENTE - ENSAYO 4 - LVDT A				
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)	
	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)
Serie 1 - Ciclo 2	443.48	3.45	-339.55	-2.97
Serie 2 - Ciclo 1	517.81	4.46	-425.90	-4.31
Serie 3 - Ciclo 1	639.17	5.97	-507.73	-5.62
Serie 4 - Ciclo 1	1025.30	12.15	-806.52	-11.49
Serie 5 - Ciclo 1	1284.26	17.15	-1147.14	-17.54
Serie 6 - Ciclo 1	1470.95	23.17	-1443.66	-23.99
Serie 7 - Ciclo 1	1723.68	33.52	-1958.91	-42.13
Serie 8 - Ciclo 1	1620.89	54.24	-1897.03	-54.31

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.32. Curva de Histéresis y Envolvente – Ensayo 4 – LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

La carga máxima en empuje fue de 1723. [kg] con una deformación de 33.52 [mm] y la carga máxima de halado fue de -1958.91 [kg] con una deformación de -42.13 [mm].

#### 4.4.3. ENERGÍA DISIPADA

La energía disipada del mayor ciclo de cada serie, la energía disipada acumulada por serie, se exponen en la Tabla 4.40., además, se puede divisar la energía disipada total de la estructura que en este caso fue de 3.8852 [kJ].

**Tabla 4.40. Energía Disipada - Ensayo 4 - LVDT A**

ENERGÍA DISIPADA - ENSAYO 4 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		ENERGÍA DISIPADA (KJ)	ENERGÍA DISIPADA
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)		
Serie 1 - Ciclo 2	4.35	3.45	-3.33	-2.97	0.0108	0.0593
Serie 2 - Ciclo 1	5.08	4.46	-4.18	-4.31	0.0164	0.0773
Serie 3 - Ciclo 1	6.27	5.97	-4.98	-5.62	0.0251	0.1177
Serie 4 - Ciclo 1	10.06	12.15	-7.91	-11.49	0.0835	0.2252
Serie 5 - Ciclo 1	12.60	17.15	-11.25	-17.54	0.1459	0.3634
Serie 6 - Ciclo 1	14.43	23.17	-14.16	-23.99	0.2212	0.4488
Serie 7 - Ciclo 1	16.91	33.52	-19.22	-42.13	0.7087	1.1409
Serie 8 - Ciclo 1	15.90	54.24	-18.61	-54.31	0.9090	1.4526
					<b>TOTAL</b>	<b>3.8852</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

El aumento de la energía disipada en función de la carga y desplazamiento en cada serie se presenta en la Figura 4.33.

**Figura 4.33. Energía Disipada por Serie - Ensayo 4 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.4.4. RIGIDEZ SECANTE

Los valores de rigidez secante por cada serie se exponen en la Tabla 4.41.

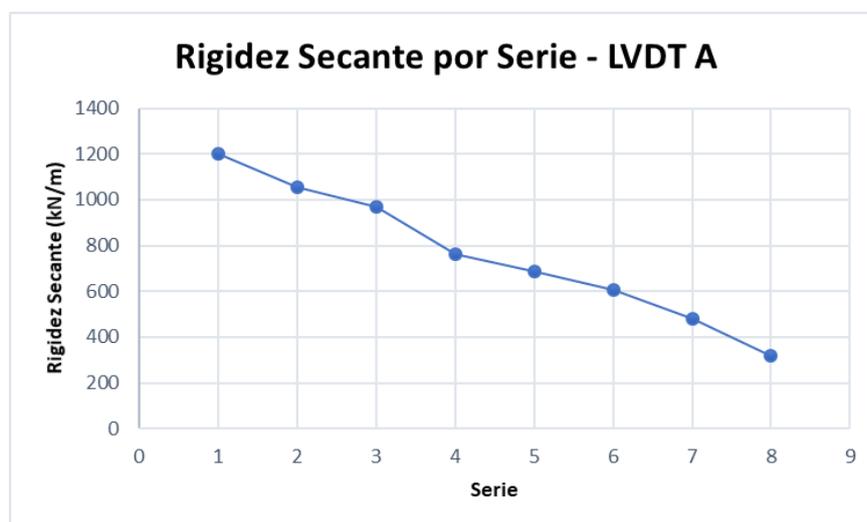
**Tabla 4.41. Rigidez Secante - Ensayo 4 - LVDT A**

RIGIDEZ SECANTE - ENSAYO 4 - LVDT A						
N° CICLO	EMPUJE (+)		HALADO (-)		RIGIDEZ SECANTE	
	F (kN)	$\Delta$ (mm)	F (kN)	$\Delta$ (mm)	Ks (KN/m)	% degradación
Serie 1 - Ciclo 2	4.35	3.45	-3.33	-2.97	1201.19	
Serie 2 - Ciclo 1	5.08	4.46	-4.18	-4.31	1055.17	12.16%
Serie 3 - Ciclo 1	6.27	5.97	-4.98	-5.62	970.28	8.05%
Serie 4 - Ciclo 1	10.06	12.15	-7.91	-11.49	760.01	21.67%
Serie 5 - Ciclo 1	12.60	17.15	-11.25	-17.54	687.69	9.52%
Serie 6 - Ciclo 1	14.43	23.17	-14.16	-23.99	606.24	11.84%
Serie 7 - Ciclo 1	16.91	33.52	-19.22	-42.13	477.57	21.22%
Serie 8 - Ciclo 1	15.90	54.24	-18.61	-54.31	317.92	33.43%

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

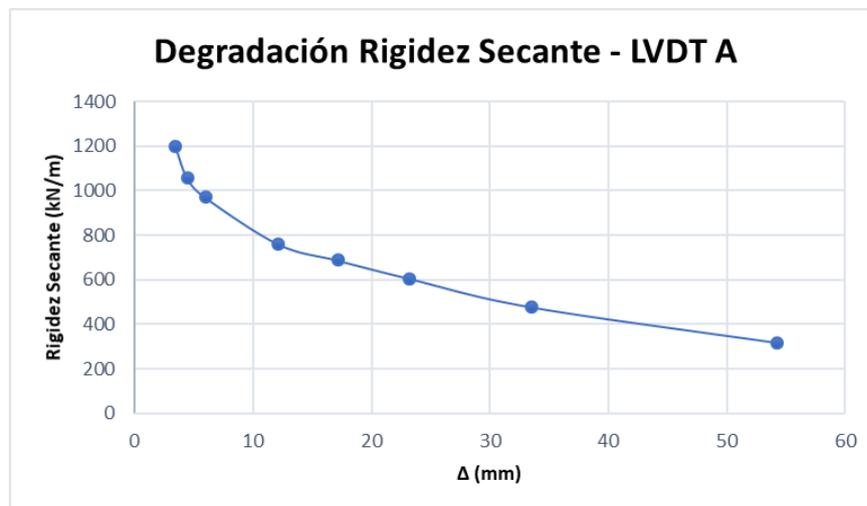
En las Figuras 4.34. y 4.35. se evidencia la disminución de rigidez secante que ocurre en cada serie durante el Ensayo N°4.

**Figura 4.34. Rigidez Secante por Serie - Ensayo 4 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.35. Degradación Rigidez Secante - Ensayo 4 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.4.5. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

Los amortiguamientos viscosos equivalentes generados en cada serie, durante el Ensayo N°4 se pueden apreciar en la Tabla 4.42.

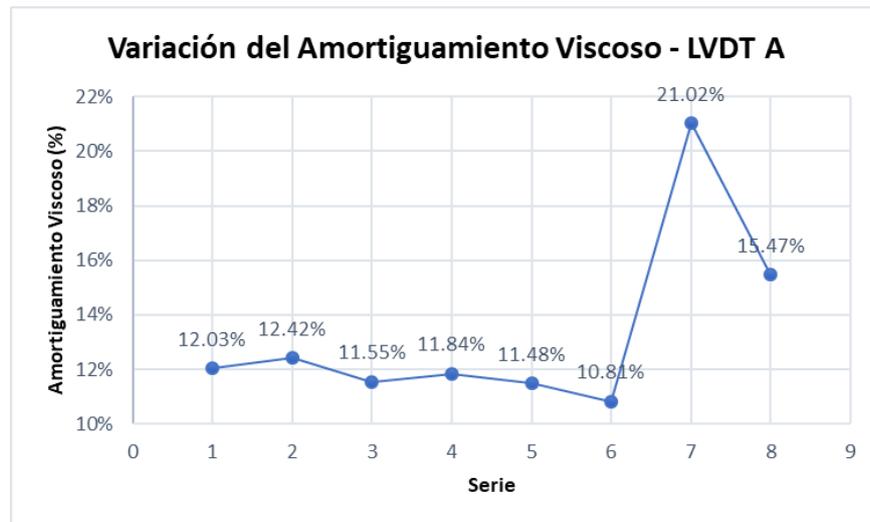
Tabla 4.42. Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 4 - LVDT A

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO - ENSAYO 4 - LVDT A					
N° CICLO	Ks (KN/m)	$\Delta$ (mm)	ESo (KJ)	ED (KJ)	$\zeta$ eq
Serie 1 - Ciclo 2	1201.19	3.45	0.0071	0.0108	12.03%
Serie 2 - Ciclo 1	1055.17	4.46	0.0105	0.0164	12.42%
Serie 3 - Ciclo 1	970.28	5.97	0.0173	0.0251	11.55%
Serie 4 - Ciclo 1	760.01	12.15	0.0561	0.0835	11.84%
Serie 5 - Ciclo 1	687.69	17.15	0.1011	0.1459	11.48%
Serie 6 - Ciclo 1	606.24	23.17	0.1628	0.2212	10.81%
Serie 7 - Ciclo 1	477.57	33.52	0.2683	0.7087	21.02%
Serie 8 - Ciclo 1	317.92	54.24	0.4677	0.9090	15.47%
				<b>PROMEDIO</b>	<b>13.33%</b>

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.36. se presenta que el mayor amortiguamiento viscoso para el Ensayo N°4 se origina en la serie 7 con un valor de 21.02%, teniendo en cuenta que existe una mayor relación entre la energía disipada con la energía absorbida.

**Figura 4.36. Variación del Amortiguamiento Viscoso - Ensayo 4 - LVDT A**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.4.6. DUCTILIDAD

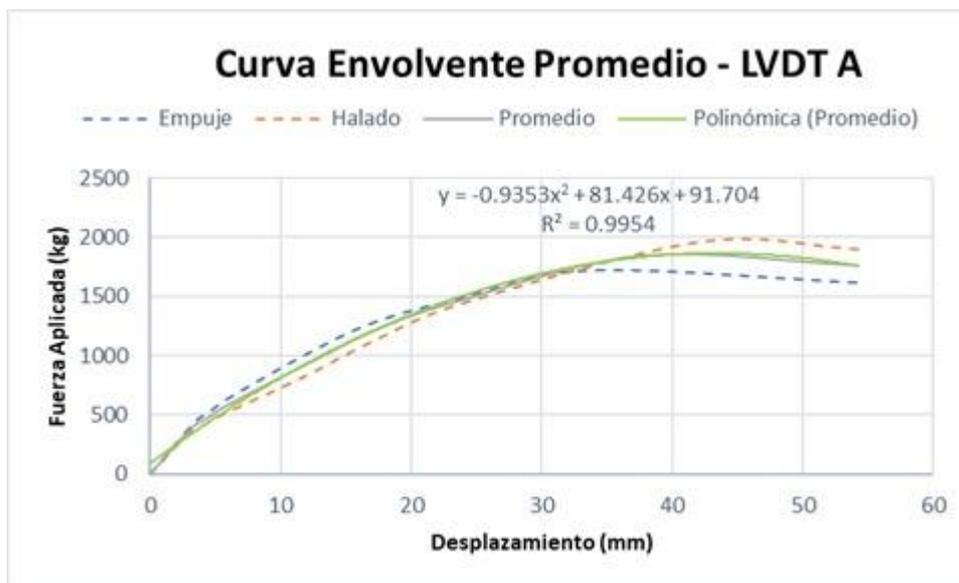
Los valores promedios de fuerza y deformación en empuje y halado del Ensayo N°4 se presentan en la Tabla 4.43., estos valores se utilizaron para la obtener la curva envolvente promedio y su ecuación.

**Tabla 4.43. Valores Envolvente Promedio - Ensayo 4 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A		
N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)
	0	0
Serie 1 - Ciclo 2	391.52	3.21
Serie 2 - Ciclo 1	471.85	4.39
Serie 3 - Ciclo 1	573.45	5.80
Serie 4 - Ciclo 1	915.91	11.82
Serie 5 - Ciclo 1	1215.70	17.34
Serie 6 - Ciclo 1	1457.30	23.58
Serie 7 - Ciclo 1	1841.30	37.82
Serie 8 - Ciclo 1	1758.96	54.28

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.37. Envoltente Promedio - Ensayo 4 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

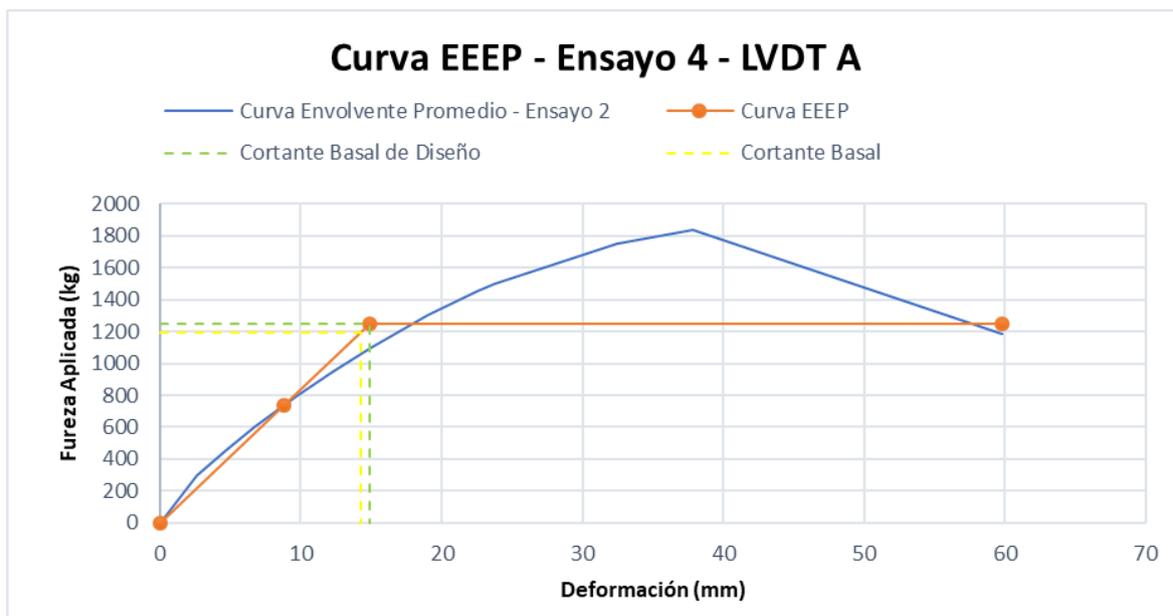
Se definieron los siguientes datos necesarios para generar la curva Elasto-Plástica de Energía (EEEEP).

Tabla 4.44. Datos Curva EEEP - Ensayo 4 - LVDT A

DATOS CURVA EEEP - ENSAYO 4 - LVDT A			
$\Delta p_{\text{pico}}$ (mm)	37.82	$P_{\text{pico}}$ (kg)	1841.30
$\Delta e$ (mm)	8.81	$P_e$ (kg)	736.52
$\Delta m$ (mm)	59.80	$P_m$ (kg)	1182.01
$\Delta y$ (mm)	14.93	$P_y$ (kg)	1248.19
$k_e$ (kN/m)	820.05	$A$ (kg·mm)	73687.00

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.38. Curva EEEP - Ensayo 4 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Con los datos especificados anteriormente, se determinaron las siguientes variables:

Tabla 4.45. Tabla Variables - Ensayo 4 - LVDT A

L (m)	3
H (m)	1.8
$u$ pico (kN/m)	6.02
<b>G' (kN/m)</b>	
<b>G'0.4 Ppico &gt; G' Ppico</b>	
<b>G'0.4 Ppico</b>	<b>G' Ppico</b>
492.03	286.54
Se cumple la condición	
<b>u</b>	4.00
<b>R</b>	2.65
<b>Qi ≤ 0.3</b>	
<b>Qi</b>	0.06
Se considera estructura estable	
<b>Coef. Seguridad</b>	1.54

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.4.7. ANÁLISIS DE DERIVAS

<b>Vbase (kg)</b>	1195.76
<b>VMR (kg)</b>	1248.19
<b>Vbase ≤ VMR</b>	
<b>No es necesario el análisis de derivas</b>	

En este ensayo se muestra que no es necesario un análisis de derivas, sin embargo, al igual que en los ensayos anteriores se realizará con el objetivo de estudiar la influencia de la mampostería en estructuras de caña guadúa.

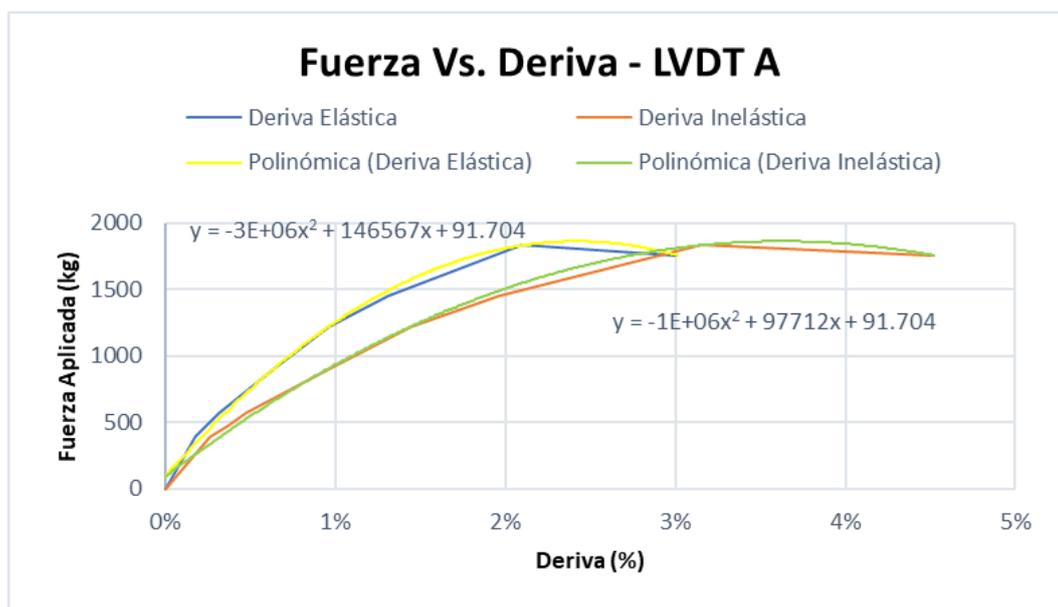
En la Tabla 4.46. se presenta las derivas elásticas e inelásticas de cada serie.

**Tabla 4.46. Derivas Elástica e Inelástica - Ensayo 4 - LVDT A**

ENVOLVENTE PROMEDIO - LVDT A			DERIVA	DERIVA
N° CICLO	F (kg)	Δ (mm)	ELÁSTICA (%)	INELÁSTICA (%)
Serie 1 - Ciclo 2	391.52	3.21	0.18%	0.27%
Serie 2 - Ciclo 1	471.85	4.39	0.24%	0.37%
Serie 3 - Ciclo 1	573.45	5.80	0.32%	0.48%
Serie 4 - Ciclo 1	915.91	11.82	0.66%	0.99%
Serie 5 - Ciclo 1	1215.70	17.34	0.96%	1.45%
Serie 6 - Ciclo 1	1457.30	23.58	1.31%	1.97%
Serie 7 - Ciclo 1	1841.30	37.82	2.10%	3.15%
Serie 8 - Ciclo 1	1758.96	54.28	3.02%	4.52%

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.39. Curva Fuerza Vs. Deriva - Ensayo 4 - LVDT A



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.47. se muestra los valores del análisis de derivas, las mismas que se determinaron por medio de las ecuaciones expresadas en la Figura 4.39., constatando que la deriva producida por el cortante basal, cumple la recomendación del 2% establecido en la NEC, por lo que se considera que la estructura no sufriría daños importantes ante la ocurrencia de un sismo con las características para el que fue diseñado, definidas en la sección 3.4.9.

Tabla 4.47. Análisis de Derivas – Ensayo 4 – LVDT A

ELÁSTICA		INELÁSTICA	
Δ máx (mm)	59.80	Δ máx (mm)	89.69
Deriva	3.32%	Deriva	4.98%
Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado	
Considerando		Considerando	
Deriva	2%	Deriva	2%
Δ (mm)	36	Δ (mm)	24
F (kg)	1823.04	F (kg)	1645.94
Considerando		Considerando	
V base (kg)	1195.76	V base (kg)	1195.76
Deriva	0.93%	Deriva	1.30%
Δ (mm)	16.75	Δ (mm)	23.47
Cumple recomendación		Cumple recomendación	

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.4.8. DATOS COMPARATIVOS ENTRE LVDT A Y LVDT B

**Tabla 4.48. Relación de Deformaciones – Ensayo 4**

N° CICLO	F (kg)	$\Delta$ (mm)		
		LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 2	391.52	3.21	1.58	49.2%
Serie 2 - Ciclo 1	471.85	4.39	2.18	49.6%
Serie 3 - Ciclo 1	573.45	5.80	2.90	50.0%
Serie 4 - Ciclo 1	915.91	11.82	5.93	50.2%
Serie 5 - Ciclo 1	1215.70	17.34	9.40	54.2%
Serie 6 - Ciclo 1	1457.30	23.58	13.19	55.9%
Serie 7 - Ciclo 1	1841.30	37.82	22.74	60.1%
Serie 8 - Ciclo 1	1758.96	54.28	27.09	49.9%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>52.4%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

La relación de desplazamiento es del 52.4% entre los ejes paralelos y el eje principal a la aplicación de carga.

**Tabla 4.49. Relación de Energía Disipada y Absorbida – Ensayo 4**

N° CICLO	F (kg)	ED (kJ)			ESo (KJ)		
		LVDT A	LVDT B	B/A	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 2	391.52	0.0108	0.0065	60.2%	0.0071	0.0039	54.1%
Serie 2 - Ciclo 1	471.85	0.0164	0.0093	56.7%	0.0105	0.0059	56.5%
Serie 3 - Ciclo 1	573.45	0.0251	0.0132	52.6%	0.0173	0.0099	57.1%
Serie 4 - Ciclo 1	915.91	0.0835	0.0377	45.1%	0.0561	0.0327	58.3%
Serie 5 - Ciclo 1	1215.70	0.1459	0.0733	50.2%	0.1011	0.0664	65.7%
Serie 6 - Ciclo 1	1457.30	0.2212	0.1125	50.9%	0.1628	0.1060	65.1%
Serie 7 - Ciclo 1	1841.30	0.7087	0.3241	45.7%	0.2683	0.1640	61.1%
Serie 8 - Ciclo 1	1758.96	0.9090	0.2911	32.0%	0.4677	0.1636	35.0%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>49.2%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>56.6%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

El porcentaje entre los ejes laterales y el eje principal de energía disipada es del 49.2% y energía absorbida del 56.6%.

**Tabla 4.50. Relación de Rigidez Secante y Amortiguamiento Viscoso Equivalente – Ensayo 4**

N° CICLO	F (kg)	Ks (KN/m)			ζ eq		
		LVDT A	LVDT B	A/B	LVDT A	LVDT B	B/A
Serie 1 - Ciclo 2	391.52	1201.1932	2445.99	49.1%	12.03%	13.38%	111.2%
Serie 2 - Ciclo 1	471.85	1055.1703	2127.28	49.6%	12.42%	12.47%	100.4%
Serie 3 - Ciclo 1	573.45	970.2799	1942.20	50.0%	11.55%	10.64%	92.2%
Serie 4 - Ciclo 1	915.91	760.0057	1515.46	50.2%	11.84%	9.17%	77.5%
Serie 5 - Ciclo 1	1215.70	687.6881	1268.07	54.2%	11.48%	8.78%	76.5%
Serie 6 - Ciclo 1	1457.30	606.2368	1084.17	55.9%	10.81%	8.45%	78.1%
Serie 7 - Ciclo 1	1841.30	477.5668	794.42	60.1%	21.02%	15.73%	74.8%
Serie 8 - Ciclo 1	1758.96	317.9220	636.99	49.9%	15.47%	14.16%	91.6%
		<b>PROMEDIO</b>		<b>52.4%</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>87.8%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

La rigidez secante en el eje de aplicación de carga es de 52.4% con respecto a los ejes paralelos y el amortiguamiento viscoso equivalente es de 87.8% en los ejes laterales con relación al eje principal.

**Tabla 4.51. Relación Ductilidad y Factor de Reducción del Comportamiento Sísmico – Ensayo 4**

VARIABLE	LVDT A	LVDT B	ERROR
<b>u</b>	4.00	3.28	18.0%
<b>R</b>	2.65	2.36	10.9%

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Se puede apreciar que el margen de error de la ductilidad y el factor de reducción del comportamiento sísmico es de 18.0% y 10.9% respectivamente.

## 4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS CUATRO ENSAYOS

### 4.5.1. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

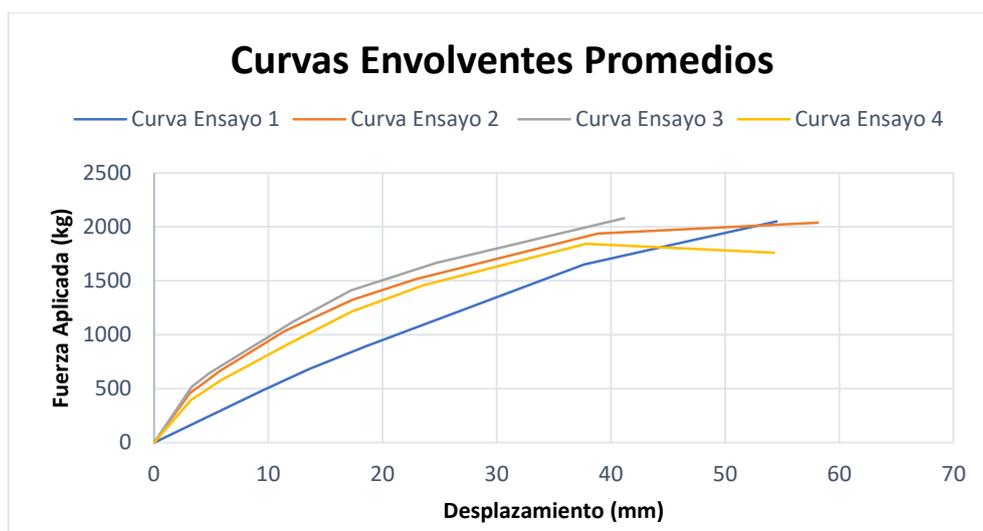
En la Tabla 4.52. se puede apreciar las fuerzas y desplazamientos que conforman los puntos necesarios para graficar las envolventes promedio de los cuatro ensayos efectuados, de manera que se pueda visualizar y analizar fácilmente las diferencias que existieron en los comportamientos de dichas estructuras.

**Tabla 4.52. Curva Envolvente Promedio de los 4 Ensayos**

ENVOLVENTE PROMEDIO DE LOS CUATRO ENSAYOS								
N° CICLO	ENSAYO 1		ENSAYO 2		ENSAYO 3		ENSAYO 4	
	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)	F (kg)	$\Delta$ (mm)
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Serie 1	485.6466	9.52	456.90	3.14	516.23	3.31	391.52	3.21
Serie 2	682.4254	13.61	547.42	4.28	642.88	4.86	471.85	4.39
Serie 3	891.1232	18.50	664.51	5.79	1124.25	12.24	573.45	5.80
Serie 4	1649.2007	37.63	1031.62	11.42	1410.29	17.24	915.91	11.82
Serie 5	2049.7816	54.51	1325.99	17.42	1663.77	24.72	1215.70	17.34
Serie 6			1513.14	22.91	2077.75	41.15	1457.30	23.58
Serie 7			1936.96	38.86			1841.30	37.82
Serie 8			2036.95	58.12			1758.96	54.28

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.40. Curvas Envolventes Promedios de los 4 Ensayos**



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.40. se distingue que las cuatro curvas correspondientes a las envolventes tienden a formar una parábola, por lo cual, se generó una ecuación que representa el comportamiento típico que se produjo con este sistema estructural.

$$F = -0.8084\Delta^2 + 78.146\Delta + 59.406$$

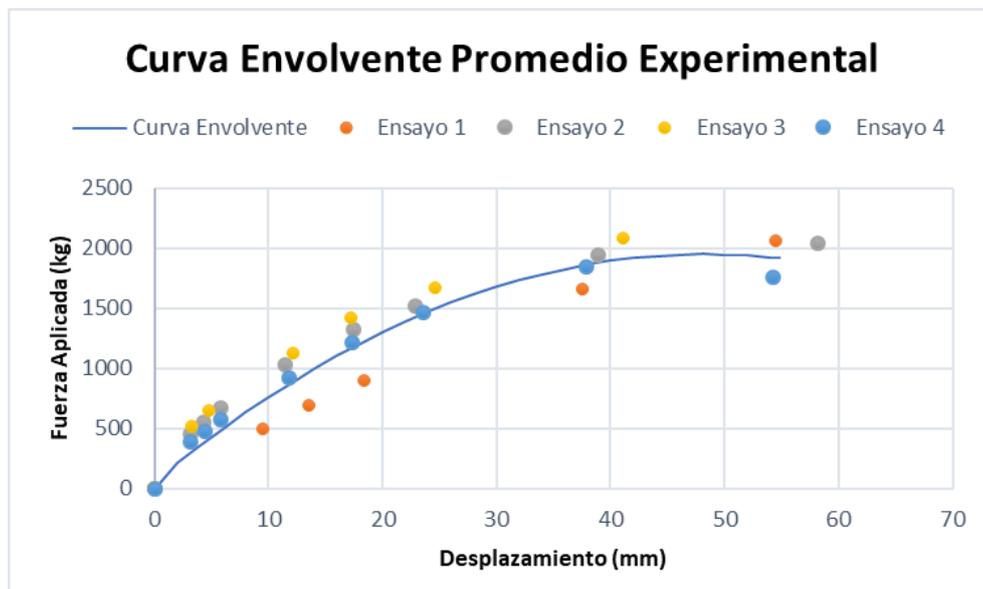
Donde:

$F$  = Fuerza Aplicada, kg

$\Delta$  = Desplazamiento, mm

El coeficiente de correlación ( $R$ ) es igual a 1, este valor sugiere que la relación que existe entre la fuerza aplicada y el desplazamiento es directa, la cual está representada por la ecuación polinómica de segundo grado presentada anteriormente.

**Figura 4.41. Curva Envolvente Experimental**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

A partir de los datos de la Tabla 4.52. se obtuvo valores promedio de fuerzas y desplazamientos, los mismo que se utilizaron para generar la curva mostrada en la Figura 4.41. La curva se graficó con el fin de facilitar la comparación de resultados con los obtenidos en el proyecto de titulación de Herrera y Viteri, dicha comparación se expone en la Figura 4.6.1.

#### 4.5.2. ENERGÍA DISIPADA

En la Tabla 4.53. se muestra la energía disipada referente a cada uno de los ensayos con la finalidad de construir un gráfico que simbolice la variación de esta energía en el transcurso de cada serie y para cada ensayo respectivamente, de tal forma que permita relacionarlos conforme a este parámetro.

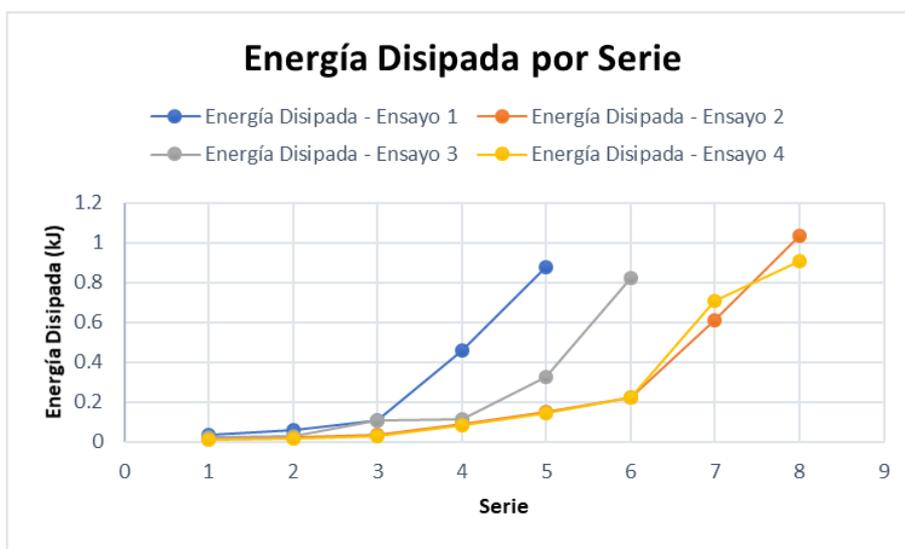
**Tabla 4.53. Energía Disipada**

ENERGÍA DISIPADA DE LOS CUATRO ENSAYOS				
N° CICLO	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	ENSAYO 4
	ED (kJ)	ED (kJ)	ED (kJ)	ED (kJ)
Serie 1	0.0346	0.0145	0.0206	0.0108
Serie 2	0.0600	0.0221	0.0249	0.0164
Serie 3	0.1051	0.0343	0.1094	0.0251
Serie 4	0.4558	0.0880	0.1125	0.0835
Serie 5	0.8793	0.1476	0.3265	0.1459
Serie 6		0.2239	0.8243	0.2212
Serie 7		0.6090		0.7087
Serie 8		1.0317		0.9090
<b>ED acum(kJ)</b>	2.6011	4.0242	2.7824	3.8852
<b>Promedio ED acum (kJ)</b>	3.3232			

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.42. se puede notar la semejanza que existe entre la disipación de energía del ensayo 2 y 4, que se desarrollaron con el mismo número de series; a diferencia del ensayo 1, el cual se llevó a cabo con un diferente protocolo de carga, establecido con el fin de determinar una deformación real que se esperaría en las estructuras posteriores. En el caso del ensayo 3, durante el proceso de construcción, descendió el mortero desde el nudo de aplicación de carga hacia la base de la columna, provocando un comportamiento distinto, en comparación a los demás ensayos.

Figura 4.42. Energía Disipada por Serie de los 4 Ensayos



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.5.3. RIGIDEZ SECANTE

En la Tabla 4.54. se especifica la rigidez secante en cada serie con su respectiva degradación para cada ensayo.

Tabla 4.54. Rigidez Secante

RIGIDEZ SECANTE DE LOS CUATRO ENSAYOS						
N° CICLO	ENSAYO 1			ENSAYO 2		
	$\Delta$ (mm)	Ks (KN/m)	% degradación	$\Delta$ (mm)	Ks (KN/m)	% degradación
Serie 1	9.52	499.30		3.14	1379.34	
Serie 2	13.61	491.41	1.58%	4.28	1253.77	9.10%
Serie 3	18.50	472.13	3.92%	5.79	1125.19	10.26%
Serie 4	37.63	429.47	9.04%	11.42	885.91	21.27%
Serie 5	54.51	368.52	14.19%	17.42	746.75	15.71%
Serie 6				22.91	647.80	13.25%
Serie 7				38.86	489.00	24.51%
Serie 8				58.12	343.80	29.69%

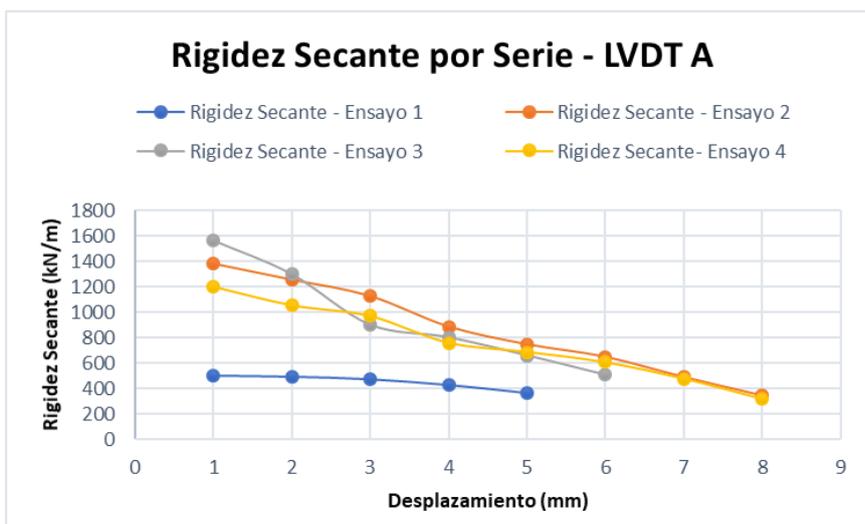
  

N° CICLO	ENSAYO 3			ENSAYO 4		
	$\Delta$ (mm)	Ks (KN/m)	% degradación	$\Delta$ (mm)	Ks (KN/m)	% degradación
Serie 1	3.31	1561.10		3.21	1201.19	
Serie 2	4.86	1297.19	16.91%	4.39	1055.17	12.16%
Serie 3	12.24	900.49	30.58%	5.80	970.28	8.05%
Serie 4	17.24	801.63	10.98%	11.82	760.01	21.67%
Serie 5	24.72	659.51	17.73%	17.34	687.69	9.52%
Serie 6	41.15	507.22	23.09%	23.58	606.24	11.84%
Serie 7				37.82	477.57	21.22%
Serie 8				54.28	317.92	33.43%

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

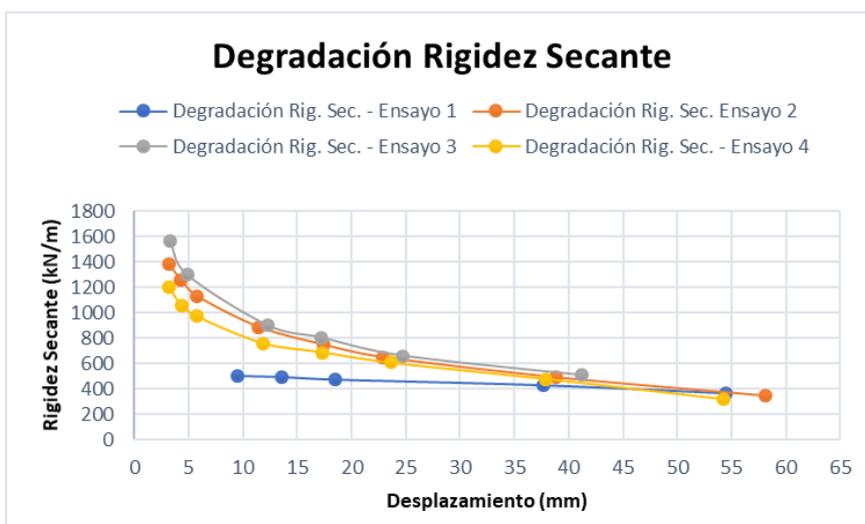
En las Figuras 4.43. y 4.44. se indica el descenso de rigidez secante que se produce en el transcurso de cada ensayo al presentarse mayores desplazamientos, conforme avanzan las series. Considerando la tendencia que tiene cada una de las curvas, se puede inferir que a partir del segundo ensayo, sus comportamientos son semejantes; lo que no sucede en el primer ensayo, ya que se desarrolló con un historial de carga diferente.

**Figura 4.43. Rigidez Secante por Serie de los 4 Ensayos**



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.44. Degradación Rigidez de los 4 Ensayos**



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.5.4. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

En la Tabla 4.55. se detalla los porcentajes de amortiguamiento viscoso equivalente obtenidos en los cuatro ensayos, mediante el promedio se puede determinar que el mayor amortiguamiento viscoso pertenece a la estructura del ensayo N°3, lo que sugiere que hubo mayor energía disipada que absorbida en dicha estructura.

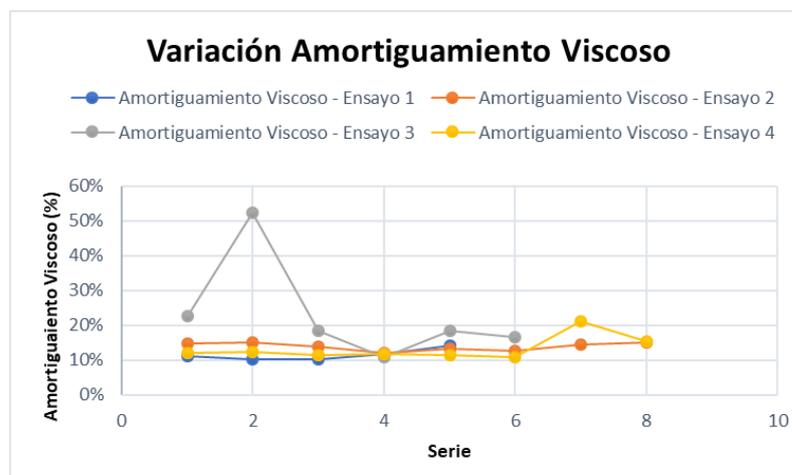
**Tabla 4.55. Amortiguamiento Viscoso Equivalente de los 4 Ensayos**

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO DE LOS CUATRO ENSAYOS				
N° CICLO	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	ENSAYO 4
	$\zeta_{eq}$	$\zeta_{eq}$	$\zeta_{eq}$	$\zeta_{eq}$
Serie 1	11.18%	14.70%	22.61%	12.03%
Serie 2	10.21%	15.04%	52.18%	12.42%
Serie 3	10.08%	13.73%	18.32%	11.55%
Serie 4	11.60%	11.88%	10.66%	11.84%
Serie 5	14.02%	13.29%	18.48%	11.48%
Serie 6		12.50%	16.55%	10.81%
Serie 7		14.32%		21.02%
Serie 8		15.04%		15.47%
<b>PROMEDIO</b>	<b>11.42%</b>	<b>13.81%</b>	<b>23.13%</b>	<b>13.33%</b>

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Figura 4.45. se plasman los valores de amortiguamiento viscoso para cada serie y ensayo, observando su similitud en la forma de cada gráfica, a excepción del ensayo N°3 por lo expuesto anteriormente.

**Figura 4.45. Variación del Amortiguamiento Viscoso de los 4 Ensayos**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.5.5. DUCTILIDAD

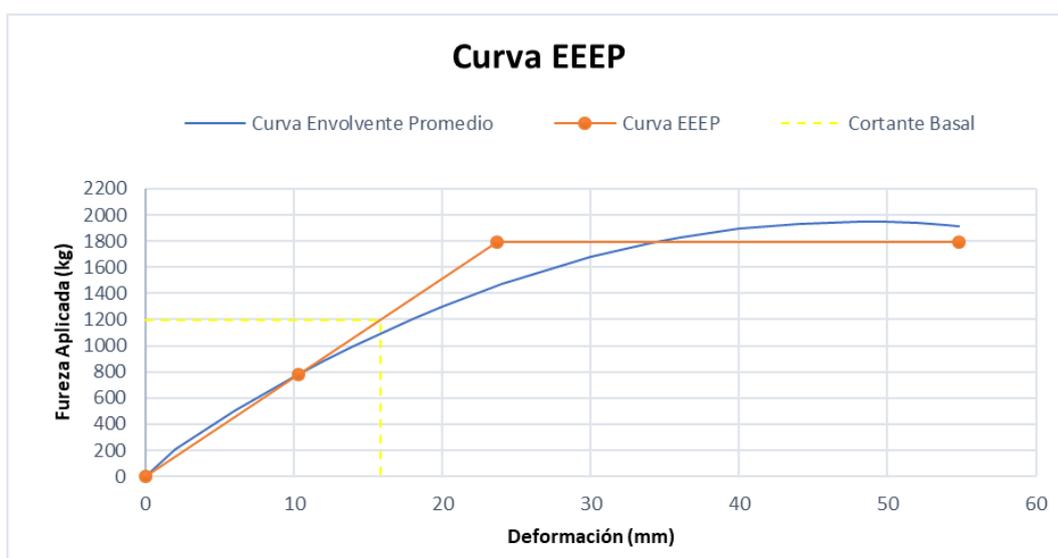
Se definieron los siguientes datos necesarios para generar la curva Elasto-Plástica de Energía (EEEE).

**Tabla 4.56. Datos Curva EEEP**

DATOS CURVA EEEP - LVDT A			
$\Delta p_{ico}$ (mm)	48.30	$P_{pico}$ (kg)	1947.95
$\Delta e$ (mm)	10.31	$P_e$ (kg)	779.18
$\Delta m$ (mm)	54.79	$P_m$ (kg)	1632.29
$\Delta y$ (mm)	23.67	$P_y$ (kg)	1788.66
$k_e$ (kN/m)	75.57	$A$ (kg·mm)	76842.00

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

**Figura 4.46. Curva EEEP**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Con los datos especificados anteriormente, se determinaron las siguientes variables:

**Tabla 4.57. Tabla Variables**

L (m)	3
H (m)	1.8
$u$ pico (kN/m)	6.37
<b>G' (kN/m)</b>	
<b>G'0.4 Ppico &gt; G' Ppico</b>	
<b>G'0.4 Ppico</b>	<b>G' Ppico</b>
444.82	237.38
Se cumple la condición	
<b>u</b>	2.32
<b>R</b>	1.91
<b><math>Q_i \leq 0.3</math></b>	
<b>Q<sub>i</sub></b>	0.05
Se considera estructura estable	
<b>Coef. Seguridad</b>	1.63

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.5.6. ANÁLISIS DE DERIVAS

**V<sub>base</sub> (kg)**                      1195.76

**V<sub>MR</sub> (kg)**                        1788.66

**$V_{base} \leq V_{MR}$**

No es necesario el análisis de derivas

Se evidencia que el análisis de derivas no es necesario, sin embargo, se realizará para posteriormente comparar los resultados con los obtenidos en el Proyecto de Titulación de Herrera y Viteri. Esta comparación se encuentra detallada en el numeral 4.6.6.

En la Tabla 4.58. se presenta las derivas elásticas e inelásticas generadas por los desplazamientos de la curva envolvente promedio experimental.

Tabla 4.58. Derivas Elástica e Inelástica

ENVOLVENTE EXPERIMENTAL		DERIVA ELÁSTICA (%)	DERIVA INELÁSTICA (%)
F (kg)	$\Delta$ (mm)		
0.00	0.00	0.00%	0.00%
212.46	2	0.11%	0.17%
359.06	4	0.22%	0.33%
499.18	6	0.33%	0.50%
632.84	8	0.44%	0.67%
760.03	10	0.56%	0.83%
880.75	12	0.67%	1.00%
995.00	14	0.78%	1.17%
1102.79	16	0.89%	1.33%
1204.11	18	1.00%	1.50%
1298.97	20	1.11%	1.67%
1387.35	22	1.22%	1.83%
1469.27	24	1.33%	2.00%
1544.72	26	1.44%	2.17%
1613.71	28	1.56%	2.33%
1676.23	30	1.67%	2.50%
1732.28	32	1.78%	2.67%
1781.86	34	1.89%	2.83%
1824.98	36	2.00%	3.00%
1861.62	38	2.11%	3.17%
1891.81	40	2.22%	3.33%
1915.52	42	2.33%	3.50%
1932.77	44	2.44%	3.67%
1943.55	46	2.56%	3.83%
1947.86	48	2.67%	4.00%
1947.91	48.1	2.67%	4.01%
1947.94	48.2	2.68%	4.02%
1947.95	48.3	2.68%	4.03%
1945.71	50	2.78%	4.17%
1937.08	52	2.89%	4.33%
1922.00	54	3.00%	4.50%
1914.25	54.79	3.04%	4.57%

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.47. Curva Fuerza Vs. Deriva



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.59. se muestra los valores del análisis de derivas, las mismas que se determinaron por medio de las ecuaciones reflejadas en la Figura 4.47. Se observa que los valores máximos de deriva elástica e inelástica superan el valor recomendado; en cuanto a la deriva producida por el cortante basal, si cumple la recomendación del 2% de la NEC, lo que indica que la estructura no presentará daños significativos ante la ocurrencia de un evento sísmico con las características detalladas en el numeral 3.4.9.

**Tabla 4.59. Análisis de Derivas**

ELÁSTICA		INELÁSTICA	
$\Delta$ máx (mm)	54.79	$\Delta$ máx (mm)	82.19
Deriva	3.04%	Deriva	4.57%
Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado	
<b>Considerando</b>		<b>Considerando</b>	
<b>Deriva</b>	<b>2%</b>	<b>Deriva</b>	<b>2%</b>
$\Delta$ (mm)	36	$\Delta$ (mm)	24
F (kg)	1697.73	F (kg)	1546.21
<b>Considerando</b>		<b>Considerando</b>	
<b>V base (kg)</b>	<b>1195.76</b>	<b>V base (kg)</b>	<b>1195.76</b>
Deriva	1.03%	Deriva	1.42%
$\Delta$ (mm)	18.56	$\Delta$ (mm)	25.64
Cumple recomendación		Cumple recomendación	

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

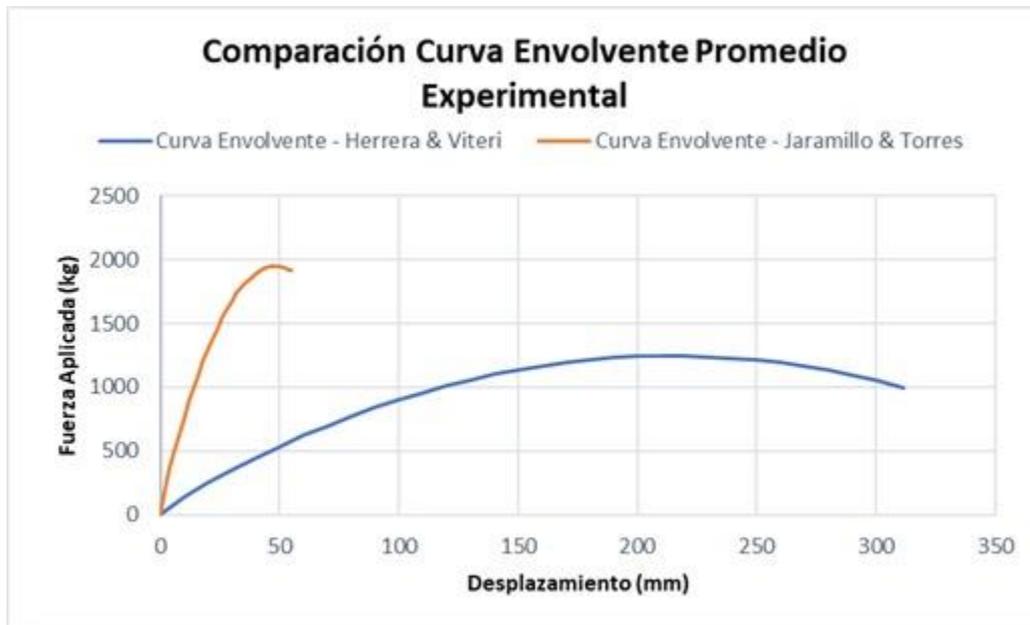
## 4.6. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN DE HERRERA Y VITERI

A partir de esta sección, al estudio de Herrera y Viteri, se lo denominará “proyecto referente” y al presente estudio como “proyecto actual”, con el propósito de comparar los resultados obtenidos y determinar la influencia de la mampostería en estructuras de caña guadúa.

### 4.6.1. ENVOLVENTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

En la Figura 4.48. se observan las gráficas envolventes, que describen el comportamiento promedio de los ensayos desarrollados en los dos proyectos de investigación. En la gráfica se visualiza la misma tendencia de una parábola, con la diferencia que en el proyecto referente, se distingue un mayor desplazamiento, obteniendo un valor máximo de 311 mm; por otro lado, en el proyecto actual se refleja una deformación máxima de 58 mm, logrando el objetivo de rigidizar a la estructura de caña guadúa, gracias a la implementación de mampostería. Respecto a la carga, los valores máximos se alcanzaron en el proyecto actual, destacando un pico de 2077 kg; por otra parte, en el proyecto referente se llegó a un valor de 1420 kg.

**Figura 4.48. Curvas Envolventes Promedios**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.6.2. ENERGÍA DISIPADA

En la Figura 4.49. se aprecia el aumento de energía disipada en función del desarrollo de las series, puesto que, el incremento gradual de carga y deformación que se da conforme avanzan, genera un ciclo histerético que encierra una mayor área.

Con el fin de comparar la energía disipada en los dos proyectos, se realizó un promedio de las obtenidas para cada ensayo. En el proyecto referente se logró un valor de 5.2356 [kJ], mientras que, en el proyecto actual se disipó 3.3232 [kJ].

**Figura 4.49. Energía Disipada por Serie**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.6.3. RIGIDEZ SECANTE

En las Figuras 4.50. y 4.51. se aprecia una mayor variación de rigidez en el proyecto actual, debido a la mampostería incorporada, obteniendo una relación comparativa de 6:1 entre sus valores máximos, con respecto al proyecto referente.

**Figura 4.50. Rigidez Secante por Serie**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.51. Degradación Rigidez

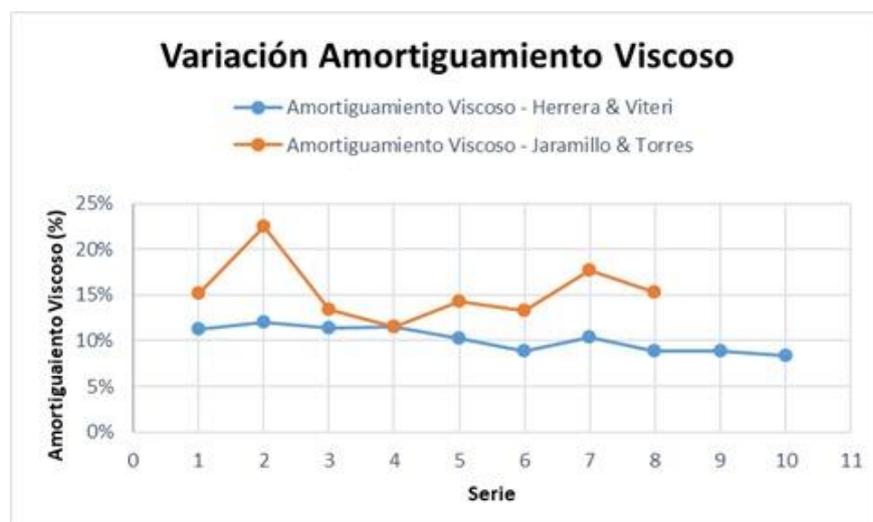


Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.6.4. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

En la Figura 4.52. se expone la gráfica que describe la variación promedio de los porcentajes de amortiguamiento viscoso equivalente, obtenidos en los dos proyectos, mediante la cual se deduce que existió mayor energía disipada que absorbida en las estructuras correspondientes al proyecto actual en comparación al proyecto referente.

Figura 4.52. Variación del Amortiguamiento Viscoso Equivalente

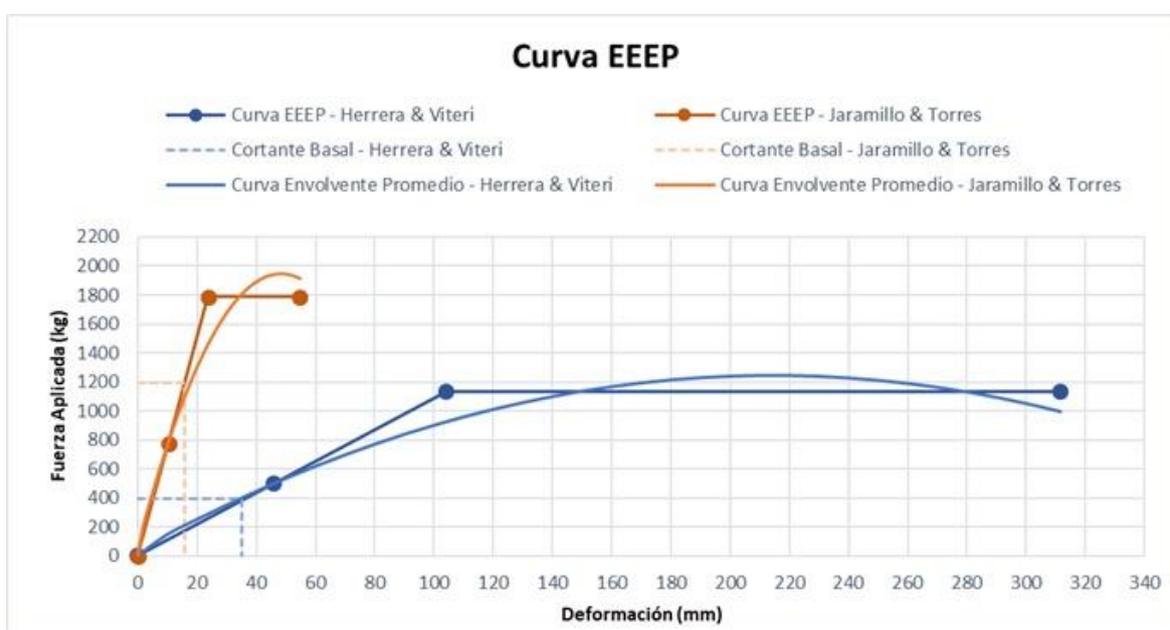


Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

#### 4.6.5. DUCTILIDAD

En la Figura 4.53. se muestra la curva Elasto-Plástica de Energía de cada proyecto, donde se evidencia que en el proyecto actual existe un aumento en la carga de fluencia, conjuntamente con una disminución en el desplazamiento; así mismo, su curva envolvente presenta una mayor amplitud, alcanzando un pico de aproximadamente 1948 [kg] , en comparación al proyecto referente de 1245 [kg]. Este incremento se debe a la rigidez que aporta la mampostería implementada.

**Figura 4.53. Curvas EEEP**



**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Con los datos extraídos de la curva EEEP de cada proyecto, se determinaron las siguientes variables:

**Tabla 4.60. Tabla Variables**

Proyecto Herrera & Viteri		Proyecto Jaramillo & Torres	
L (m)	3	L (m)	3
H (m)	1.8	H (m)	1.8
u pico (kN/m)	4.07	u pico (kN/m)	6.37
G' (kN/m)		G' (kN/m)	
G'0.4 Ppico > G' Ppico		G'0.4 Ppico > G' Ppico	
G'0.4 Ppico	G' Ppico	G'0.4 Ppico	G' Ppico
63.84	34.19	444.82	237.38
Se cumple la condición		Se cumple la condición	
u	2.99	u	2.32
R	2.23	R	1.91
Qi ≤ 0.3		Qi ≤ 0.3	
Qi	0.20	Qi	0.05
Se considera estructura estable		Se considera estructura estable	
Coef. Seguridad	3.14	Coef. Seguridad	1.63

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Durante este proyecto, se manifestaron algunas diferencias en los parámetros presentados en la Tabla 4.60, puesto que las estructuras soportaron mayor fuerza, generando un menor desplazamiento. La resistencia y módulo de corte del proyecto actual son superiores; por el contrario, la ductilidad y el factor de comportamiento sísmico disminuyeron, no obstante, este último parámetro se mantiene cercano al valor de 2 que recomienda la NEC.

#### 4.6.6. ANÁLISIS DE DERIVAS

**Figura 4.54. Análisis de Derivas**

Proyecto Herrera & Viteri		Proyecto Jaramillo & Torres	
Vbase (kg)	396.28	Vbase (kg)	1195.76
VMR (kg)	1129.81	VMR (kg)	1788.66
Vbase ≤ VMR		Vbase ≤ VMR	
No es necesario el análisis de derivas		No es necesario el análisis de derivas	

Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Se puede evidenciar que en los dos casos no es necesario un análisis de derivas, sin embargo, se realizó el análisis para su comparación. Estos datos han sido plasmados en la Tabla 4.61., en la que se detalla las derivas elásticas e inelásticas generadas por los desplazamientos.

**Tabla 4.61. Derivas Elástica e Inelástica**

Proyecto Herrera & Viterl				Proyecto Jaramillo & Torres			
ENVOLVENTE EXPERIMENTAL		DERIVA		ENVOLVENTE EXPERIMENTAL		DERIVA	
F(kg)	$\Delta$ (mm)	ELÁSTICA (%)	INELÁSTICA (%)	F(kg)	$\Delta$ (mm)	ELÁSTICA (%)	INELÁSTICA (%)
0	0	0.00%	0.00%	0.00	0.00	0.00%	0.00%
146	10	0.56%	0.83%	212.46	2	0.11%	0.17%
251	20	1.11%	1.67%	359.06	4	0.22%	0.33%
350	30	1.67%	2.50%	499.18	6	0.33%	0.50%
445	40	2.22%	3.33%	632.84	8	0.44%	0.67%
534	50	2.78%	4.17%	760.03	10	0.56%	0.83%
618	60	3.33%	5.00%	880.75	12	0.67%	1.00%
697	70	3.89%	5.83%	995.00	14	0.78%	1.17%
770	80	4.44%	6.67%	1102.79	16	0.89%	1.33%
839	90	5.00%	7.50%	1204.11	18	1.00%	1.50%
901	100	5.56%	8.33%	1298.97	20	1.11%	1.67%
959	110	6.11%	9.17%	1387.35	22	1.22%	1.83%
1011	120	6.67%	10.00%	1469.27	24	1.33%	2.00%
1058	130	7.22%	10.83%	1544.72	26	1.44%	2.17%
1100	140	7.78%	11.67%	1613.71	28	1.56%	2.33%
1137	150	8.33%	12.50%	1676.23	30	1.67%	2.50%
1168	160	8.89%	13.33%	1732.28	32	1.78%	2.67%
1194	170	9.44%	14.17%	1781.86	34	1.89%	2.83%
1215	180	10.00%	15.00%	1824.98	36	2.00%	3.00%
1230	190	10.56%	15.83%	1861.62	38	2.11%	3.17%
1240	200	11.11%	16.67%	1891.81	40	2.22%	3.33%
1245	210	11.67%	17.50%	1915.52	42	2.33%	3.50%
1245	214.2	11.90%	17.85%	1932.77	44	2.44%	3.67%
1245	220	12.22%	18.33%	1943.55	46	2.56%	3.83%
1239	230	12.78%	19.17%	1947.86	48	2.67%	4.00%
1228	240	13.33%	20.00%	1947.91	48.1	2.67%	4.01%
1212	250	13.89%	20.83%	1947.94	48.2	2.68%	4.02%
1190	260	14.44%	21.67%	1947.95	48.3	2.68%	4.03%
1163	270	15.00%	22.50%	1945.71	50	2.78%	4.17%
1131	280	15.56%	23.33%	1937.08	52	2.89%	4.33%
1094	290	16.11%	24.17%	1922.00	54	3.00%	4.50%
1051	300	16.67%	25.00%	1914.25	54.79	3.04%	4.57%
1003	310	17.22%	25.83%				
996	311.38	17.30%	25.95%				

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.55. Curva Fuerza Vs. Deriva Elástica



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

Figura 4.56. Curva Fuerza Vs. Deriva Inelástica



Fuente: Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.62. se muestra los valores del análisis de derivas, las mismas que se determinaron por medio de las ecuaciones plasmadas en las Figuras 4.55. y 4.56.

Se observa que la deriva elástica e inelástica supera el valor recomendado en los dos proyectos, sin embargo, se alcanzó el objetivo del presente estudio, al demostrar una notable disminución de estos valores en comparación a los obtenidos en el proyecto referente.

**Tabla 4.62. Análisis de Derivas**

Proyecto Herrera & Viterl				Proyecto Jaramillo & Torres			
ELÁSTICA		INELÁSTICA		ELÁSTICA		INELÁSTICA	
Δ máx (mm)	200.00	Δ máx (mm)	300.00	Δ máx (mm)	54.79	Δ máx (mm)	82.19
Deriva	11.22%	Deriva	16.83%	Deriva	3.04%	Deriva	4.57%
Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado		Supera el 2% recomendado	
Considerando		Considerando		Considerando		Considerando	
Deriva	2%	Deriva	2%	Deriva	2%	Deriva	2%
Δ (mm)	36	Δ (mm)	24	Δ (mm)	36	Δ (mm)	24
F (kg)	402.75	F (kg)	285.08	F (kg)	1697.73	F (kg)	1546.21
Considerando		Considerando		Considerando		Considerando	
V base (kg)	396.28	V base (kg)	396.28	V base (kg)	1195.76	V base (kg)	1195.76
Deriva	1.96%	Deriva	2.94%	Deriva	1.03%	Deriva	1.42%
Δ (mm)	35.28	Δ (mm)	35.32	Δ (mm)	18.56	Δ (mm)	25.64
Cumple recomendación		Supera el 2% recomendado		Cumple recomendación		Cumple recomendación	

**Fuente:** Elaborado por Jaramillo y Torres

En la Tabla 4.62. se constata que la deriva producida por el cortante basal del proyecto actual, cumple la recomendación del 2% establecido en la NEC, por lo que se considera que la estructura no sufriría daños importantes ante la ocurrencia de un sismo con las características para el que fue diseñado, definidas en la sección 3.4.9.

#### 4.7. ANÁLISIS VISUAL DE LAS ESTRUCTURAS ENSAYADAS

Mientras los ensayos se desarrollaban se originaron daños en los elementos estructurales de caña guadúa, y en la mampostería de ladrillo artesanal, generados por las cargas aplicadas en dirección de empuje y halado; estas evidencias de afectación surgieron a partir de la serie N°5, en los elementos de caña, y, en el caso de la mampostería, las fallas se intensificaron durante la última serie de cada ensayo.

En esta sección se realiza una revisión pormenorizada de los detalles y elementos de afectación, con su correspondiente análisis de correlación con los valores establecidos en el numeral 4.5.

#### **4.7.1. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CAÑA GUADÚA**

Durante el ensayo N°1 se observaron comportamientos no adecuados, tales como, desplazamientos irregulares y separación temprana de los largueros, evidenciando la deficiencia de su conexión con las columnas y entre ellos, lo cual impide que la estructura trabaje como un solo conjunto. Con el fin de mejorar lo expuesto anteriormente, se realizaron modificaciones al modelo original planteado en el proyecto referente, implementando ganchos “J” para el anclaje de los largueros de la cubierta con las columnas e instalando un perno con el propósito de unir estos largueros para que actúen en conjunto con toda la estructura. Con estas modificaciones se aseguró que la estructura trabaje a su máxima capacidad.

En las siguientes fotografías se describe cada uno de los daños desencadenados principalmente en las conexiones viga – columna.

En la Fotografía 4.1. se observa una separación entre los elementos estructurales, exponiendo al mortero que conforma su conexión, el cual impide un mayor deslizamiento del elemento viga, evitando el desprendimiento total de la estructura.

**Fotografía 4.1. Deslizamiento de Viga**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

La implementación del gancho “J” en la unión larguero-columna, ocasionó una falla por aplastamiento (Fotografía 4.2.), debido a que no fue posible el vertido de mortero en esta sección, ya que el peso que implicaría rellenar la separación existente entre esta unión y la conexión viga-columna, provocaría la rotura del diafragma interno de la columna de caña guadúa.

**Fotografía 4.2. Falla por Aplastamiento en Columna**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

En la Fotografía 4.3. se visualiza la falla por aplastamiento que se dio en el punto de aplicación de carga, a causa de la rotura del nudo interior de la columna de caña guadúa durante el vertido de mortero, provocando su descenso desde la conexión hacia la base de la columna. Este inconveniente ocurrió en la etapa de construcción de la estructura N°3, sin embargo, no se evidenció hasta la culminación del ensayo.

**Fotografía 4.3. Falla por Aplastamiento en Columna (Ensayo 3)**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

En la Fotografía 4.4. se aprecia una falla a corte en la viga de caña guadúa, provocada por el gancho “J”, al transmitir la fuerza horizontal de empuje y halado. El pasador imposibilita el desprendimiento total del larguero durante el ensayo.

**Fotografía 4.4. Falla a Corte en Viga**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

#### **4.4.1. MAMPOSTERÍA DE LADRILLO ARTESANAL**

Las fallas presentes en la mampostería surgieron debido a los diferentes tipos de esfuerzo producidos por la aplicación de carga lateral, los que se señalan en las próximas fotografías.

En la Fotografía 4.5. se exhibe una separación de la mampostería, separación que se encuentra en un rango de 5 a 10 mm con respecto a la estructura de caña. Los chicotes colocados garantizan la unión entre la estructura y la mampostería, evitando que exista una mayor separación entre ellas.

**Fotografía 4.5. Separación Mampostería**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

La falla a corte manifestada en la mampostería se puede distinguir en la Fotografía 4.6., con fisuramientos de entre 1 a 4 mm, esta fisura se observó con mayor claridad desde el interior de la estructura durante la aplicación de carga por empuje, siendo la primera en formarse. Sin embargo, al revertir la carga, se presentaron fisuras por

flexión de aproximadamente 4 mm de ancho, a una altura de 90 cm desde la base, como se observa en la Fotografía 4.7.

La combinación de estos dos tipos de falla, se manifestó en los dos paneles completos del lado izquierdo, con respecto al punto de aplicación de carga. Este lado se considera más rígido, debido a la distribución de mampostería, que consiste en dos paredes completas y una intermedia de 1m de altura; en comparación al lado derecho, que consta de dos paredes de 1m de altura y una intermedia completa.

**Fotografía 4.6. Falla a Corte en Mampostería**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

**Fotografía 4.7. Falla a Flexión en Mampostería**

**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

En la Fotografía 4.8. se aprecia la falla por tensión diagonal en mampostería, con una fisura de aproximadamente 3 mm de ancho y una longitud que no sobrepasó los 350 mm. Estas fallas se presentaron en el panel completo del lado derecho, que se encuentra en el eje paralelo al eje de aplicación de carga; y, se atribuyen a los

esfuerzos de tracción inclinados, que se generan por la libertad de movimiento de la mampostería en la parte superior, al encontrarse entre los dos muros de 1m de altura.

**Fotografía 4.8. Falla por Tensión Diagonal en Mampostería**



**Fuente:** Obtenido por Jaramillo y Torres

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Al finalizar los ensayos experimentales de carga lateral con inversión cíclica cuasi-estática, se determinó que los prototipos de este proyecto presentan un buen comportamiento sismo-resistente y un mejor resultado en cuanto a las derivas de piso, en comparación al Proyecto de Titulación de Herrera y Viteri, elaborado en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2017. Estos resultados se lograron gracias a la favorable interacción entre la estructura de caña guadúa y la mampostería de ladrillo artesanal.
- En el ensayo de compresión realizado en los mampuestos, se obtuvo una resistencia de 2.37 MPa, siendo un valor muy bajo en relación a los 14 MPa mínimos requeridos según la Norma INEN 3049 Parte 3 - 2019, por tanto, se concluye que el ladrillo artesanal que se comercializa en nuestro medio, no cumple con las especificaciones establecidas para su uso en la construcción; a pesar de ello, este material cumplió el objetivo de rigidizar la estructura para disminuir los desplazamientos.
- En las conexiones viga-columna (Simón Vélez modificada), no se visualizaron daños significativos, permitiendo que la estructura trabaje como un solo conjunto.
- En las uniones de los largueros con las columnas si se presentaron daños, ya que en éstas no se utilizó mortero, provocando una separación parcial de los elementos por el movimiento de la estructura.
- Durante el ensayo N°1 se desprendieron los largueros de las columnas, por esta razón, se decidió mejorar esta unión, incorporando ganchos “J” y un

perno de 3/4" en el centro de la cubierta, de manera que se fijen los largueros a la estructura, evitando que exista torsión durante la aplicación de carga.

- En la construcción del prototipo N°3, el mortero de la conexión ubicada en el punto de aplicación de carga, descendió hacia la base, debido a la rotura del diafragma interior de la columna de caña guadúa; este inconveniente ocasionó una falla por aplastamiento en la columna, finalizando el ensayo.
- La forma de las curvas envolventes de los dos proyectos de titulación, presentadas en la Figura 4.8., tienen una tendencia polinómica de segundo grado, con la diferencia de que en la curva de este estudio sobresale un pico, el cual alcanza una carga máxima de 2077 kg y un desplazamiento de 58 mm; en cuanto al proyecto de Herrera y Viteri, se muestra una curva más aplanada, llegando a la carga máxima de 1420 kg y desplazamiento de 341 mm. Por lo tanto, se deduce que las estructuras reforzadas con mampostería, poseen mayor resistencia y rigidez ante una carga lateral.
- En el proyecto de Herrera y Viteri se disipó energía un 58% más que en el presente estudio, dando como resultado valores de 5.2356 kJ y 3.3232 kJ, respectivamente. Esta diferencia se aprecia en el numeral 4.6.2 y es consecuencia de la libertad de movimiento que posee la estructura de caña guadúa sin mampostería, permitiendo una mayor disipación de energía mediante sus deformaciones.
- Debido a la restricción de movimiento propiciada por la mampostería y los tensores añadidos en la cubierta, la rigidez secante en este proyecto es excesivamente mayor en relación con el proyecto de Herrera y Viteri, con valores máximos promedios de 1160.24 kN/m y 143.77 kN/m, respectivamente, como se observa en la Figura 4.50.
- La relación que existe entre la energía disipada y la energía absorbida es mayor en este estudio, en una proporción 3:2 respecto al proyecto de Herrera y Viteri; por lo tanto, las estructuras del proyecto actual presentan

mayores amortiguamientos viscosos equivalentes, como se aprecia en la Figura 4.52., con un promedio de 15.38%, en comparación con el 10.18% del referente.

- Las estructuras de este proyecto, reflejan una mejor respuesta ante la acción de un esfuerzo cortante; esto se evidencia en la Tabla 4.60., donde la relación entre las resistencias a cortante es de 3:2 y la relación entre los módulos de corte es 7:1, respecto al proyecto de Herrera y Viteri.
- La capacidad que poseen los prototipos para deformarse ante la aplicación de carga lateral, fue superior en el proyecto de Herrera y Viteri, generando una ductilidad de 2.99; mientras que, en el presente proyecto, se determinó un valor de 2.32, debido a la restricción de movimiento, asociada a la implementación de mampostería. Estos valores se muestran en la Tabla 4.60.
- En los dos proyectos, el factor de reducción de resistencia sísmica se aproxima a 2, comprobando que se cumple el requisito establecido en la NEC-SE-GUADÚA para construcciones con pórticos y diagonales de caña guadúa *Angustifolia Kunth*.
- La estabilidad de las estructuras fue verificada mediante la condición definida en la NEC-SE-DS, la cual indica que el índice  $Q_i$  debe ser menor o igual a 0.3; este requerimiento se constató al obtener valores dentro de este rango, obteniendo 0.20 en el proyecto de Herrera y Viteri y 0.05 en el proyecto actual, con esto se demuestra estabilidad en todas las estructuras ensayadas.
- El cortante basal en este estudio es significativamente mayor, debido al peso que aporta la mampostería a la estructura original, planteada en el proyecto de Herrera y Viteri. Esto se evidencia en la Figura 4.54., donde se muestran

los valores de 1195.76 kg para este proyecto y 396.28 kg para el proyecto referente.

- En las dos investigaciones, el análisis de derivas no es indispensable, puesto que el cortante basal es menor a la resistencia lateral de la estructura, como se indica en la Figura 4.54., cumpliendo lo que se especifica en la NEC-SE-VIVIENDA-Parte 1 para acciones sísmicas de diseño.
- Pese a que el análisis de derivas de piso en este proyecto no fue necesario, se lo realizó para demostrar que la propuesta de implementar mampostería, cumple el objetivo de disminuir dichas derivas respecto al proyecto de Herrera y Viteri. Esta comparación se aprecia en la Tabla 4.61., donde se evidencia que a pesar de no cumplir el 2% recomendado en la NEC, existe una reducción del 14.26% para la deriva elástica y 21.38% para la inelástica.
- Con la implementación de la mampostería, se evitó que los daños ocasionados tras el ensayo se produzcan en los elementos estructurales y en sus conexiones.
- Se realizó el análisis visual de los modelos ensayados, encontrando tres tipos de falla en los paneles de mampostería completa; dichas fallas fueron ocasionadas por esfuerzos de flexión, tensión diagonal y corte.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de caña guadúa para construcciones debido a su bajo costo, relación peso-resistencia y versatilidad, sin olvidar que es un recurso renovable y amigable con el ambiente. El sistema de construcción con mampostería, aporta rigidez y estabilidad, no obstante, la selección del tipo de mampuesto más adecuado para estructuras de caña guadúa, todavía es un tema que requiere investigación, por lo que se propone realizar estudios con diferentes mampuestos como bloque o ladrillo industrial.
- Para la construcción de estructuras de caña guadúa, se aconseja seleccionar culmos maduros, para evitar rajaduras, y con diámetros semejantes, con el objetivo de que las propiedades físicas y mecánicas no varíen entre sí, logrando una estructura simétrica y un mejor comportamiento sismo-resistente.
- Al momento de rellenar las uniones con mortero, se debe verificar que éste se encuentre en un estado semilíquido e ir vertiéndolo cuidadosamente, para prevenir la rotura del diafragma interior y su esparcimiento por todo el elemento.
- Para futuras investigaciones, se sugiere que para la construcción del prototipo se considere la fecha de su ensayo, ya que al no utilizar preservantes químicos en los culmos de caña, se pueden producir fisuras prematuras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Guerrero, S. F. (2014). *OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLA DE ARCILLA PARA LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS, EN EL SECTOR ARTESANAL*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Arquíñigo Trujillo, W. N. (2011). *PROPUESTA PARA MEJORAR LA CALIDAD ESTRUCTURAL DE LOS LADRILLOS ARTESANALES DE ARCILLA COCIDA DE HUANUCO*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- ASTM E2126. (2011). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*.
- ASTM E2126-19. (2019). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- Barranzuela Lescano, J. (2014). *PROCESOS PRODUCTIVOS DE LOS LADRILLOS DE ARCILLA PRODUCIDOS EN LA REGIÓN PIURA*. Piura: Universidad de Piura.
- Camara Anculli, M. E. (2015). *ESTUDIO DE LAS UNIDADES DE ARCILLA CALCINADA SEMI INDUSTRIAL CASO LADRILLERIA CHOQUE Y APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE UN EDIFICIO DE 4 PISOS*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Capua, D. d., Pérez Gracia, M. d., & Gonzalez Drigo, J. R. (2010). *Análisis estructural de muros de mampostería asistido mediante fotografía digital para la generación de la malla*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Carrillo León, W. J. (2004). *MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO INELÁSTICO DE PÓRTICOS DE CONCRETO CON MAMPOSTERÍA NO REFORZADA*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Carrillo, J., & González, G. (2007). *INFLUENCIA DE LA MAMPOSTERÍA NO REFORZADA EN EL COMPORTAMIENTO INELÁSTICO DE PÓRTICOS DE CONCRETO*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Chávez Anyosa, Á. L. (2017). *ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LADRILLOS DE ARCILLA CALCINADA EN LAS PRINCIPALES LADRILLERAS DE LA REGIÓN AREQUIPA Y SU CAPACIDAD MÁXIMA EN UNA EDIFICACIÓN*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. México: Pearson Educación.
- Condori Apaza, M. (2013). *Impactos socioambientales por la fabricación de ladrillos en Huancayo*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Díaz, A. (2016). *Análisis comparativo: usos de bambú vs perfiles de acero para cobertura liviana. (Tesis de Ingeniería)*. Arequipa: Universidad Nacional de SAn Agustín.
- Espinosa Jarrín, O. X. (2018). *PRÁCTICAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO SISMO-RESISTENTE DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL DE HORMIGÓN Y ARCILLA*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Herrera Vaca, J. J., & Viteri Aguirre, L. A. (2017). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SISMO-RESISTENTE EN UNA ESTRUCTURA ESPACIAL DE CAÑA GUADUA SOMETIDA A CARGA LATERAL CON INVERSIÓN, UTILIZANDO UNA MODIFICACIÓN DE LA CONEXIÓN SIMÓN VÉLEZ*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Lema Narváez, S. P., & Méndez Estévez, J. P. (2019). *Determinación del desempeño de estructuras aporticadas de hormigón armado con y sin mampostería en la ciudad de Quito*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

- López, J., Oller, S., & Oñate, E. (1998). *CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS*. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Mendoza Castro, J. A., & Rosales Salcedo, J. N. (2014). *USO DE LA CAÑA GUADÚA EN LA VIVIENDA MODULAR*. Cuenca: UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Morán Ubidia, J. (2005). *Construir con Bambú, Manual de Construcción*. Lima: Red Internacional del Bambú y el Ratán - INBAR.
- NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-1. (2015). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*.
- NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-2. (2015). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*.
- NEC-SE-GUADÚA. (2016). *Estructuras de guadúa (GaK)*.
- NEC-SE-VIVIENDA-parte-1. (2015). *Viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5m*.
- NEC-SE-VIVIENDA-parte-2. (2015). *Viviendas de hasta dos pisos con luces de hasta 5m*.
- Novilos Valiente, J. C., & Yacelga Díaz, J. G. (2010). *Estudio de conexiones entre elementos estructurales de caña guadua sometidos a carga axial (Tesis de Ingeniería)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.
- NTC 5525. (2007). *MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- NTE INEN 3049 Parte 3. (2019). *LADRILLOS CERÁMICOS. PARTE 3: UNIDADES DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL. REQUISITOS*. Quito: Servicio Ecuatoriano de Normatización.

- NTE INEN 3049 Parte 5. (2019). *LADRILLOS CERÁMICOS. PARTE 5: MÉTODOS DE ENSAYO*. Quito: Servicio Ecuatoriano de Normalización.
- Rea Lozano, V. (2012). *USO DE LA CAÑA GUADÚA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN: EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rochel, R. (2012). *INFLUENCIA DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS APORTICADAS: UNA EXPLICACIÓN A LOS DAÑOS POR LOS SISMOS DE OCTUBRE DE 1992 EN MEDELLÍN*. Medellín: Revista Universidad EAFIT.
- Rodriguez, J. C. (23 de Junio de 2006). *El babú como material de construcción*. Obtenido de Conciencia Tecnológica: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403115>
- Rojas Rodríguez, R., Cortés Aburto, O., & Marín Dávila, C. (s.f.). *Perspectivas de Automatización del Proceso de Fabricación de Ladrillo Rojo en la Región de Cholula, Puebla*. Puebla: Universidad Politécnica de Puebla.
- Rosas Tapia, C. E., & Torres Maldonado, A. E. (2014). *UTILIZACIÓN DEL LADRILLO EN ACABADOS CONSTRUCTIVOS. (Propuesta morfológica)*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Villegas, M. (2005). *Guadua: Arquitectura y Diseño*. Colombia: Ediciones Villegas y Editores.