



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE  
CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA**

**Telma Lorena Cermeño Dávila**

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE  
CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**TELMA LORENA CERMEÑO DÁVILA**

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de mayo de 2019.

**Telma Lorena Cermeño Dávila**



Guatemala, 16 de junio de 2022

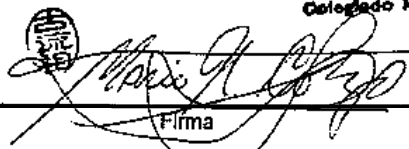
Ing. Armando Fuentes Roca  
Director de Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente:

Estimado Ingeniero Fuentes:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS DE LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA**, presentado por el estudiante Telma Lorena Cermeño Dávila, quien se identifica con registro académico 201504114 y con el CUI 3013281960101.

Considero que el trabajo de graduación se ha desarrollado satisfactoriamente y cumple con los objetivos que motivaron a la selección de dicho tema, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado. Sin otro particular, atentamente

Mario Rodolfo Corzo A.  
INGENIERO CIVIL  
Colegiado No. 2089



Firma

Mario Rodolfo Corzo Ávila  
Ingeniero Civil  
Colegiado 2089

Guatemala, 27 de septiembre de 2,022

Ingeniero  
Armando Fuentes Roca  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación “REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA”, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil, Telma Lorena Cermeño Dávila, quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco  
**Jefe de área de materiales y construcciones civiles.**



LNG.DIRECTOR.219.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA**, presentado por: **Telma Lorena Cermeño Dávila**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

Ing. Armando Fuentes Roca  
Director  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, octubre de 2022





Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.703.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LAS UNIONES DE LA LOSA Y SOLERA DE CORONA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA**, presentado por: **Telma Lorena Cermeño Dávila**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, octubre de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su bondad y misericordia infinita al brindarme sabiduría a lo largo de mi vida.
- Mis padres** Celerino de Jesús Cermeño Ramírez y Maira Amarilis Dávila Estrada de Cermeño. Por su amor incondicional, sabiduría y paciencia. Por enseñarme que el conocimiento es la mejor arma ante la adversidad.
- Mis hermanas** Brenda Cermeño y Diana Cermeño. Por su amor, apoyo y paciencia. Por ser hermanas ejemplares, eruditas de la ingeniería y mis mejores amigas. Las admiro y las quiero mucho.
- Mis papitos** Vicente Dávila Cortez. Por su amor, apoyo incondicional e ingeniosa hilaridad. Vicente Cermeño. Por su amor, cariño y las enseñanzas de sabiduría y perseverancia, que en paz descansa.
- Mis mamitas** Rosaura Ramírez Gálvez. Por su amor tierno y paciente, por sus sabias enseñanzas de fe y humildad. Sofía Estrada Castillo. Por sus ingeniosas enseñanzas, su amor y su apoyo incondicional para cumplir un sueño compartido.

A ambas por enseñarme la dicha de ser mujer, de ser humana. Que en paz descansen.

**Mis tíos**

Por su apoyo incondicional y las oportunidades que me han dado para crecer como persona y como profesional.

**Mis primas**

Vanessa Batres y Sofía Batres. Por acompañarme en momentos difíciles y apoyarme cuando más lo necesitaba. Angie Moreno y Lilian Moreno. Por traer felicidad, amor y alegría a mi vida.

**Mis padrinos**

Érica Dávila Estrada. Por siempre creer en mí y darme la oportunidad de crecer como mujer profesional. Iris Beatriz Rodríguez Cermeño y Guillermo López. Por ser ejemplos de calidad humana y emprendedores perseverantes. Por ser un ejemplo de profesionales con principios, ética y valores intachables.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de formarme como profesional y retribuir al pueblo el conocimiento adquirido. Que este estudio sea de utilidad para el país, esto es para el pueblo.

**Facultad de Ingeniería**

Por brindarme las armas para formarme como profesional y aportar a la academia, a la ciencia y al país.

**Mis amigos de la Facultad**

Ruth Sajché, Jorge Delgado, Kevin Anaya y Christopher Ramos. Por acompañarme a lo largo de la carrera, en los buenos y malos momentos, por su amistad, apoyo y cariño, gracias por creer en mí. Karina Godínez, Steven España, Edwin Márquez, Fredy Mérida y Ulysses Fletcher, por confiar en mí y dar su apoyo incondicional.

**Mis mejores amigos**

Lázaro García, Ingrid Chinchilla y Lila Borrayo. Por su amistad incondicional y duradera, por darme su apoyo por años, por ser seres constantes en mi vida. Gracias por las palabras de aliento, por estar en todo momento y por ser parte de mi vida. Los quiero.

**Ing. Mario Corzo**

Por impulsarme como profesional y compartir sus conocimientos sin egoísmo. Por enseñarme el verdadero sentido de la ingeniería y la ciencia. Por enseñarme a abrir la mente y espíritu.

**Ing. Mario Cuté**

Por su apoyo, colaboración y solidaridad académica para el análisis e interpretación estructural de este trabajo de graduación.

**Colaboradores del Área de Prefabricados**

Por brindar su conocimiento técnico con entusiasmo y por su apoyo para ejecutar este estudio.

**Compañeros practicantes de Estructuras, CII**

Por su apoyo y esfuerzo brindado para llevar a cabo este estudio.

**La comunidad sabandija**

Por compartir sus conocimientos de forma incondicional, por enseñarme el sentido de fraternidad.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XVII
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Estudios realizados previamente.....	1
1.1.1. Metodología aplicada en estudios previos realizados .....	2
1.1.2. Resultados y conclusiones de estudios previos realizados .....	3
1.2. Restricciones en los extremos y longitud efectiva en una columna en acero .....	13
1.2.1. Marco arriostrado y marco no arriostrado.....	16
1.3. Sistemas de mampostería .....	16
1.3.1. Clasificación según su función estructural.....	16
1.3.1.1. Mampostería estructural .....	16
1.3.1.2. Mampostería no estructural .....	17
1.3.2. Clasificación según su metodología constructiva ...	17
1.3.2.1. Mampostería simple .....	17
1.3.2.2. Mampostería reforzada.....	18
1.3.2.3. Mampostería confinada .....	19
1.4. Comportamiento de sistemas estructurales de mampostería..	20

1.4.1.	Funcionamiento de los muros de mampostería dentro del sistema .....	20
1.4.2.	Funcionamiento de diafragmas dentro del sistema ...	22
1.4.3.	Funcionamiento de soleras dentro del sistema .....	24
1.4.4.	Tipos de falla en sistemas de mampostería .....	25
2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EVALUADO: LOSA TIPO VIGUETA-BOVEDILLA CON MURO REFORZADO .....	29
2.1.	Descripción de los elementos y diseño del sistema .....	29
2.1.1.	Losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla .....	29
2.1.2.	Muros o muretes reforzados.....	35
2.2.	Ventajas y desventajas del sistema .....	36
3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EVALUADO: LOSA TIPO VIGUETA-BOVEDILLA CON MURO REVESTIDO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	39
3.1.	Descripción de los elementos y diseño del sistema .....	39
3.1.1.	Losa fundida en sitio tipo vigueta y bovedilla .....	39
3.1.2.	Muros con columnas tipo poste o pin .....	42
3.2.	Ventajas y desventajas del sistema .....	45
4.	FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA UNIÓN LOSA-MURO EN UN SISTEMA .....	47
4.1.	Rigidez del sistema muro-losa .....	47
4.1.1.	Rigidización con tensores en diagonal .....	48
4.1.2.	Vigas colectoras en diafragmas flexibles.....	48
4.2.	Efectos de las cargas laterales sobre sistemas de mampostería .....	49
4.3.	Conexiones entre diafragmas y muros.....	50

4.4.	Otras formas de rigidización de sistemas estructurales elementales .....	53
4.5.	Consideraciones de diseño de conexiones viga-columna según ACI 352RS-02.....	57
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	59
5.1.	Metodología y diseño del experimento para el sistema losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado .....	59
5.1.1.	Equipo utilizado .....	59
5.1.2.	Materiales .....	59
5.1.3.	Metodología de ensayo .....	60
5.1.4.	Datos obtenidos.....	66
5.1.5.	Resultados: gráficas y comparaciones del sistema .....	68
5.1.5.1.	Primer ensayo dinámico .....	68
5.1.5.2.	Segundo ensayo dinámico .....	69
5.1.5.3.	Tercer ensayo dinámico .....	71
5.1.5.4.	Comparación del sistema sin arriostrar con el sistema arriostrado ....	73
5.2.	Metodología y diseño del experimento para el sistema losa tipo vigueta-bovedilla con muro revestido con poliestireno expandido .....	76
5.2.1.	Equipo utilizado .....	76
5.2.2.	Materiales .....	76
5.2.3.	Metodología de ensayo .....	77
5.2.4.	Datos obtenidos.....	81
5.2.5.	Gráficas carga vs deformación en sistema sin arriostrar .....	85

5.2.6.	Gráficas carga vs deformación en sistema arriostrado .....	96
5.2.7.	Cálculos del análisis estructural para el sistema sin arriostrar .....	100
5.2.7.1.	Cargas del sistema sin arriostrar.....	100
5.2.7.2.	Análisis estructural del sistema sin arriostrar por medio del método de Kani.....	100
5.2.8.	Cálculos del análisis estructural para el sistema arriostrado .....	105
5.2.8.1.	Cargas del sistema arriostrado.....	105
5.2.8.2.	Análisis estructural del sistema arriostrado por medio del método de Kani.....	106
6.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	111
6.1.	Análisis del sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado.....	111
6.1.1.	Comparación del sistema arriostrado y sin arriostrar en el sentido horizontal .....	111
6.1.2.	Comparación del sistema arriostrado y sin arriostrar en el sentido vertical .....	112
6.1.3.	Relación de ambos sentidos de deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar .....	112
6.2.	Análisis del sistema losa tipo vigueta-bovedilla con muro revestido con poliestireno expandido .....	117
6.2.1.	Comportamiento del sistema losa tipo vigueta-bovedilla de muro revestido con poliestireno expandido sin arriostrar.....	118



6.2.2.	Comportamiento del sistema losa tipo vigueta-bovedilla de muro revestido con poliestireno expandido arriostrado .....	120
6.2.3.	Comparación del sistema arriostrado y sin arriostrar .....	123
6.3.	Análisis de la metodología empleada para arriostramiento y ensayo en ambos sistemas .....	130
6.3.1.	Comparación de metodologías entre el sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado con sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro revestido de poliestireno expandido .....	134
CONCLUSIONES .....		137
RECOMENDACIONES .....		139
REFERENCIAS .....		141
APÉNDICES .....		145



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esfuerzo-deformación en primer ensayo de carga vertical.....	5
2.	Esfuerzo-deformación en segundo ensayo de carga vertical .....	8
3.	Carga-deformación de ensayo con carga horizontal .....	11
4.	Carga horizontal vs. Deformación vertical .....	12
5.	Longitudes efectivas (KL) de columnas en marcos arriostrados (ladeo impedido).....	14
6.	Ejemplo de deflexión lateral en un marco simple (no arriostrado).....	15
7.	Muros divisores de mampostería simple .....	18
8.	Refuerzo en un muro de mampostería de concreto reforzada localizado en CDS D .....	19
9.	Muro de mampostería confinada .....	20
10.	Diagrama de los planos dimensionales de trabajo de la mampostería .....	21
11.	Diafragma semi-rígido o flexible .....	23
12.	Diafragma rígido .....	23
13.	Acero de refuerzo mínimo para soleras.....	25
14.	Tipos de falla en muros de mampostería .....	26
15.	Deflexión de viguetas en la losa .....	30
16.	Sección transversal de vigueta.....	31
17.	Detalle de bovedilla .....	32
18.	Vista en planta del sistema y detalle del gancho U .....	33
19.	Detalle del gancho U en el sistema .....	34
20.	Detalle de sección longitudinal del sistema .....	35

21.	Detalle de muros en el sistema .....	36
22.	Planta de losa .....	40
23.	Armado de vigueta monolítica sin muro .....	41
24.	Armado de vigueta monolítica sobre muro.....	42
25.	Vista elevada del sistema .....	43
26.	Detalle de muro con ventana .....	44
27.	Detalle de muro sólido .....	45
28.	Tensores diagonales en un diafragma flexible.....	48
29.	Uso de vigas colectoras en un diafragma flexible .....	49
30.	Refuerzo adicional .....	53
31.	Edificios rigidizados con muros de concreto acoplados.....	55
32.	Edificios rigidizados con contravientos.....	56
33.	Placas metálicas .....	60
34.	Placas colocadas en sistema.....	61
35.	Placas a rostros externos.....	62
36.	Placas a rostros internos.....	63
37.	Configuración de madera en el sistema.....	64
38.	Placas a rostros externos en el sistema.....	64
39.	Vista general del sistema ensayado.....	65
40.	Diagrama de metodología de carga en el sistema.....	65
41.	Curva de deformación horizontal primer ensayo dinámico sin arriostrar.....	68
42.	Curva de deformación vertical primer ensayo dinámico sin arriostrar...	69
43.	Curva de deformación horizontal segundo ensayo dinámico sistema arriostrado.....	70
44.	Curva de deformación vertical segundo ensayo dinámico sistema arriostrado.....	71
45.	Curva de deformación horizontal tercer ensayo dinámico sistema arriostrado.....	72

46.	Curva de deformación vertical tercer ensayo dinámico sistema arriostrado .....	73
47.	Comparación de deformaciones horizontales sistema arriostrado y sin arriostrar .....	74
48.	Comparación de deformaciones verticales sistema arriostrado y sin arriostrar .....	75
49.	Placas biela ancladas a rostro interno.....	78
50.	Placas rígidas ancladas a rostros externos .....	78
51.	Sistema poleas y dinamómetro .....	79
52.	Extremo halado por cables.....	80
53.	Cables de tensión que rodean el sistema.....	80
54.	Medición de deformaciones en los nudos .....	81
55.	Carga vs deformación en el muro sólido, al centro del rostro interno del muro sólido y en el muro con ventana, primera prueba.....	86
56.	Carga vs deformación en el muro sólido, al centro del rostro interno del muro sólido y en el muro con ventana, segunda prueba .....	87
57.	Carga vs deformación del muro con ventana .....	88
58.	Carga vs deformación al centro del rostro interno del muro sólido.....	89
59.	Carga vs deformación del muro sólido .....	90
60.	Carga vs deformación a la base del muro sólido.....	91
61.	Carga vs deformación del muro con ventana .....	92
62.	Carga vs deformación al centro del rostro interno del muro sólido.....	93
63.	Carga vs deformación del muro sólido .....	94
64.	Carga vs deformación en la base del muro sólido.....	95
65.	Carga vs deformación de muro con ventana.....	96
66.	Carga vs deformación al centro del rostro interno del muro sólido.....	97
67.	Carga vs deformación de muro sólido .....	98
68.	Carga vs deformación a la base del muro sólido.....	99
69.	Diagrama de cargas del sistema sin arriostrar .....	101

70.	Diagrama de iteraciones de Kani .....	104
71.	Diagrama de momentos finales del sistema sin arriostrar, en kg-m....	105
72.	Diagrama de cargas del sistema arriostrado.....	106
73.	Diagrama de iteraciones de Kani .....	110
74.	Diagrama de momentos finales sistema arriostrado, en kg-m .....	110
75.	Relación horizontal-vertical del sistema sin arriostrar .....	113
76.	Resultante de deformaciones verticales-horizontales sistema sin arriostrar.....	114
77.	Relación horizontal-vertical del sistema arriostrado .....	115
78.	Resultante de deformaciones verticales-horizontales sistema arriostrado.....	116
79.	Carga-deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar del muro con abertura.....	124
80.	Carga-deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar del muro sin abertura .....	126
81.	Carga-deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar a H/2 del muro sin abertura .....	127
82.	Efecto generado en perno del muro para anclaje de placas biela .....	131
83.	Efecto generado en perno de losa para anclaje de placas biela .....	131
84.	Efecto generado en perno de losa para anclaje de placas totalmente rígidas .....	132
85.	Carga-deformaciones horizontales en ambos sistemas comparando muro 1 .....	134
86.	Carga-deformaciones horizontales en ambos sistemas comparando muro 2.....	135

## TABLAS

I.	Datos de primer ensayo en losa con carga vertical.....	4
II.	Datos de segundo ensayo en losa con carga vertical .....	7
III.	Datos de tercer ensayo en losa con carga horizontal.....	10
IV.	Datos de carga horizontal .....	12
V.	Datos obtenidos primer ensayo dinámico. Sistema sin arriostrar .....	66
VI.	Datos obtenidos segundo ensayo dinámico. Sistema arriostrado .....	67
VII.	Datos obtenidos tercer ensayo dinámico. Sistema arriostrado .....	67
VIII.	Deriva máxima del sistema .....	77
IX.	Deformación en muros, primer ensayo. Sistema sin arriostrar.....	82
X.	Deformación en muros, segundo ensayo. Sistema sin arriostrar .....	82
XI.	Deformación en muros, tercer ensayo. Sistema sin arriostrar.....	83
XII.	Deformación en muros, cuarto ensayo. Sistema sin arriostrar .....	84
XIII.	Deformación en muros, quinto ensayo. Sistema arriostrado.....	85
XIV.	Integración de cargas del sistema sin arriostrar .....	100
XV.	Datos generales del sistema sin arriostrar .....	101
XVI.	Cargas totales en el sistema sin arriostrar .....	102
XVII.	Relación de inercia de elementos .....	102
XVIII.	Rigidez en elementos.....	102
XIX.	Factores de Kani .....	103
XX.	Momentos de Kani .....	103
XXI.	Momentos finales del sistema sin arriostrar .....	103
XXII.	Integración de cargas del sistema arriostrado.....	106
XXIII.	Datos generales del sistema arriostrado .....	107
XXIV.	Cargas totales en el sistema arriostrado .....	107
XXV.	Relación de inercia de elementos .....	108
XXVI.	Rigidez en elementos.....	108
XXVII.	Factores de Kani .....	108

XXVIII.	Momentos de Kani .....	109
XXIX.	Momentos finales del sistema arriostrado.....	109
XXX.	Amplitudes de curva en muro sólido .....	119
XXXI.	Porcentaje de momento redistribuido por arriostramiento .....	129



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$q_x$	Acción de corte en diafragma, en kg.
$H$	Altura total de un elemento estructural a ejes, en m.
$W$	Ancho de un elemento estructural, en m.
$A_{vf}$	Área de refuerzo de cortante por fricción a lo largo del muro, en $cm^2$ .
$V_c$	Capacidad del concreto o esfuerzo correspondiente a la resistencia nominal a cortante de dos direcciones proporcionada por el concreto, en $kg/cm^2$ .
$P$	Carga axial, en kg.
$W_x$	Carga fuera del plano de corte y momento en un diafragma, en kg.
$DL$	Carga muerta, en $kg/m^2$ .
$U$	Carga última, en $kg/m$ .
$LL$	Carga viva, en $kg/m^2$ .
$cm$	Centímetro.
$cm^2$	Centímetro al cuadrado que representa un área.
$V_u$	Cortante último total a lo largo del muro, en kg.
$\Delta$	Deriva, desplazamiento, deformación, en cm o mm.
$\Delta_{MÁX}$	Deriva, desplazamiento o deformación, máximo, en cm o mm.
$\Delta_{MÁXH/2}$	Desplazamiento o deformación máxima a la mitad del muro revestido con poliestireno expandido, en mm.

<b>t</b>	Dimensión de espesor de un diafragma en un diagrama de cuerpo libre, en cm.
<b>l</b>	Dimensión de muro que representa el ancho en un diagrama de cuerpo libre, en cm.
<b>h</b>	Dimensión que representa la altura de un muro en un diagrama de cuerpo libre, o el espesor total de losa, en cm.
<b>v<sub>u</sub></b>	Esfuerzo máximo de cortante de dos direcciones mayorado calculado alrededor del perímetro de una sección crítica dada o cortante por metro de unión losa-muro, en kg/cm <sup>2</sup> .
<b>d</b>	Espesor efectivo de la losa (0.80h), en cm.
<b>v-</b>	Factor de corrimiento por nodo en Kani, adimensional.
<b>e</b>	Factor de eficiencia del arriostramiento en el sistema, adimensional.
<b>μ-</b>	Factor de giro en Kani, adimensional.
<b>F<sub>f</sub></b>	Fuerza de fijación en método Kani, en kg.
<b>°</b>	Grados que representa un ángulo.
<b>kg</b>	Kilogramos-fuerza.
<b>kg-m</b>	Kilogramos por metro lineal que representa un momento.
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramos sobre centímetro cuadrado que representa una fuerza sobre área.
<b>kg/m<sup>2</sup></b>	Kilogramos sobre metro cuadrado que representa una fuerza sobre área.
<b>kg/m</b>	Kilogramos sobre metro lineal que representa una carga distribuida.
<b>lb</b>	Libra-fuerza.
<b>b</b>	Longitud del muro, en cm.

<b><math>L_e</math></b>	Longitud efectiva de un elemento estructural, en m.
<b><math>\ell</math></b>	Longitud total de la losa en el sistema revestido con poliestireno expandido.
<b>L</b>	Longitud total de un elemento o sistema estructural, en m.
<b>m</b>	Metro.
<b><math>m^2</math></b>	Metro al cuadrado.
<b>mm</b>	Milímetro.
<b>M-</b>	Momentos del análisis estructural por nodo, en kg-m.
<b>I</b>	Momento de inercia de un elemento, en $\text{cm}^4$ .
<b><math>M_p</math></b>	Momento de piso en Kani, en kg-m.
<b><math>M_{xy}</math></b>	Momento generado en el diafragma, en kg-m.
<b><math>m_B</math></b>	Pendiente entre dos puntos en curva de deformaciones del sistema arriostrado, adimensional.
<b><math>m_A</math></b>	Pendiente entre dos puntos en curva de deformaciones del sistema sin arriostrar, adimensional.
<b>%</b>	Porcentaje.
<b>“</b>	Pulgadas.
<b><math>f'_c</math></b>	Resistencia especificada a la compresión del concreto, en $\text{kg}/\text{cm}^2$ .
<b><math>f_y</math></b>	Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo no preesforzado, en $\text{kg}/\text{cm}^2$ .
<b>K</b>	Rigidez de un sistema o elemento estructural.



## GLOSARIO

<b>ACI</b>	<i>American Concrete Institute.</i>
<b>ACI 318-14</b>	Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y comentarios complementarios por <i>American Concrete Institute.</i>
<b>ACI 352RS-02</b>	Recomendaciones para diseño de conexiones vigas-columnas en estructuras monolíticas de concreto reforzado por <i>American Concrete Institute.</i>
<b>ACI 530-11</b>	Requisitos y especificaciones del código de construcción para estructuras de mampostería y comentarios complementarios por <i>American Concrete Institute.</i>
<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>Arriostramiento</b>	Rigidizar un sistema por medio de la colocación de elementos que den dureza en puntos críticos.
<b>Biela</b>	Elemento articulado para transmitir longitudinalmente movimiento entre dos partes de un mecanismo.

<b>Deformación</b>	Cambio de forma lineal de un elemento debido a una fuerza externa que actúa sobre este.
<b>Desplazamiento</b>	Consiste en el movimiento lineal de un elemento estructural que modifica su forma debido a una fuerza externa.
<b>Diafragma</b>	Elementos en un sistema que distribuyen fuerzas laterales a otros elementos estructurales del sistema.
<b>Elástico/a</b>	Condición en la que un elemento se deforma recuperando su forma cuando cesa la fuerza que lo altera.
<b>Fallas</b>	Efectos irreversibles de un sistema al ser sometido a fuerzas externas, que pueden ser frágiles o dúctiles.
<b>FHA</b>	Instituto de Fomento de Hipotecas Aseguradas.
<b>Flexión</b>	Deformación que presenta un elemento estructural en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.
<b>Grout</b>	Lechada de rejunte especializado para relleno de espacios sin contracción, sino expansión positiva.
<b>Hilti</b>	Marca de un tipo de perno utilizado para anclaje.

<b>Histéresis</b>	Curva que representa la tendencia de un material de conservar ciertas propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.
<b>Inelástico</b>	Condición en la que un elemento se deforma sin recuperar su forma cuando cesa la fuerza que lo altera.
<b><i>Joist</i></b>	Armadura o nervio de acero en viguetas para losas prefabricadas tipo vigueta-bovedilla fabricados con varilla de alta resistencia.
<b>Junta fría</b>	Plano débil no tratado causado por la interrupción de suministro de mezcla en el vaciado que puede afectar de manera considerable el desempeño de un sistema estructural.
<b>Mampostería</b>	Tipo de sistema construcción que consiste en el levantado de muros por medio de la colocación manual de elementos.
<b>Mamposte</b>	Elementos de roca volcánica, suelo apelmazado u otros materiales utilizados para elaboración de muros.
<b>Método Kani</b>	Método exacto para análisis estructural que se basa en las aproximaciones sucesivas y en la distribución de momentos para expresar el efecto de las rotaciones y desplazamientos nodales.

<b>Nudo</b>	Punto donde se conectan elementos de viga-losa-columna, o bien losa-muro en un sistema.
<b>Preesforzado</b>	Condición de un elemento estructural que ha sido sometido a esfuerzos permanentes previamente a su uso.
<b>Remanente</b>	Que queda o se reserva para algo.
<b>Resiliencia</b>	Capacidad de un elemento estructural de recuperarse después de haber sido sometido a esfuerzos sin fallar.
<b>Solera</b>	Vigas que conforman los muros de mampostería. Pueden ser de humedad, intermedias y de corona.
<b>Tenacidad</b>	Energía de deformación total que absorbe un elemento antes de alcanzar la rotura.
<b>UBC</b>	Uniform Building Code.
<b>Vigueta-bovedilla</b>	Sistema que se compone de viguetas pretensadas y bovedillas de mampostería que a su vez conforman una losa prefabricada.
<b>Zona elástica</b>	Zona en la curva carga-deformación donde el elemento no tiene deformaciones permanentes y puede recuperar su forma inicial.



**Zona plástica**

Zona en la curva carga-deformación donde el elemento tiene deformaciones permanentes y no recupera su forma inicial.



## RESUMEN

Se evaluó la redistribución de momentos de la base de un sistema hacia los nudos que lo conforman por medio de pruebas de carga dinámica en un sistema de losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla con muros reforzados con pines, y pruebas de carga estática horizontal en un sistema de losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla con muros revestidos con poliestireno expandido. Ambos sistemas se evaluaron sin arriostramiento y con arriostramiento para comparar la forma en que se redistribuyen los momentos hacia los nudos. El arriostramiento de los nudos consiste en dos mecanismos: con placas rígidas y placas tipo biela. Ambas formas de arriostramiento forman un ángulo de  $45^\circ$ , sin reducir la longitud efectiva de los muros más allá del 20 % de la altura total del sistema.

Se aplicó carga dinámica en un sistema con muros reforzados para evaluar el comportamiento bajo estos efectos de carga. Y en el otro sistema con muros revestidos con poliestireno expandido, se aplicó carga estática lateral. Ambos sistemas fueron evaluados de forma arriostrada y sin arriostrar.

Del sistema ensayado con carga dinámica se logró redistribuir los momentos de la base al nudo donde el arriostramiento aportó mayor tenacidad en su comportamiento plástico. De la misma forma en el sistema ensayado con carga estática horizontal, se redistribuyeron los momentos hacia los nudos que se volvieron más dúctiles debido a la rigidización. Estos sistemas son considerablemente flexibles, por lo que el arriostramiento da mayor capacidad de energía cuando estos trabajan en su zona plástica.



# OBJETIVOS

## General

Evaluar la redistribución de esfuerzos en la unión de losa y solera de corona en muros de mampostería al colocarse un arriostramiento a dicha unión.

## Específicos

- Describir las propiedades mecánicas y estructurales de un sistema de losa prefabricada tipo vigueta y bovedilla con muros de mampostería.
- Analizar el comportamiento de un sistema de losa prefabricada tipo vigueta y bovedilla con muros de mampostería aplicando carga vertical y carga horizontal.
- Determinar el aporte estructural de los materiales utilizados para la elaboración de estos sistemas de losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla con muros de mampostería.
- Comparar los efectos obtenidos en la unión losa-muro del sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muros reforzados por aplicación de carga dinámica arriostrado y sin arriostrar.
- Comparar los momentos obtenidos en la unión losa-muro del sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muros revestidos con poliestireno expandido por aplicación de carga lateral arriostrado y sin arriostrar.



## INTRODUCCIÓN

Un sistema de losa prefabricada tipo vigueta y bovedilla con muros de mampostería, genera un momento cero o cercano a cero en el nudo de la losa con el muro. Esto indica que dicho nudo al estar sometido bajo efectos de carga vertical combinada con carga de sismo provocará desplazamiento y/o rotación dando a lugar que el ángulo de 90 grados conformado por el elemento vertical y el elemento horizontal se modifique llevando el sistema a la falla e inevitablemente al colapso.

La investigación propone revertir los efectos causados por el desplazamiento y/o rotación por medio de la redistribución de los momentos que se concentran en la parte inferior del muro hacia la parte superior del mismo, en el apoyo, disipando la energía en el sistema. Se busca que al disipar la energía por medio del arriostamiento de los nudos se logre dar más estabilidad al sistema, generando mayor capacidad de energía cuando el sistema entre en su zona plástica. Además, se busca que la metodología de arriostamiento empleada pueda ser aplicada para generar el criterio del sistema de bielas al nudo de losa-muro para que pueda variar el ángulo de 90 grados en el nudo a +/- 10 % sin afectar la integridad estructural del sistema.

Este concepto no es comúnmente aplicado actualmente a los sistemas constructivos y de diseño de sistemas de mampostería, por lo que esta investigación propone innovar este sistema constructivo velando siempre por la seguridad e integridad estructural de una forma práctica y eficiente.





## **1. ANTECEDENTES**

En estructuras de acero las columnas con restricciones apreciables de rotación y desplazamiento pueden soportar cargas mucho mayores que aquellas con poca restricción de rotación de los extremos, como es el caso de columnas con extremos articulados (McCormac y Csernak, 2013). Al colocar restricciones en los extremos, la longitud efectiva de la columna disminuye, generando más momento en el extremo superior y disminuyendo el momento en el extremo inferior dando mayor estabilidad a la estructura.

En mampostería se puede aplicar el mismo principio para un sistema de losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla y un muro de mampostería, denominando este sistema estructural como marcos resistentes a momento (Poveda, 2010).

Actualmente, la aplicación del concepto anterior en un sistema de losa tipo vigueta y bovedilla con un muro de mampostería no es empleado debido a la falta de una evidencia en la práctica que permita conocer el comportamiento de una estructura de este tipo al redistribuir los esfuerzos generados al final del muro hacia la parte superior con el fin de mantener un sistema coherente y equilibrado evitando la concentración de esfuerzos en un solo punto.

### **1.1. Estudios realizados previamente**

- Diseño de losas tipo vigueta y bovedilla no preesforzado: estudio de tesis de graduación de pregrado realizado por la estudiante de ingeniería civil Gloria Elizabeth Hernández Chamalé, Universidad de San Carlos de Guatemala, junio de 2017.

- Ensayo de losa pretensada tipo TI: ensayos de losas en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

### **1.1.1. Metodología aplicada en estudios previos realizados**

- Diseño de losas tipo vigueta y bovedilla no preesforzado.

Se llevaron a cabo ensayos destructivos para el sistema de losa prefabricada con vigueta y bovedilla basándose en las disposiciones del ACI 318-11S sección 20.4. Se utilizaron para las losas muretes de apoyo como sistema de soporte. El ensayo a flexión de la losa se realiza mediante un proceso de cargas y descargas con periodos de 24 horas. Previo a iniciar con la aplicación de la carga, se obtiene la caracterización dimensional y geométrica de la losa a ensayar y se ubican los deformímetros en puntos considerados críticos, esto es, a cada tercio de luz libre y al centro.

Se trazaron cuadrículas sobre el área de la losa con el fin de ubicar la carga que simulará la carga distribuida. Posteriormente se inicia la aplicación de carga utilizando cilindros de concreto previamente pesados y debidamente identificados, manteniendo incrementos del orden de un 10 % de la carga de diseño y tomando las lecturas de los deformímetros en cada incremento, con el fin de apreciar el comportamiento de la losa bajo los efectos de la carga que le está siendo aplicada. La carga total aplicada sobre la losa se deja durante un periodo de 24 horas, después se inicia el proceso de descarga que consiste en el inverso del proceso de carga. El proceso continúa hasta llevar la losa al colapso. (Hernández, 2017, p.27).

- Ensayo de losa pretensada sistema TI

De forma similar que el estudio anterior, se ejecutaron ensayos destructivos para el sistema según el código ACI 318-11. El ensayo consiste en someter la losa a flexión mediante un proceso de cargas y descargas graduales, y súbitas con gatos hidráulicos.

### **1.1.2. Resultados y conclusiones de estudios previos realizados**

- Diseño de losas tipo vigueta y bovedilla no preesforzado.
  - La losa fue diseñada para resistir un 33 % en la deflexión de 0.0034 m de la carga de diseño 240 kg/m<sup>2</sup>. La deflexión admisible del sistema sería de 0.02 m por la longitud de la losa que es 3.70 m y con ella tiene la capacidad de resistir el 67 % más, en la que reporta una deflexión de 0.0155 m, que puede soportar en la carga última.
  - Se considera el sistema que la vigueta y bovedilla cuando se encuentran empotrados o anclados en el muro o viga de apoyo, ocasionando una mejora en el amarre del sistema losa-muro. Mejorando un 65 % de su eficiencia, por ser un sistema no preesforzado para losas.
  - Se indica que este diseño de losa se considera para losas de luz de 3.70 m como máximo para aumentar a losas de espesor de 20 cm de espesor.

- Este diseño de debe trabajar con rigidizantes a 1.5 m como máximo para rigidizar el sistema y no se deflece más de lo indicado, según norma.
  - En la losa, dependiendo del apoyo si este está bien construido, no importará que la losa no sea de buena capacidad. (Hernández, 2017, p.73).
- Ensayo de losa pretensada sistema TI

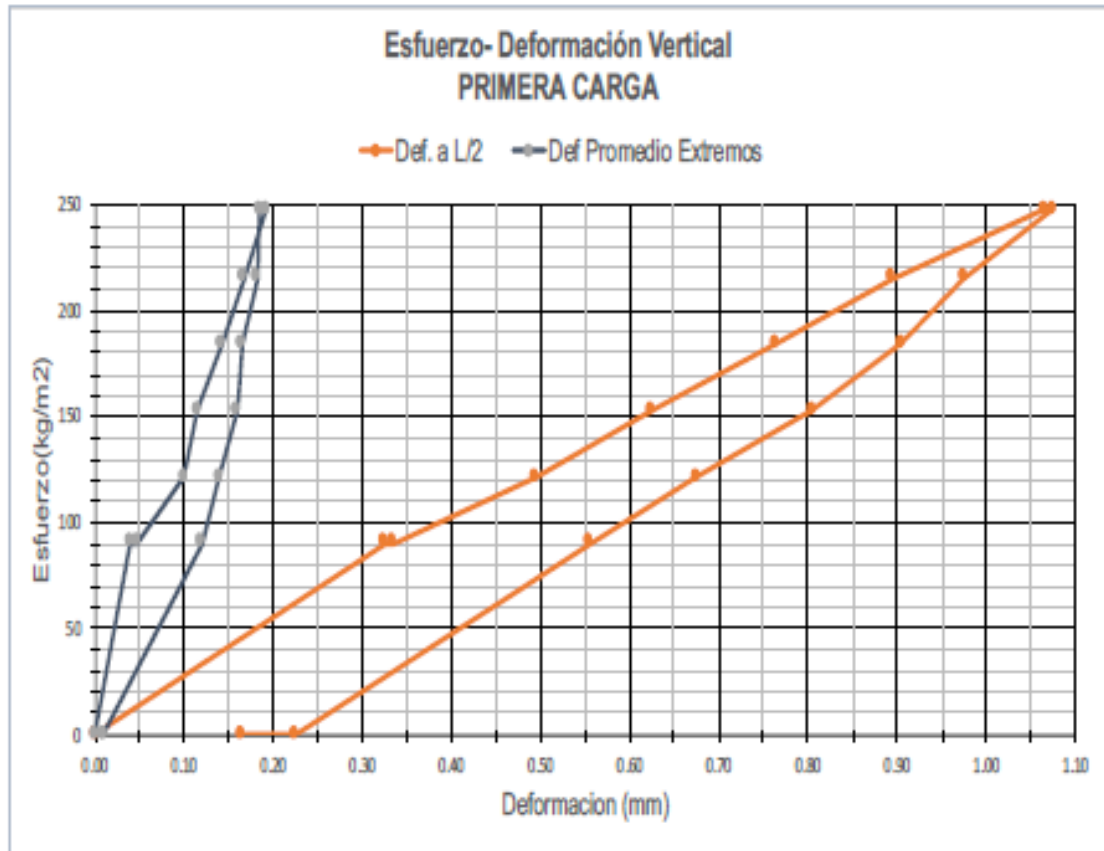
De estos ensayos se obtuvieron los resultados siguientes:

Tabla I. **Datos de primer ensayo en losa con carga vertical**

	Orden	Carga unitaria (kg)	Carga acumulada (kg)	Def. 1 (mm)		Def. 2 (mm)		Def. 3 (mm)		Promedio Def. 1 y Def. 3	Carga (kg/m2)
				Lectura	Real	Lectura	Real	Lectura	Real		
Carga primera cama	0	0.00	0.00	0.98	0.00	1.70	0.00	6.14	0.00	0.00	0.00
	Planchas	452.73	452.73	1.05	0.07	2.02	0.325	6.15	0.01	0.04	90.02
	2 min.	452.73	452.73	1.065	0.085	2.03	0.335	6.15	0.01	0.05	90.02
	1	157.90	610.63	1.12	0.14	2.19	0.495	6.20	0.06	0.10	121.42
	2	157.20	767.83	1.14	0.16	2.32	0.625	6.21	0.07	0.12	152.67
	3	158.00	925.83	1.18	0.2	2.46	0.765	6.225	0.085	0.14	184.09
	4	157.80	1083.63	1.205	0.225	2.59	0.895	6.25	0.11	0.17	215.47
	5	160.70	1244.33	1.245	0.265	2.76	1.065	6.26	0.12	0.19	247.42
	2 min	1244.33	1244.33	1.23	0.25	2.77	1.075	6.26	0.12	0.19	247.42
Descarga primera cama	5	160.70	1083.63	1.23	0.25	2.67	0.975	6.255	0.115	0.18	215.47
	4	157.80	925.83	1.20	0.22	2.60	0.905	6.25	0.11	0.17	184.09
	3	158.00	767.83	1.19	0.21	2.50	0.805	6.249	0.109	0.16	152.67
	2	157.20	610.63	1.15	0.17	2.37	0.675	6.249	0.109	0.14	121.42
	1	157.90	452.73	1.11	0.13	2.25	0.555	6.249	0.109	0.12	90.02
	Planchas	452.73	0	0.98	0	1.92	0.225	6.16	0.02	0.01	0.00
	2 min	0	0	0.98	0	1.86	0.165	6.16	0.02	0.01	0.00
					DefaL/2						

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2019). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

Figura 1. **Esfuerzo-deformación en primer ensayo de carga vertical**



Def. A L/2= Deformación al centro de la luz libre.

Def. Promedio Extremos= Deformación del promedio de extremo 1 y extremo 3.

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

- Se determinó que en la primera fase del ensayo (vigüeta a 10 cm del muro) hay una relación de 6:1 en las deformaciones respecto a la central, es decir que, por cada milímetro de deformación en ese punto, seis veces se presenta al centro de la losa, a pesar de la variación de los espesores de la misma que representan un  $\pm 10\%$  de variación.

- Se deberá tener cuidado a la hora de la de la fundición que las variaciones del espesor sean menores al 10 % respecto al valor de diseño.
- La deformación remanente es de 0.01 mm en los extremos y 0.17 mm en la parte central de la losa.
- La capacidad de resiliencia del sistema está por los 90 kg/m<sup>2</sup> de carga y se observa una pendiente constante (típica de los elementos preesforzados) hasta una carga del orden de 200 kg/m<sup>2</sup> de carga.
- A partir de 200 kg/m<sup>2</sup> a 260 kg/m<sup>2</sup> aproximadamente en este punto corresponde al inicio de la zona elastoplástica.
- La hoja de histéresis forma un rectángulo alargado en el cual su amplitud de carga corresponde a 50 kg/m<sup>2</sup>, y en deformación a 0.2 mm.
- El valor de resiliencia de la losa es de 90 kg/m<sup>2</sup> y genera una flexión de 0.3 mm, al llegar a la carga de 250 kg/m<sup>2</sup> genera un reacomodo del sistema por lo que deja una deformación remanente de 0.12 mm.

Tabla II. Datos de segundo ensayo en losa con carga vertical

	Orden	Carga Horizontal		Carga Distribuida		Def. 1 (mm)		Def. 2 (mm)		Def. 3 (mm)		Promedio Def. 1 y Def. 3	Esfuerzo kg/m <sup>2</sup>
		Carga (psi)	Carga (kg)	Carga unitaria (kg)	Carga acumulada (kg)	Lectura	Real	Lectura	Real	Lectura	Real		
Carga 1era. cama	0	0	0	0.00	0.00	0.98	0.00	1.86	0.00	6.16	0.00	0.00	0.00
	Planchas	0	0	452.73	452.73	1.03	0.05	2.18	0.32	6.18	0.02	0.03	90.02
	1	0	0	158.2	610.93	1.09	0.11	2.32	0.46	6.205	0.045	0.08	121.48
	2	0	0	158.6	769.53	1.11	0.13	2.46	0.6	6.225	0.065	0.10	153.01
	3	0	0	161.2	930.73	1.14	0.16	2.57	0.71	6.24	0.08	0.12	185.07
	4	0	0	156.6	1087.33	1.17	0.19	2.68	0.82	6.25	0.09	0.14	216.20
Carga 1era. cama	5	0	0	155.6	1242.93	1.20	0.22	2.83	0.97	6.26	0.10	0.16	247.14
	6	0	0	156.7	1399.63	1.20	0.22	3.11	1.25	6.33	0.17	0.20	278.30
	7	0	0	160.9	1560.53	1.24	0.26	3.295	1.435	6.35	0.19	0.23	310.29
	8	0	0	156	1716.53	1.29	0.31	3.46	1.6	6.355	0.195	0.25	341.31
Carga 2da. Cama	9	0	0	156.7	1873.23	1.34	0.36	3.615	1.755	6.39	0.23	0.30	372.47
	1	0	0	159.6	2032.83	1.39	0.41	3.84	1.98	6.4	0.24	0.33	404.21
	7	0	0	154	2186.83	1.43	0.45	4.03	2.17	6.42	0.26	0.36	434.83
	2 min	0	0	2186.83	2186.83	1.43	0.45	4.04	2.18	6.42	0.26	0.36	434.83
Descarga	Vibración	0	0	2186.83	2186.83	1.495	0.52	4.22	2.36	6.45	0.29	0.40	434.83
	1y7	0	0	313.6	1873.23	1.19	0.21	4.22	2.36	6.43	0.27	0.24	372.47
	9y8	0	0	312.7	1560.53	1.1	0.12	4.09	2.23	6.4	0.24	0.18	310.29
	7y6	0	0	317.6	1242.93	1.05	0.07	3.76	1.9	6.38	0.22	0.15	247.14
Descarga	5y4	0	0	312.2	930.73	0.99	0.01	3.42	1.56	6.33	0.17	0.09	185.07
	3, 2, 1 y Plan.	0	0	930.73	0	0.98	0.00	2.7	0.84	6.27	0.11	0.05	0.00

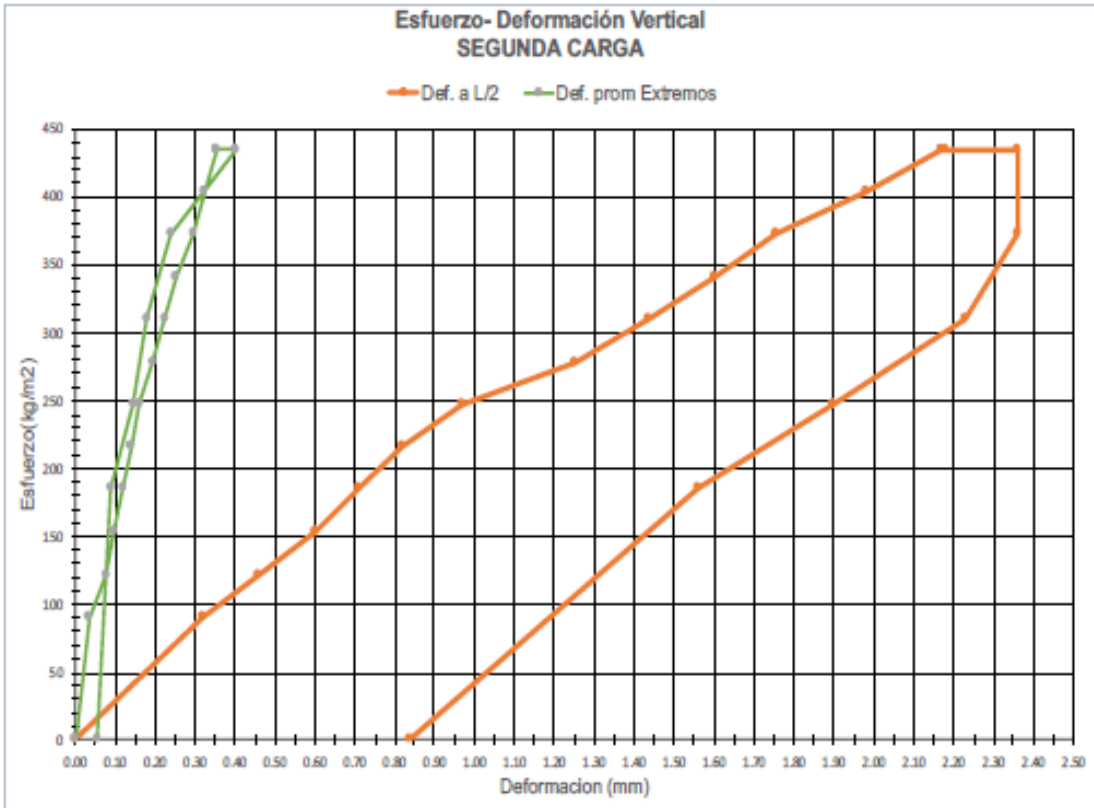
Def. 1= Deformación en el extremo 1

Def. 2 = Deformación 2, al centro de la luz libre

Def 3 = Deformación en el extremo 3

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

Figura 2. **Esfuerzo-deformación en segundo ensayo de carga vertical**



**Def. A L/2= Deformación al centro de la luz libre.**

**Def. Promedio Extremos= Deformación del promedio de extremo 1 y extremo 3.**

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

- Para esta condición se llevó a una carga aplicada, del orden de los 450 kg/m<sup>2</sup>, más la carga muerta existente de la losa que es del orden de 255 kg /m<sup>2</sup> para un total de 705 kg/m<sup>2</sup> esta carga total considera las cargas ultimas mayoradas (carga viva y carga muerta).



- La deformación máxima al centro con la carga total reporto 2.35 mm, que corresponde a un 30 % de la deflexión máxima permitida en la tabla 24.2.2 del ACI 318-14.
- La recuperación de la deformación luego de quitar la carga aplicada reporto ser del orden de 0.84 mm, que corresponde al 36 % de la deformación máxima medida.
- No se observaron fisuras o grietas en ninguna de las viguetas tipo TI utilizadas.
- Pasados los 250 kg/m<sup>2</sup> la zona pretensada inferior de la vigueta tipo TI comienza a disminuir su compresión. Cuando llega al orden de los 275 kg/m<sup>2</sup> se estabiliza el sistema a compresión de la vigueta tipo TI, cuando la carga alcanza los 440 kg/m<sup>2</sup> el preesfuerzo inferior se considera que llega a 0, como se observa en la parte superior de la gráfica en que hay una horizontal donde el acero sufre de relajación por la carga aplicada.
- En la fase de descarga se observa un paralelismo en el comportamiento de recuperación de la vigueta tipo TI y el comportamiento registrado en la fase de carga.

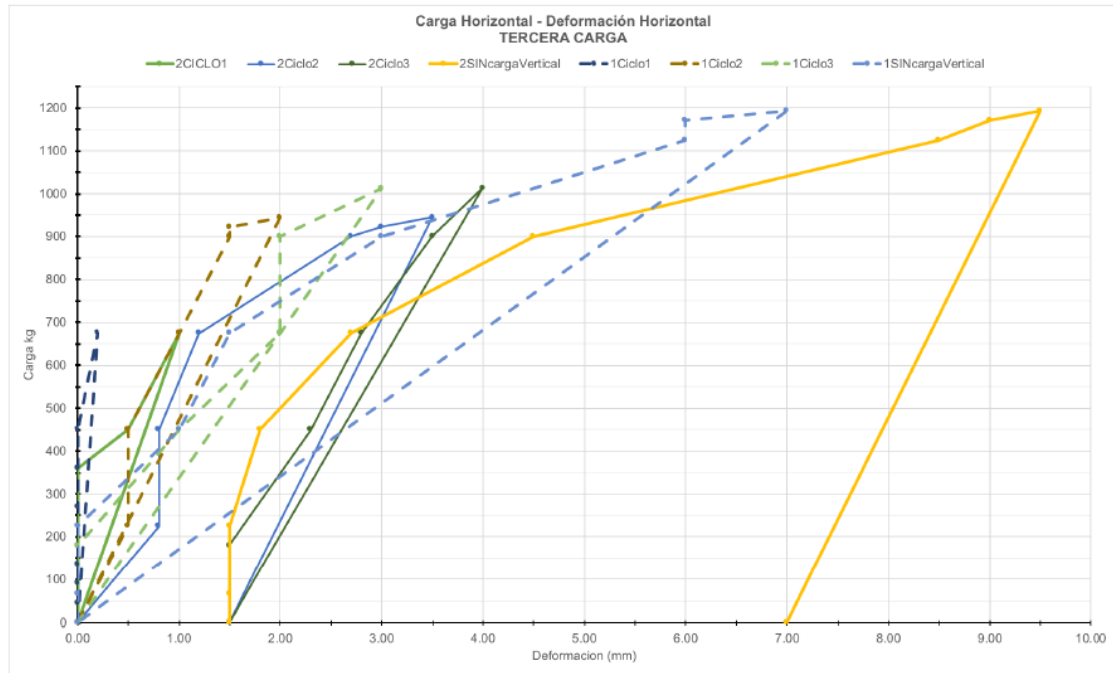
Como ensayo complementario, se aplicó carga horizontal al sistema en tres ciclos cargando al sistema progresivamente, luego descargando súbitamente tal como se indica en los datos siguientes.

Tabla III. Datos de tercer ensayo en losa con carga horizontal

	Orden	Carga Horizontal		Carga Distribuida		Deformaciones			
		Carga (psi)	Carga (kg)	Carga unitaria (kg)	Carga acumulada (kg)	Def. Lat-	Def. Hor-	Def. Hor-2 (mm)	
						Lectura	Real	Lectura	Real
primer	5	0	0	155.6	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
Carga horizontal		100	45	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
		200	90	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
		300	135	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
		400	180	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
		600	270	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
		800	360	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00
		1000	450	0	1242.93	15.50	0.00	17.30	0.50
		1500	675	0	1242.93	15.52	0.20	17.35	1.00
	0	0	0	1242.93	15.50	0.00	17.25	0.00	
Carga horizontal		500	225	0	2186.83	15.40	0.50	17.33	0.80
		1000	450	0	2186.83	15.45	0.50	17.33	0.80
		1500	675	0	2186.83	15.50	1.00	17.37	1.20
		2000	900	0	2186.83	15.65	1.50	17.52	2.70
		2050	922.5	0	2186.83	15.65	1.50	17.55	3.00
	Vibración	2100	945	0	2186.83	15.70	2.00	17.60	3.50
		0	0	0	2186.83	15.50	0.00	17.40	1.50
		400	180	0	2186.83	15.50	0.00	17.40	1.50
		1000	450	0	2186.83	15.60	1.00	17.48	2.30
		1500	675	0	2186.83	15.70	2.00	17.53	2.80
		2000	900	0	2186.83	15.70	2.00	17.6	3.50
		2250	1012.5	0	2186.83	15.80	3.00	17.65	4.00
		Desc. Hor.	0	0	0	0	15.50	0.00	17.4
Carga horizontal		150	67.5	0	0	15.50	0.00	17.4	1.50
		500	225	0	0	15.50	0.00	17.4	1.50
		1000	450	0	0	15.60	1.00	17.43	1.80
		1500	675	0	0	15.65	1.50	17.52	2.70
		2000	900	0	0	15.80	3.00	17.70	4.50
		2500	1125	0	0	16.10	6.00	18.10	8.50
	2 min	2600	1170	0	0	16.10	6.00	18.15	9.00
		2650	1192.5	0	0	16.20	7.00	18.20	9.50
	0	0	0	0	15.50	0.00	17.95	7.00	

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

Figura 3. **Carga-deformación de ensayo con carga horizontal**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

- En el primer ciclo de carga horizontal con carga vertical de 247.14 kg/m<sup>2</sup>.
- Para el segundo y tercer ciclo de carga horizontal y carga vertical de 434.83 kg/m<sup>2</sup>.
- El numeral que antecede a la palabra Ciclo corresponde a la posición respecto a la aplicación de la carga 1: donde se aplica, y 2: al murete alejado.

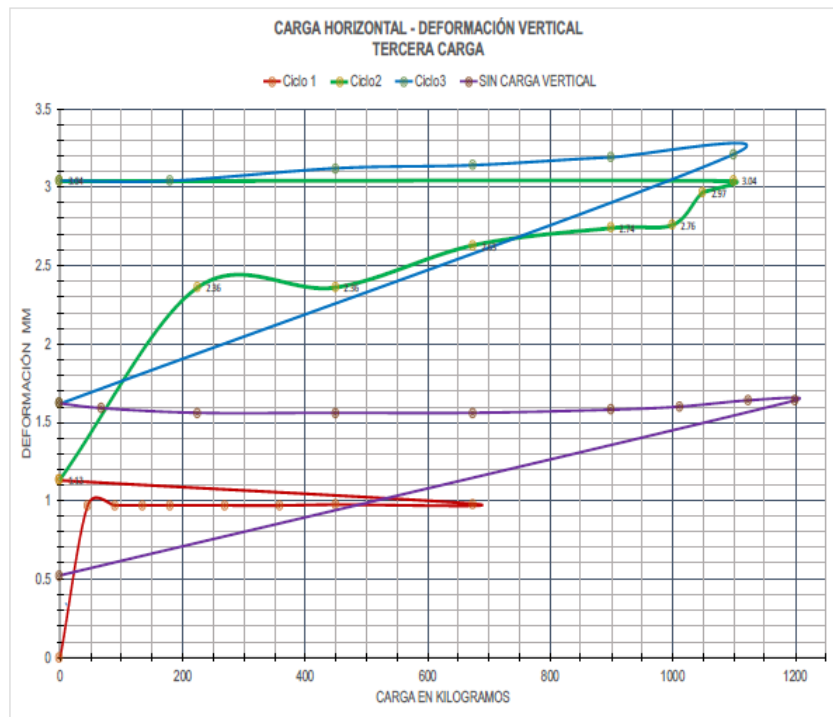
Durante la aplicación de carga horizontal, la losa también presentó deformaciones verticales. Esto se resume en la tabla y gráfica siguiente:

Tabla IV. Datos de carga horizontal

	PRIMER CICLO									
CARGA HORIZONTAL	0	45	90	135	180	270	360	450	675	0
DEF VERTICAL	0	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.975	0.98	1.13
	SEGUNDO CICLO									
CARGA HORIZONTAL	0	225	450	675	900	1000	1050	1100	0	
DEF VERTICAL	1.13	2.36	2.36	2.63	2.74	2.76	2.97	3.04	3.04	
	TERCER CICLO									
CARGA HORIZONTAL	0	180	450	675	900	1100	0			
DEF VERTICAL	3.04	3.04	3.12	3.14	3.19	3.21	1.62			
	SIN CARGA VERTICAL									
CARGA HORIZONTAL	0	67.5	225	450	675	900	1012.5	1125	1200	0
DEF VERTICAL	1.62	1.59	1.56	1.56	1.56	1.58	1.6	1.64	1.64	0.52

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

Figura 4. Carga horizontal vs. Deformación vertical



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

En general, la pérdida de resistencia en el sistema se vio influenciada por un 40 % por la excedencia de carga última de diseño y el tiempo que estuvo sometida a dicha carga; 20 % por efectos del armado losa-solera-murete; 20 % debido al choque térmico generado al ser expuesta a altas temperaturas y luego la disminución de esta; y 20 % debido a fatiga por vibraciones sumado a esto la relajación por carga y temperatura.

Con relación a la diferencia teórica de la deriva o desplazamiento lateral de los muros, se debe a la fatiga del sistema, provocada por la ciclicidad de las cargas aplicadas. En la teoría por medio del análisis estructural, en el muro 1 es 2.33 mm y en el muro 2 es 2.93 mm, si se le incrementa un 40 % como se indicó anteriormente, los valores resultan siendo similares a los obtenidos producto del ensayo, para el muro 1 ( $2.33 \cdot 1.4 = 3.26$  mm) y para el muro 2 ( $2.93 \cdot 1.4 = 4.1$  mm).

## **1.2. Restricciones en los extremos y longitud efectiva en una columna en acero**

Según McCormack y Cserneck (2013), en *Diseño de estructuras de acero*, para estructuras de acero, las columnas con restricciones apreciables de rotación y desplazamiento pueden llegar a soportar cargas mucho mayores que aquellas columnas con poca restricción de rotación o desplazamiento de los extremos, como en el caso de columnas con extremos articulados.

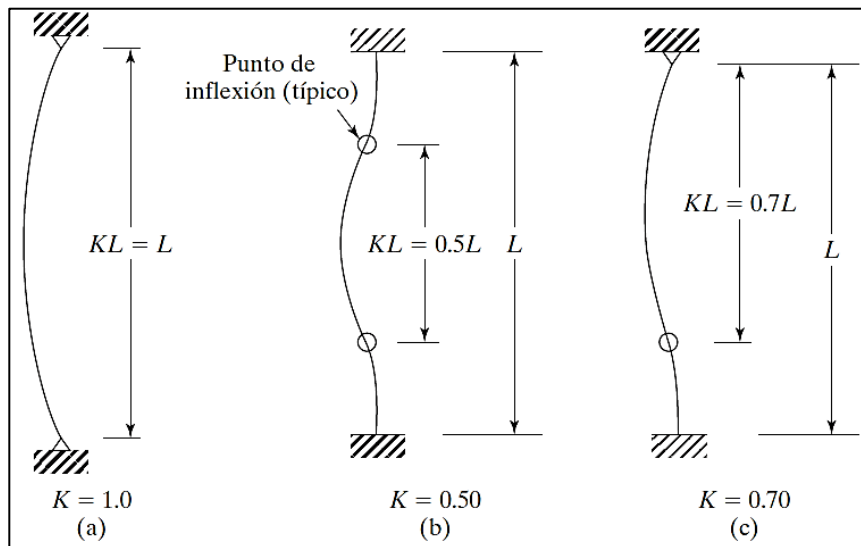
La longitud efectiva de una columna es un modelo matemático que se puede definir como la distancia entre puntos de momento nulo en la columna, es decir, la distancia entre sus puntos de inflexión. La longitud efectiva de una columna de acero es establecida en especificaciones de acero como:

$$L_e = K L$$

Donde  $L_e$  representa la longitud efectiva,  $L$  la longitud total y  $K$  es el factor de longitud efectiva cuya magnitud depende de la restricción rotacional en los extremos de la columna y de la resistencia al movimiento lateral de esta, como se observa en la figura 5. Para cada tipo de restricción en los extremos, la magnitud de  $K$  cambia según la ubicación de los puntos de inflexión.

En la figura 5. (a), la columna se encuentra articulada en ambos extremos por lo que  $K$  es igual a 1, entonces la longitud efectiva es igual a la longitud total de la columna. En la figura 5. (b), la columna se encuentra empotrada en ambos extremos generando dos puntos de inflexión, de manera que,  $K$  es igual a 0.5 y la longitud efectiva es  $0.5L$ . En la figura 5. (c) se encuentra un extremo articulado y otro empotrado generando un punto de inflexión y un valor de  $K$  igual a 0.7, por lo tanto, la longitud efectiva será  $0.7L$ .

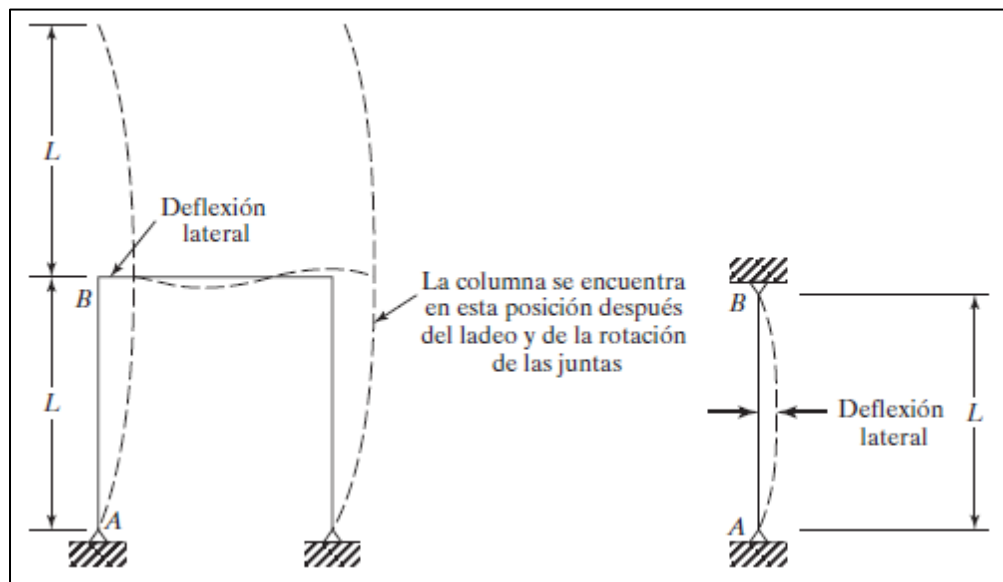
Figura 5. **Longitudes efectivas (KL) de columnas en marcos arriostrados (ladeo impedido)**



Fuente: McCormac, J y Csernak, S. (2013). *Diseño de estructuras de acero*.

Considerando las restricciones en columnas se establece que entre menor sea la longitud efectiva de una columna, menor será el colapso o falla por pandeo y, por consiguiente, la columna tendrá mayor su capacidad de carga. Además, tendrá mayor capacidad de absorción de energía. Las columnas forman parte de un sistema estructural, el cual es afectado por las distintas condiciones externas e internas de una estructura que generan efectos de deformación. Dependiendo de estas condiciones, los marcos pueden ser arriostrados y no arriostrados.

Figura 6. **Ejemplo de deflexión lateral en un marco simple (no arriostrado)**



Fuente: McCormac, J. y Csernak, S. (2013). *Diseño de estructuras de acero*.

### **1.2.1. Marco arriostrado y marco no arriostrado**

Un marco arriostrado es aquel en el que el desplazamiento de sus juntas está impedido por medio de riostras, muros de cortante o por el soporte lateral de las estructuras adjuntas. Un marco sin arriostrar no tiene ninguno de estos tipos de soporte y depende de la rigidez de sus propios miembros y de la rigidez rotacional de las juntas entre los miembros del marco para impedir el pandeo. En marcos arriostrados los valores de  $K$  nunca pueden ser mayores que 1.0, pero en los marcos sin arriostrar, éstos siempre son mayores que 1.0 debido al ladeo. (McCormac y Csernak, 2013, p.142).

## **1.3. Sistemas de mampostería**

Los sistemas estructurales en mampostería se pueden clasificar según su función estructural y según su metodología constructiva.

### **1.3.1. Clasificación según su función estructural**

La mampostería se clasifica según su función estructural como se indica a continuación.

#### **1.3.1.1. Mampostería estructural**

Tipo de mampostería con refuerzo vertical embebido en celdas rellenas, para formar un sistema monolítico. Además, se debe considerar un refuerzo horizontal a cada cierto número de hiladas dependiendo del diseño del muro. El refuerzo se emplea para resistir los esfuerzos de tensión y, en ocasiones, de compresión y corte que se presentan en el mamposte simple. Los sistemas de



este tipo deben soportar su propio peso, además de las cargas verticales y horizontales que lleguen al sistema.

#### **1.3.1.2. Mampostería no estructural**

Mampostería compuesta por muros que soportan únicamente su propio peso. Su función principal consiste en dividir espacios. También se refiere a todo aquel elemento elaborado con mampostes y/o similares que no cumplirá una función estructural dentro del sistema. Aunque no sean elementos estructurales se deben considerar en el análisis y diseño estructural como elementos que no soportarán cargas externas, sino su propio peso.

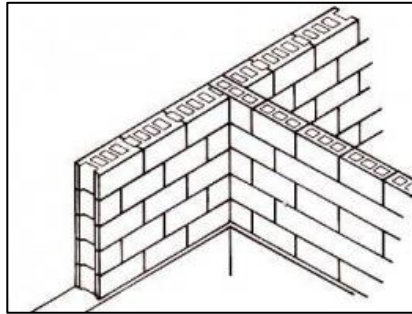
#### **1.3.2. Clasificación según su metodología constructiva**

La mampostería se clasifica según su metodología constructiva tal como se indica a continuación.

##### **1.3.2.1. Mampostería simple**

Tipo de mampostería estructural que, como el nombre lo indica, no tiene refuerzo. En este tipo de sistema funciona de manera que predominen los esfuerzos de compresión para contrarrestar los esfuerzos de tensión producidos por las fuerzas horizontales. Los sistemas de mampostería simple son deficientes cuando son sometidos a esfuerzos de tensión, por consiguiente, este tipo de estructuras no son ideales para Guatemala, por ser un país altamente sísmico.

Figura 7. **Muros divisores de mampostería simple**



Fuente: Ecured. (2019). *Muro*. Consultado el 10 de marzo de 2020. Recuperado de <https://www.ecured.cu/index.php?title=Muro&oldid=3527026>.

### **1.3.2.2. Mampostería reforzada**

También denominado pineado, es el tipo de mampostería estructural que está compuesta por mampostería simple con refuerzo embebido. Las barras de acero para el refuerzo son colocadas verticalmente dentro de las celdas para luego fundirlas con *grout*. El refuerzo horizontal es colocado en las juntas donde se colocará el mortero de pega.

Figura 8. **Refuerzo en un muro de mampostería de concreto reforzada localizado en CDS D**

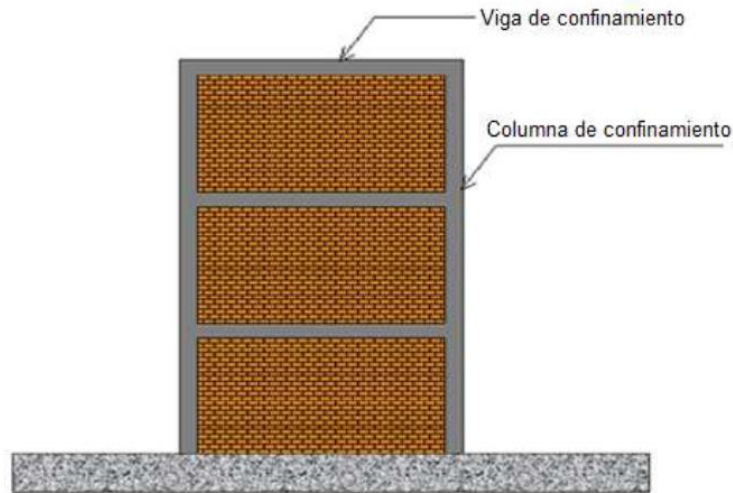


Fuente: Amrhein, J. y Porter, M. (2009). *Reinforced masonry engineering handbook*.

### **1.3.2.3. Mampostería confinada**

Tipo de mampostería con elementos de concreto armado (vigas y columnas de amarre) que rodean el perímetro del muro. Dichos elementos son vaciados en sitio. Es el sistema más empleado en Guatemala para viviendas. Las vigas y columnas del marco confinante deben ser continuos para garantizar que trabajen como un elemento resistente a momentos flexionantes.

Figura 9. **Muro de mampostería confinada**



Fuente: Ramírez, M. (2015). *Análisis y diseño estructural de viviendas unifamiliares de dos niveles, con diferente unidad de mampostería por nivel.*

#### **1.4. Comportamiento de sistemas estructurales de mampostería**

El comportamiento de un sistema de mampostería se define del funcionamiento de cada elemento que lo compone, así como del desarrollo de las potenciales fallas que podría presentar el sistema al ser sometido a las diferentes combinaciones de carga.

##### **1.4.1. Funcionamiento de los muros de mampostería dentro del sistema**

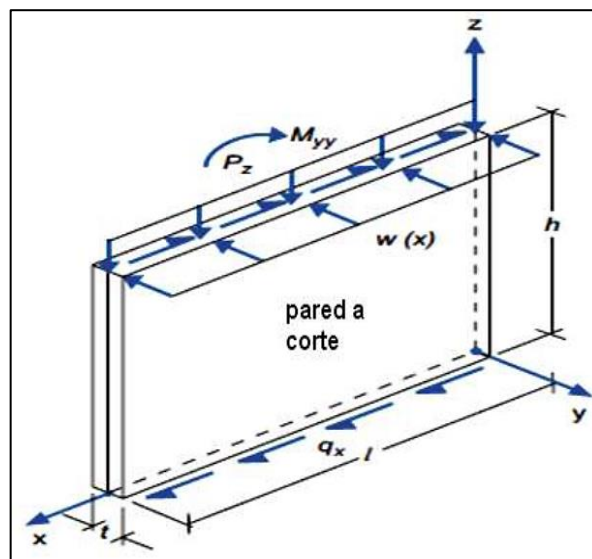
Los muros de mampostería trabajarán, de forma general, por corte y carga axial. Se debe considerar la acción de volteo y los efectos producidos por los momentos causados por cargas externas que actúan fuera del plano de carga del muro. Estos efectos deben ser resistidos por la combinación de la

mampostería con el refuerzo de acero de manera que se mantenga un equilibrio entre la rigidez el sistema y su ductilidad.

La mampostería trabaja en tres planos dimensionales:

- De forma vertical trabajará a carga axial.
- De forma horizontal trabajará en el plano de corte y momento.
- De forma perpendicular al plano de corte y momento.

Figura 10. **Diagrama de los planos dimensionales de trabajo de la mampostería**



Fuente: Corzo, M. (2008). *Notas mampostéricas de una sabandija*.

En la figura 10, se establece el diagrama de cuerpo libre en las tres dimensiones de un muro de mampostería de espesor  $t$ , ancho  $l$ , y altura  $h$ . El muro está sometido a una carga axial ( $P_z$ ); lateralmente, a la acción del corte ( $q_x$ ) y al momento ( $M_{xy}$ ); fuera del plano de corte y momento ( $W_x$ )

Para el diseño, se deben considerar los efectos que se producen en los tres planos, especialmente para zonas de riesgo sísmico medio a alto. Además, para garantizar un correcto diseño estructural, se consideran los límites de los esfuerzos de los elementos constituyentes del muro:

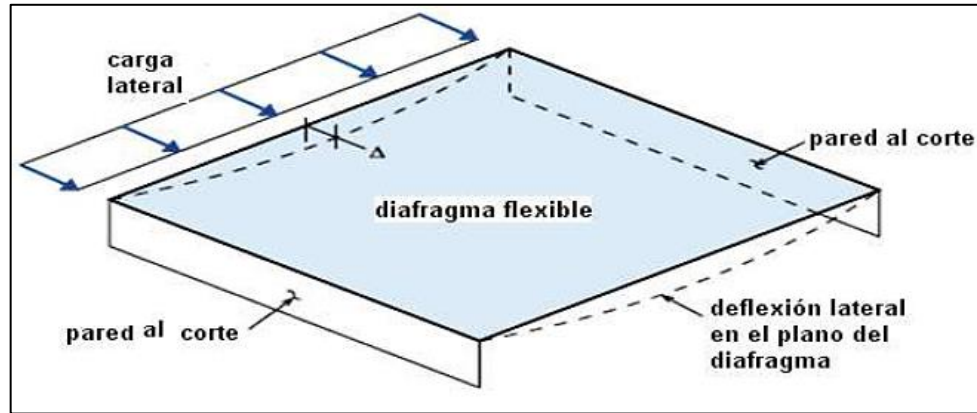
- Límite de fluencia del acero para el refuerzo.
- Esfuerzo último de compresión del mamposte utilizado.

#### **1.4.2. Funcionamiento de diafragmas dentro del sistema**

Los diafragmas son los elementos del sistema que distribuyen las fuerzas laterales a los elementos estructurales verticales dentro del sistema. Estos elementos pueden ser horizontales o casi horizontales y su funcionamiento se divide en dos formas:

- Semi-rígido o flexible. Ante la acción de una fuerza horizontal, se deflecta de forma vertical y horizontal. Este tipo de diafragmas disipan una parte de la energía que le llega por la fuerza horizontal actuante lo cual se observa cuando el elemento se deflecta en dos sentidos como indica la figura 11. Se denomina también diafragma flexible.

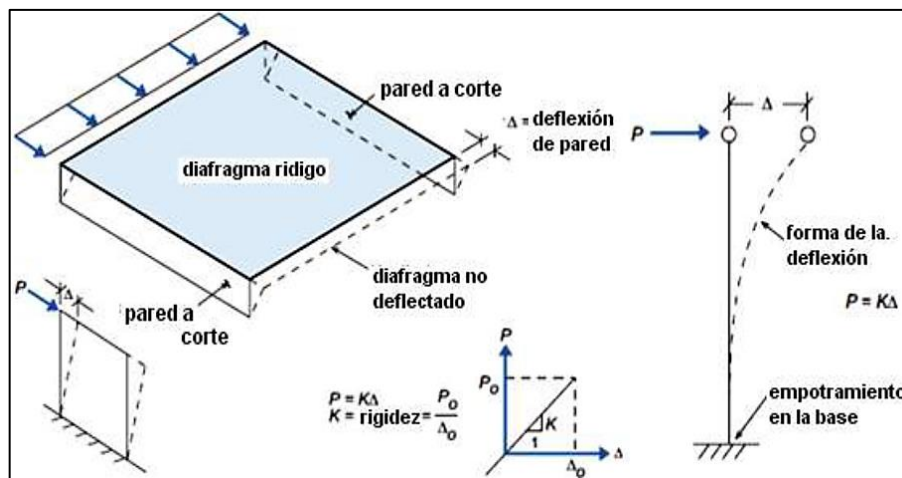
Figura 11. **Diafragma semi-rígido o flexible**



Fuente: Corzo, M. (2008). *Notas mampostéricas de una sabandija*.

- Rígido. A diferencia del anterior, este tipo de diafragma no se deflecta. Como el nombre lo indica, es más rígido por lo cual transmite mayor cantidad de energía.

Figura 12. **Diafragma rígido**



Fuente: Corzo, M. (2008). *Notas mampostéricas de una sabandija*.

### **1.4.3. Funcionamiento de soleras dentro del sistema**

En los sistemas de mampostería, las soleras son elementos estructurales que funcionan como una viga en donde se colocará el refuerzo horizontal que será necesario para soportar los esfuerzos flexionantes y cortantes que se generen en el sistema. Las soleras transmitirán las cargas que soporta el muro hacia las columnas o costillas las cuales, a su vez, las transmitirán a la cimentación. Las normas NSE AGIES 2010 establecen los requisitos mínimos para las soleras donde en la NSE 7.4. 2010 se indica que:

- El ancho mínimo de las soleras de los muros estructurales debe ser el espesor del muro y el área de la sección no debe ser menor que  $200 \text{ cm}^2$ .
- Los sillares deben ser de concreto reforzado de por lo menos dos barras no. 2 y eslabones no. 2 a 20 cm o su equivalente, debiendo anclarse adecuadamente al refuerzo vertical del borde del vano de la ventana.
- Los dinteles deben ser de concreto reforzado y se calculan según las condiciones de cada caso.
- En muros confinados de mampostería deben colocarse refuerzo horizontal con un área de acero no menos que 0.0015 veces el área de su sección transversal.
- El concreto que se utilice en soleras, sillares y dinteles de muros estructurales debe tener una resistencia mínima a los 28 días de  $176 \text{ kg/cm}^2$ .
- El recubrimiento del acero de refuerzo no debe ser menor de 1.5 cm.

También indica que para edificaciones de un nivel se colocan tres tipos de solera con su debido refuerzo según la figura siguiente:



Figura 13. **Acero de refuerzo mínimo para soleras**

<b>Tipo de solera</b>	<b>Refuerzo mínimo</b>
Hidrófuga	4 No. 3; Estribos No. 2 a 200 mm
Intermedia	2 No. 3; Estribos No. 2 a 200 mm
Entrepiso	4 No. 3; Estribos No. 2 a 200 mm
Superior <sup>(a)</sup>	4 No. 3; Estribos No. 2 a 200 mm

<sup>(a)</sup> Para edificaciones de un nivel cuya área de construcción no exceda de 70 m<sup>2</sup>, la solera superior podrá reforzarse con 3 barras No. 3 y estribos No. 2 a 200 mm.

Fuente: AGIES, NSE 7.4-2010. (2010). *Mampostería reforzada*.

Si la edificación es de dos niveles se debe agregar una solera de entrepiso, además si la altura libre del muro es mayor a 2.80 m, se debe colocar más de una solera intermedia.

#### **1.4.4. Tipos de falla en sistemas de mampostería**

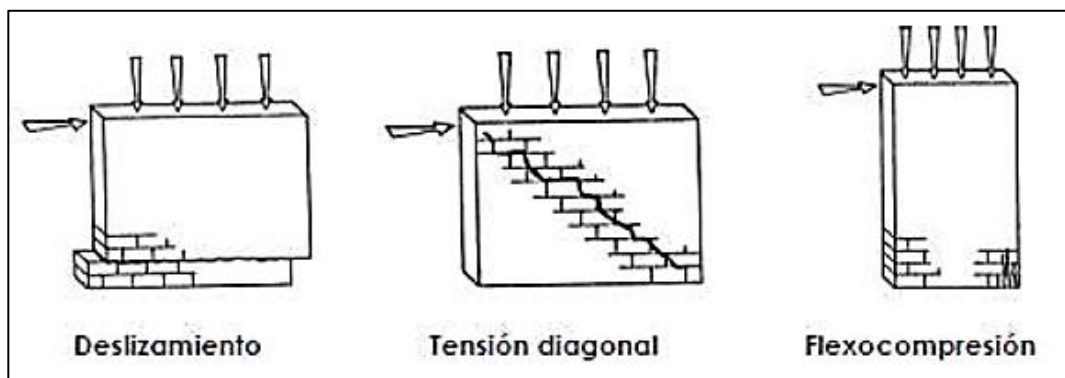
La mampostería se caracteriza por comportarse de dos formas:

- Las unidades de mampostería presentan una falla frágil cuando están en tracción.
- Las juntas de mortero que introducen una debilidad al sistema.

Estos efectos resultan de la combinación de esfuerzos que generan las cargas axiales y laterales, primordialmente, a las que está sometido el sistema. Se manifiestan por un conjunto de grietas que cruzan las unidades de mampostería y otras que se generan a lo largo de las uniones mortero-unidad.

Debido a estos efectos, se debe evaluar adecuadamente la resistencia a corte en el sistema que generan las cargas laterales inducidas por sismo, viento, presión lateral de tierra, entre otros., considerando tres tipos de fallas como se indica en la figura 14.

Figura 14. **Tipos de falla en muros de mampostería**



Fuente: Ramírez, M. (2015). *Análisis y diseño estructural de viviendas unifamiliares de dos niveles, con diferente unidad de mampostería por nivel.*

La falla por deslizamiento o fricción-cortante ocurre debido a los esfuerzos normales de compresión bajos presentes en el sistema en conjunto de la unión débil que existe entre el elemento de mampostería y el mortero, generando esfuerzos cortantes deslizantes (deslizamiento) en las juntas horizontales.

La falla por tensión diagonal se genera cuando existen esfuerzos normales de compresión moderados provocando agrietamiento diagonal directamente sobre los elementos de mampostería.

La falla por compresión se genera debido a cargas axiales grandes provocando esfuerzos normales altos, respecto a los esfuerzos de corte presentes en el sistema.



## **2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EVALUADO: LOSA TIPO VIGUETA-BOVEDILLA CON MURO REFORZADO**

Este sistema se compone de elementos prefabricados recubiertos por una pastilla de concreto la cual está reforzada con electromalla de acero de alta resistencia. El sistema fue diseñado para que la losa prefabricada trabaje como una losa tradicional continua, donde el refuerzo estará en un sentido de esta. De esta forma, se asegura que resista la carga vertical. El sistema funciona monolíticamente y tiene capacidad resistiva perpendicular al sentido de las viguetas.

### **2.1. Descripción de los elementos y diseño del sistema**

Los elementos utilizados en el sistema, así como el diseño para el uso de estos, se describe a continuación.

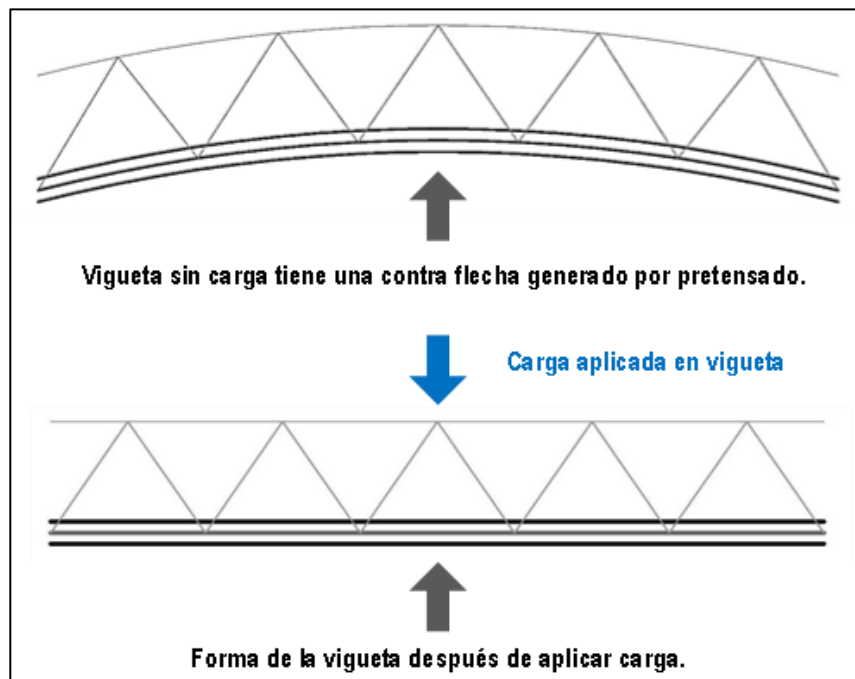
#### **2.1.1. Losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla**

La losa prefabricada está conformada por los elementos siguientes:

- Vigueta TI: consiste en un elemento prefabricado, pretensado que genera una contra flecha al sistema con sección transversal de forma T invertida. Es un elemento autoportante de resistencia de 422 kg/cm<sup>2</sup>, sección transversal de 85 cm<sup>2</sup> y un peso por metro lineal de 20 kg. Tiene una longitud de 4.025 m. El refuerzo cumple la resistencia requerida por flexión, considerando las concentraciones de carga, además es al menos

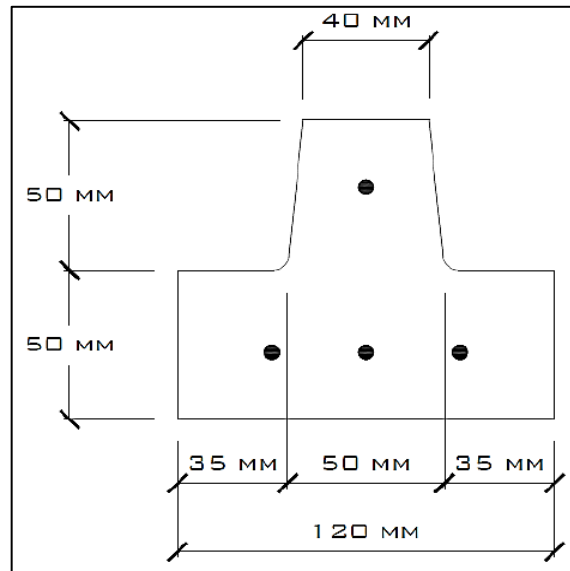
igual al refuerzo requerido para retracción y temperatura, según lo establecido por el código ACI 318-14 en la sección 20.3.

Figura 15. **Deflexión de viguetas en la losa**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

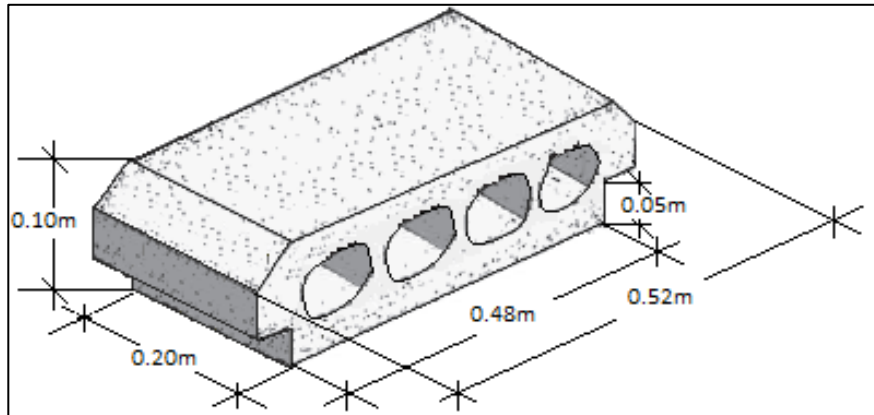
Figura 16. Sección transversal de vigueta



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

- Bovedilla: consiste en un elemento de mampostería hecho con hormigón, arcilla, cerámico u otros materiales. Cuenta con una resistencia en área bruta de  $25 \text{ kg/cm}^2$ , peso de 9.40 kg y dimensiones como se indica en la figura 17.

Figura 17. **Detalle de bovedilla**



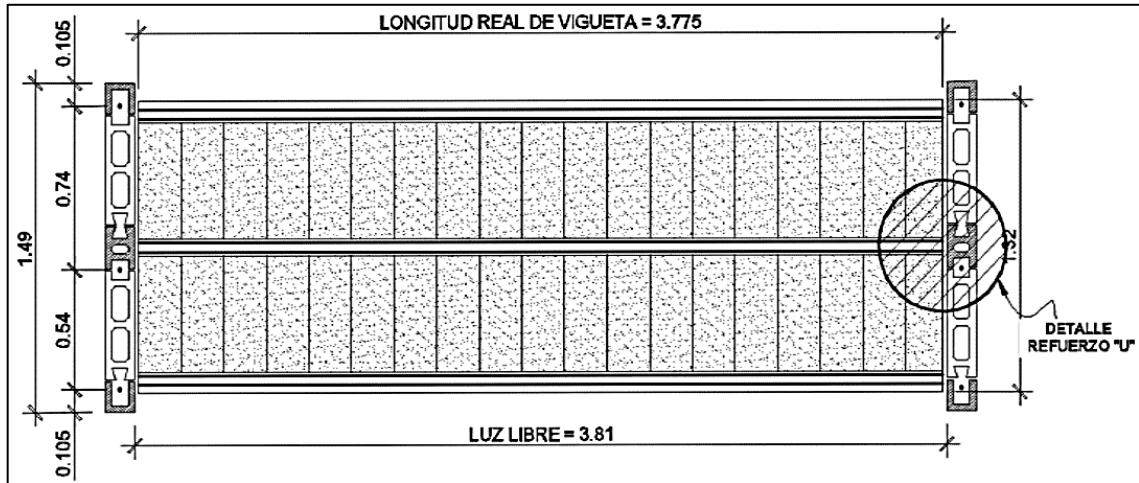
Fuente: Hernández, G. (2017). *Diseño de losas tipo vigueta y bovedilla no preesforzado*. p 7.

- *Topping* de concreto: sobre el sistema de vigueta y bovedilla, la losa es cubierta por una capa o *topping* de concreto de espesor de 5 cm que cumple la función de soportar los esfuerzos a compresión. Para que ese *topping* soporte los esfuerzos a tensión es necesario reforzarlo con malla electrosoldada. La malla electrosoldada también evita el agrietamiento por los cambios volumétricos generados por variaciones térmicas. La malla electrosoldada cumple con las especificaciones ASTM A82-94 y ASTM A185-94 para acero liso.

Las dimensiones del sistema consisten en un largo total de 4.10 m, un ancho de 1.32 m y espesor promedio de 0.15 m. La luz libre entre apoyos es de 3.80 m. Las viguetas TI, se encuentran a 1.25 cm del rostro interno de los muros del sistema.



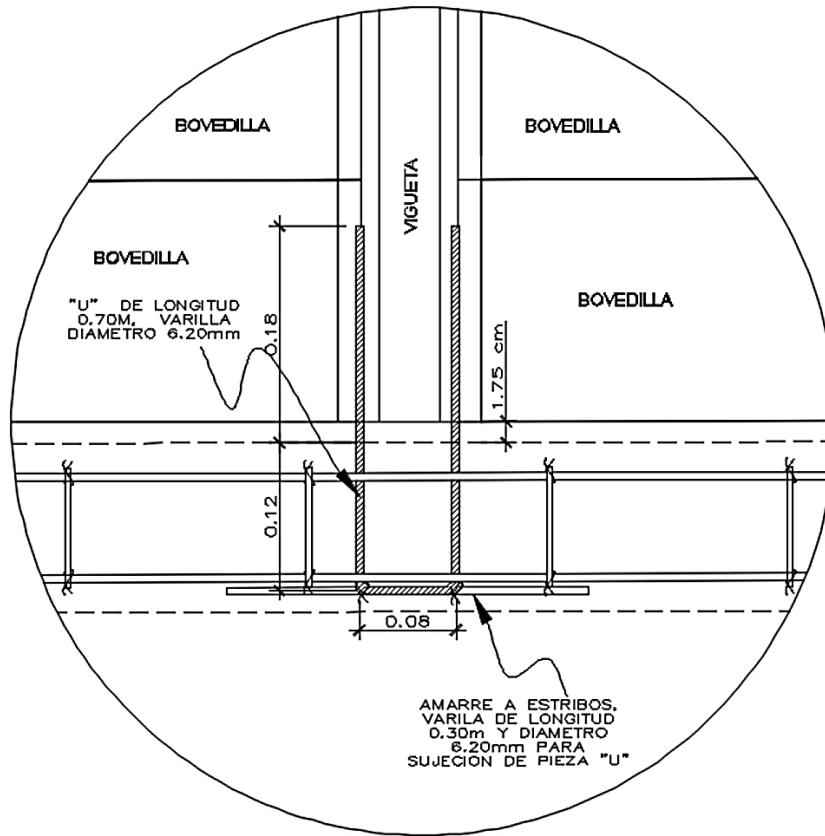
Figura 18. Vista en planta del sistema y detalle del gancho U



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

Además, las viguetas TI no cuentan con continuidad de acero longitudinal con el cual puedan anclarse a la solera de corona, por lo tanto, la metodología utilizada para anclar las viguetas TI con la solera de corona consiste en un gancho en forma de U incorporado de forma horizontal que une la solera y la vigueta asegurando la continuidad en el sistema.

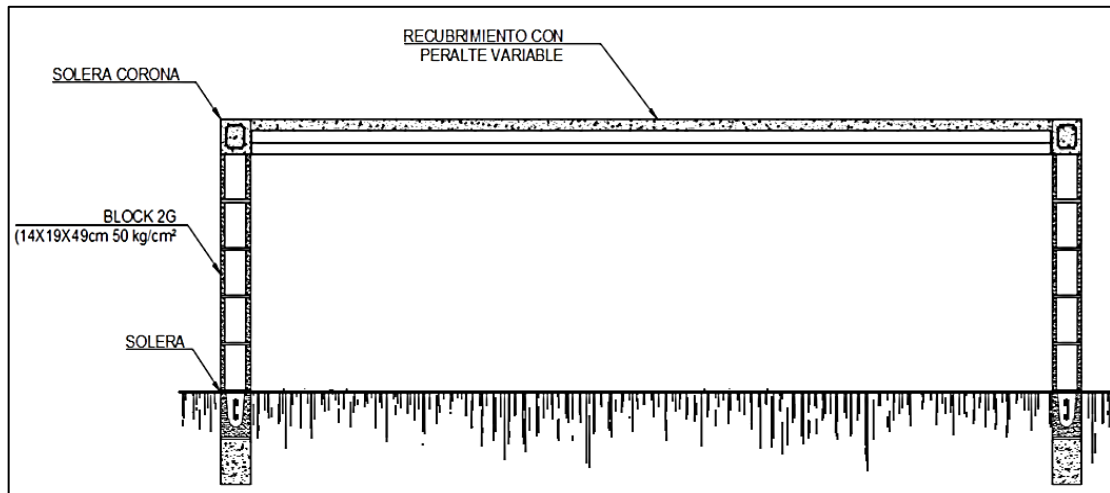
Figura 19. **Detalle del gancho U en el sistema**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

Para asegurar la continuidad y estabilidad en el sistema, además del gancho U, el *topping* de concreto reforzado con electromalla también cumple una función de continuidad uniendo los muros con el sistema de vigueta TI y bovedilla.

Figura 20. **Detalle de sección longitudinal del sistema**



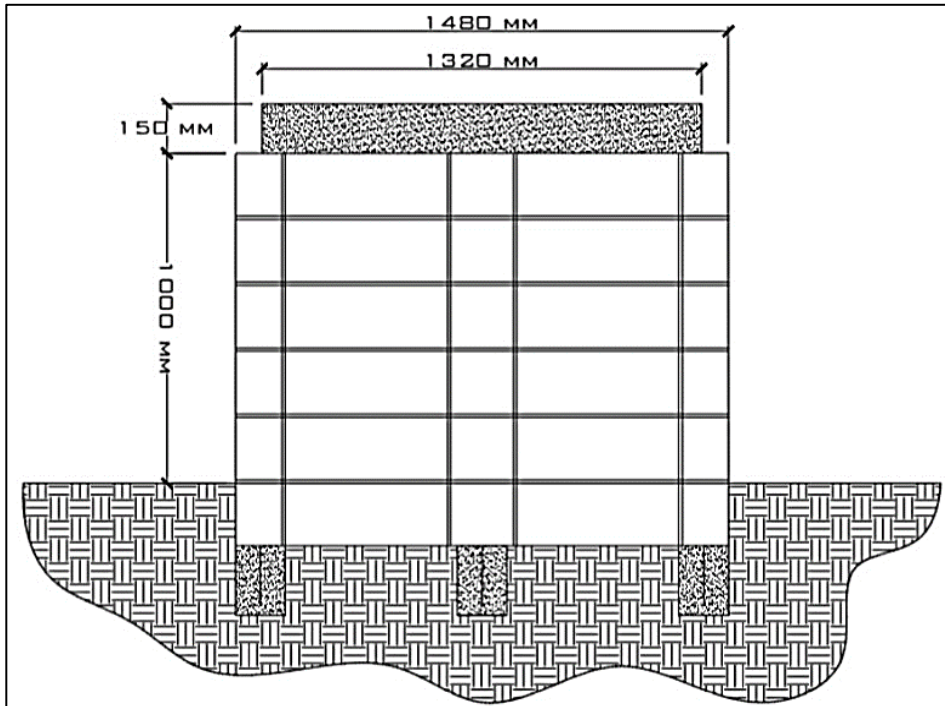
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

### 2.1.2. **Muros o muretes reforzados**

Respecto a los límites dimensionales, los muros están separados por una distancia de 1.25 m entre sus rostros internos. Se encuentran a una altura de 1 m desde el nivel del suelo y comprenden un ancho de 1.48 m.

Respecto a los materiales, están compuestos de bloques huecos de concreto de acuerdo con el sistema del fabricante, y reforzados con acero grado 70. El sistema de blocks del fabricante consta de un sistema personalizado, a diferencia de otros sistemas que se componen de block estándar ya sea tipo A, B o C, de acuerdo con la clasificación establecida en la norma COGUANOR NTG 41054.

Figura 21. **Detalle de muros en el sistema**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Sección de Estructuras. Informe No. ELF 01-NOV2018.*

## 2.2. **Ventajas y desventajas del sistema**

Este sistema está aprobado por FHA y es ideal para viviendas de hasta dos niveles y edificios de hasta tres niveles. Cada componente es realizado en planta de producción automatizada con pruebas de calidad y resistencia. Es un sistema económico debido a que minimiza el uso de formaleta y reduce drásticamente la merma de los materiales.

La losa del sistema es ideal para techos o entresijos, ya sea planos o inclinados. Cumple con los requisitos establecidos en el código ACI 318-14. La

losa fue diseñada para cubrir luces de 9 m con carga viva de hasta 200 kg/m<sup>2</sup>, y para luces de 8 m con carga viva de hasta 500 kg/m<sup>2</sup>. El sistema funciona monolíticamente además de que tiene resistencia en sentido perpendicular a las viguetas. Los elementos son relativamente ligeros a un sistema tradicional y son transportados fácilmente.

La losa no puede emplearse en luces mayores a lo establecido anteriormente y se limita a las condiciones de carga viva que establece el fabricante. Ideal para viviendas y edificios no mayores a dos y tres niveles, respectivamente. Para mantenimiento y remodelaciones, se debe contar con el apoyo de un técnico especializado debido a que no es un sistema común.



### **3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EVALUADO: LOSA TIPO VIGUETA-BOVEDILLA CON MURO REVESTIDO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO**

Este sistema consiste en un sistema semi prefabricado compuesto por una losa de *grout* y nervaduras con viguetas fundidas en sitio monolíticamente con la placa de la losa. El sistema se encuentra reforzado con acero de alta resistencia y malla electrosoldada. Además, todo el sistema se encuentra revestido de poliestireno expandido considerando las disposiciones del código ACI 318-14 en la sección 21.2.1 estableciendo como factor de reducción de resistencia de diseño un valor de 0.90 de elementos sometidos a flexión y el ACI 318-08 en la sección 9.3.2.2 que indica los factores de reducción de resistencia de diseño para cortante y torsión.

#### **3.1. Descripción de los elementos y diseño del sistema**

Los elementos utilizados en el sistema, así como el diseño para el uso de estos, se describe a continuación.

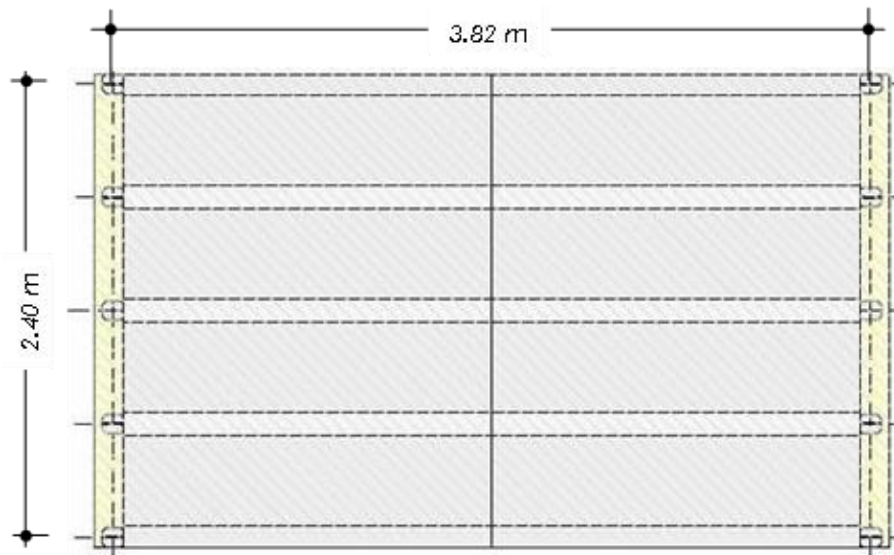
##### **3.1.1. Losa fundida en sitio tipo vigueta y bovedilla**

La losa consiste en un sistema de viguetas fundidas en sitio junto con una placa de concreto reforzado, además de ser continuas con las columnas tipo pin o poste con el fin de formar marcos pequeños continuos. Este tipo de losa se considera como aligerada, cuyas dimensiones consisten en:

- 3.60 m en el sentido largo.
- 2.35 m en el sentido corto.
- 0.20 cm de espesor.

El espesor se compone de 0.06 m de estructura de concreto armado y el resto de poliestireno expandido.

Figura 22. **Planta de losa**



Fuente: Orózco, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto.*

Los elementos que componen la losa consisten en los siguientes descritos:

- Viguetas: las viguetas fundidas en sitio y se encuentran reforzadas con *joist* estándar, dos barras en la parte inferior con diámetro de 6.20 mm y

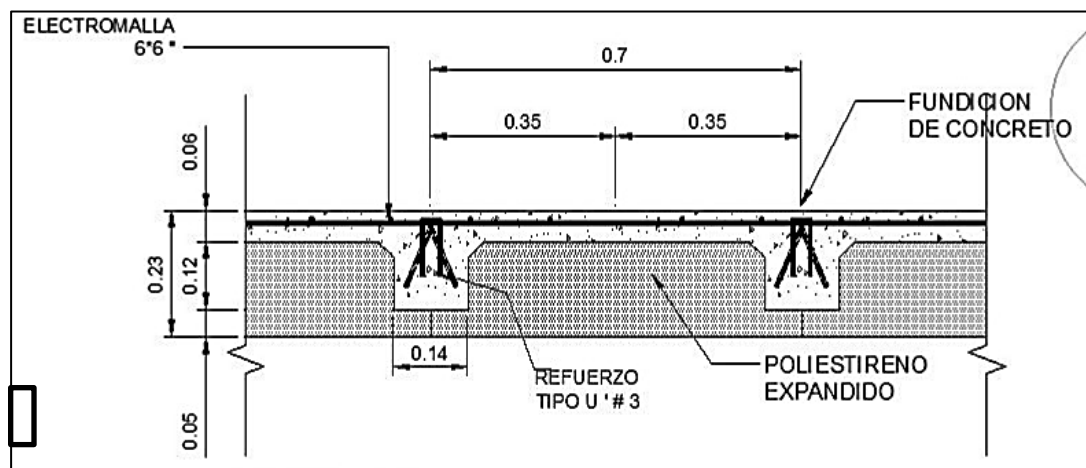


una barra en la parte superior con mismo diámetro. Además, cuentan con un refuerzo tipo U.

- Placa de concreto: la placa de concreto de 6 cm de espesor sobre las viguetas monolíticas del sistema está reforzada con malla electrosoldada de 6" x 6" calibre 8/8.

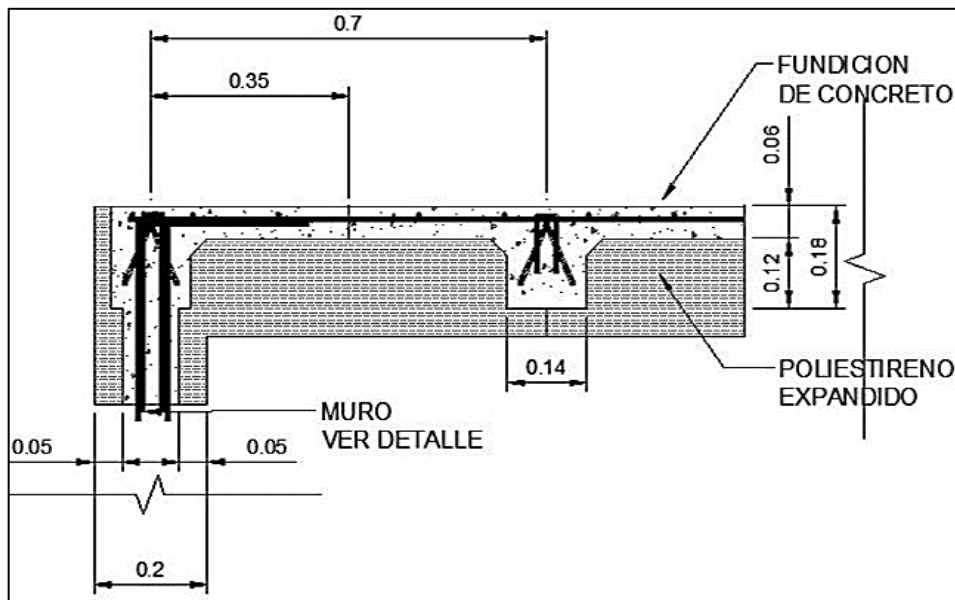
La losa está elaborada con concreto liviano según los códigos de diseño.

Figura 23. Armado de vigueta monolítica sin muro



Fuente: Orózcó, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto.*

Figura 24. Armado de viga monolítica sobre muro



Fuente: Orózco, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto.*

### 3.1.2. Muros con columnas tipo poste o pin

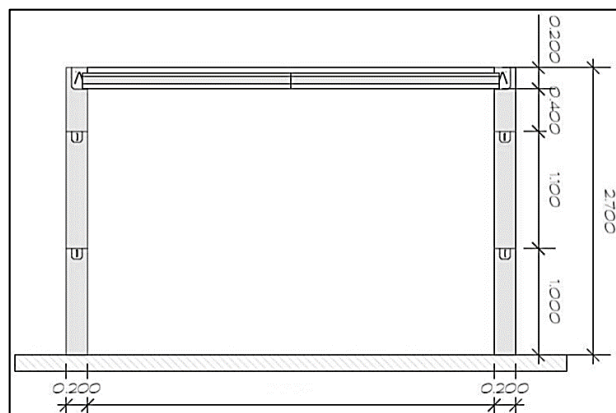
Los muros consisten en un entramado de elementos rígidos, los cuales deben cumplir con ciertos requisitos basados en el principio de mampostería interiormente reforzada. Este sistema consiste en celdas verticales de *grout* reforzado con acero de alta resistencia a distancias aproximadas de entre 0.80 m y 1.00 m considerando que deben existir al menos dos de estas celdas en posición horizontal. Se diseñó este sistema utilizando el método de esfuerzos de trabajo establecido por las normas AGIES para diseño en mampostería. Se busca, que las celdas actúen como marcos de concreto. Este sistema cuenta con dos muros donde uno es sólido y el otro integra una ventana, ambos con un espesor total de 20 cm. La ventana en el muro representa un 14 % de vacío.

Las suposiciones de diseño de mampostería se consideran de acuerdo con el Código Uniforme de la Edificación (UBC 97) del cual se establece:

- Los materiales que componen al muro (poliestireno expandido, concreto y acero) funcionan en conjunto como un material homogéneo.
- La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal del muro es plana.
- Únicamente el acero resiste los esfuerzos de tensión.
- Existe perfecta adherencia entre el acero en el refuerzo vertical y el concreto.
- Los momentos y fuerzas, tanto internos como externos, están en equilibrio.

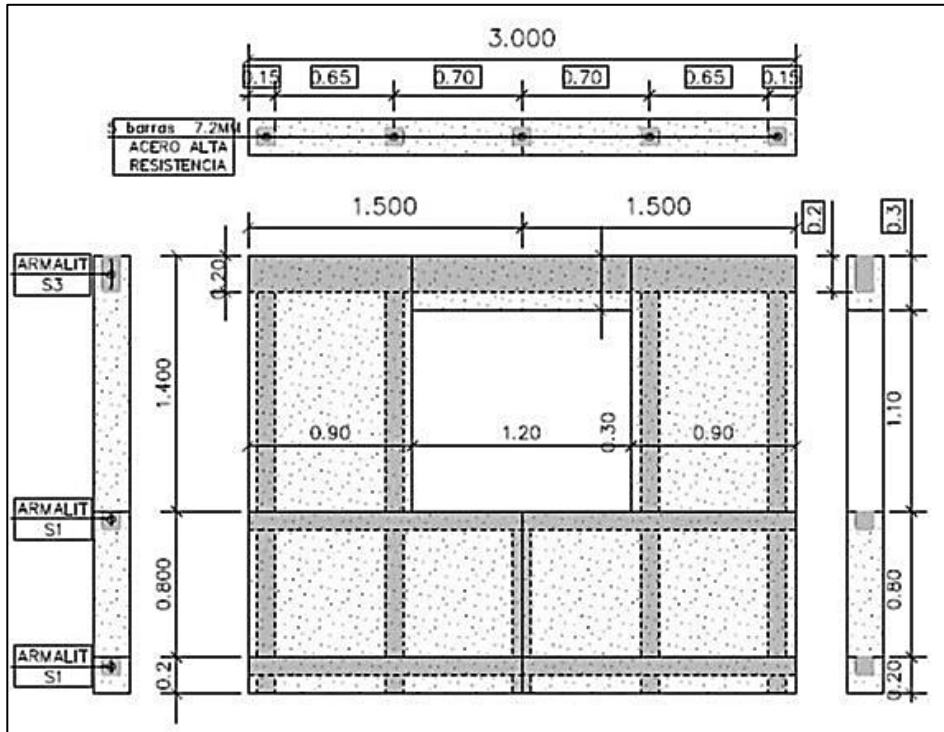
El muro está revestido por el poliestireno expandido el cual, a su vez, se encuentra cubierto por una capa de lechada con una mezcla de fibra de vidrio que cumple la función del repello, y terminado por un cernido tipo remolineado.

Figura 25. **Vista elevada del sistema**



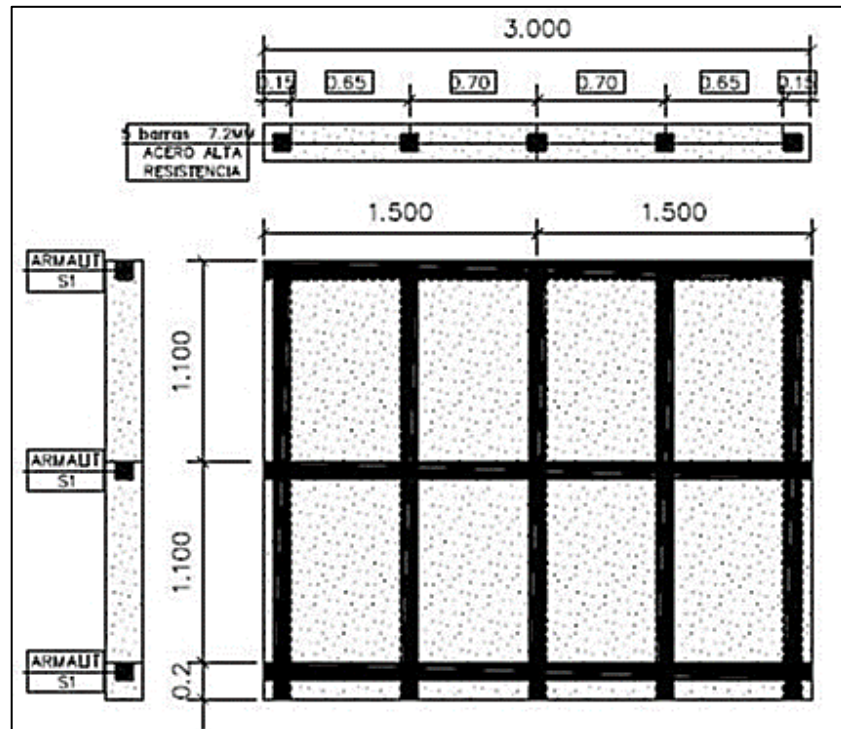
Fuente: Orózco, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto.*

Figura 26. Detalle de muro con ventana



Fuente: Orózco, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto.*

Figura 27. Detalle de muro sólido



Fuente: Orózcó, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto.*

### 3.2. Ventajas y desventajas del sistema

La principal ventaja de este sistema resulta ser que es más económico que un sistema tradicional de mampostería ya que, según el fabricante, es 20 % menos costoso. Los muros a corte cumplen con la integridad estructural requerida para sistemas de mampostería. El sistema tiene buena adherencia entre todos los materiales que lo integran. La fibra de vidrio hace integro al mortero que recubre el poliestireno expandido lo cual reduce el agrietamiento, además el mortero aporta resistencia al sistema estructural de los muros.

Como desventaja, el fabricante recomienda que el valor de diseño del esfuerzo de trabajo debe ser  $40 \text{ kg/cm}^2$ , no recomienda superar este valor ya que el efecto de aplastamiento en este sistema gobierna hasta dicho límite. El nudo muro-losa cumple con los requisitos mínimos de resistencia a corte y resistencia a compresión, pero luego de ensayos de laboratorio aplicados al nudo solera-columna se observó que después de cierto límite la resistencia lateral disminuye y se evidencia por la formación de grietas en dicho nudo. Esto se debe a causa de las juntas frías.

## **4. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA UNIÓN LOSA-MURO EN UN SISTEMA**

### **4.1. Rigidez del sistema muro-losa**

La rigidez que contiene cada elemento que compone al sistema influye en el comportamiento de la estructura ante las acciones de las cargas. En sistemas de mampostería se deben considerar dichas rigideces en el análisis estructural.

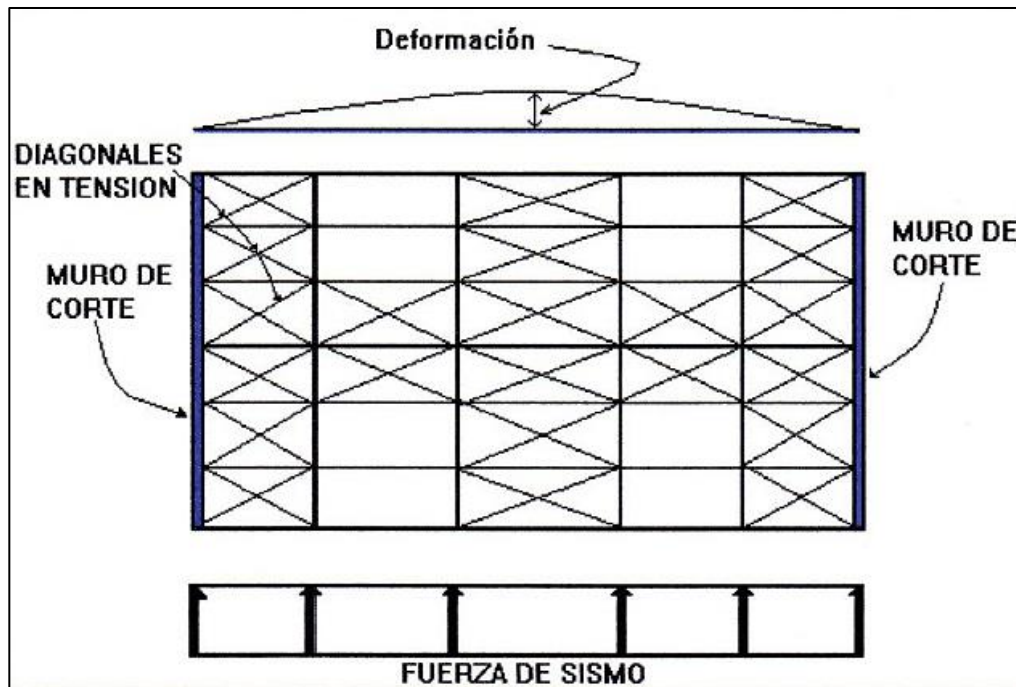
En sistemas de mampostería, en los muros largos predominan las deformaciones por cortante ante las deformaciones por flexión, mientras que en muros cortos predominan las deformaciones por flexión ante las deformaciones por cortante. Las restricciones de los muros, así como las aberturas de puertas y ventanas, son factores por considerar al analizar la rigidez de estos. La densidad y distribución de los muros asegura la rigidez apropiada del sistema ya que las fallas en muros se pueden presentar por la baja calidad de los materiales que los componen y/o por la falta de elementos adecuados de conexión de muros entre sí y estos a su vez con los diafragmas horizontales (techos o entrepisos).

Los diafragmas flexibles pueden presentar vulnerabilidades en su rigidez producto de los efectos por cargas laterales. Por consiguiente, se debe buscar soluciones para rigidizar a estos diafragmas con el fin de que puedan resistir los efectos de un sismo u otras cargas laterales para que estas sean transmitidas de forma eficiente hacia los elementos verticales y finalmente, a la cimentación en sistemas de mampostería.

#### 4.1.1. Rigidización con tensores en diagonal

Un diafragma flexible se puede rigidizar con tensores en diagonal que consisten básicamente en armaduras horizontales cuya deformación lateral por la carga lateral de sismo no exceda  $L/360$ .

Figura 28. Tensores diagonales en un diafragma flexible



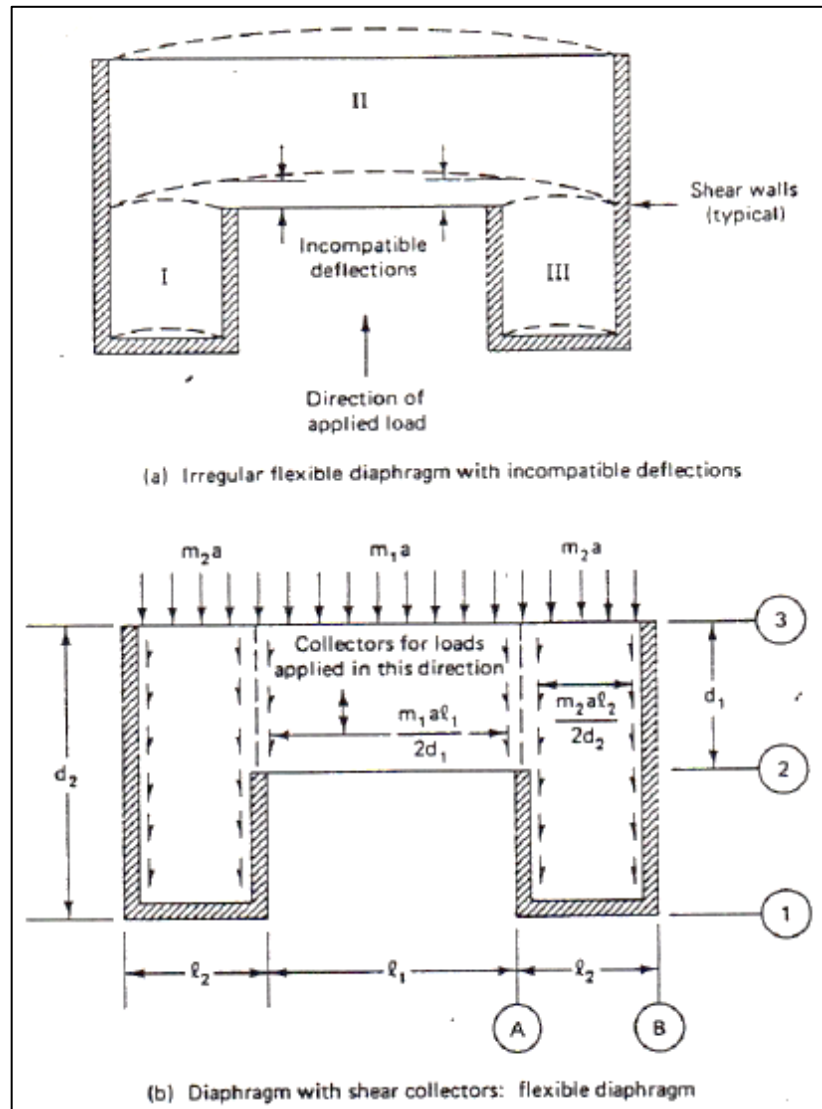
Fuente: Poveda, Á. (2010). *Edificios de mampostería*.

#### 4.1.2. Vigas colectoras en diafragmas flexibles

Las vigas colectoras son elementos que funcionan como puntales de tensión o compresión útiles cuando la configuración en planta contiene esquinas entrantes. Utilizando vigas colectoras se busca rigidizar todo el sistema de manera que se evite la incompatibilidad de deformaciones en las zonas de unión.



Figura 29. **Uso de vigas colectoras en un diafragma flexible**



Fuente: Poveda, Á. (2010). *Edificios de mampostería*.

#### 4.2. Efectos de las cargas laterales sobre sistemas de mampostería

Las proporciones de los muros de mampostería son tales que soportan la falla por cortante sobre la falla por flexión por lo que no se espera que el sistema

disipe energía como en un campo inelástico donde se busca que el mecanismo de falla forme la mayor cantidad posible de articulaciones plásticas en secciones de mayor ductilidad. Sin embargo, es posible dimensionar muros donde rija la falla por flexión y aprovechar su capacidad de carga, generalmente sucede esto en edificios de mediana altura.

Los muros de mampostería que son colocados como relleno en crujías en marcos de concreto o de acero pueden mostrar cierta ductilidad y capacidad de disipar energía siempre que la resistencia al cortante en los extremos de las columnas sea suficiente para soportar la falla por tensión diagonal en el muro de mampostería que sucede al sobrepasar los esfuerzos por cortante en este. En muros de mampostería reforzada es necesario que el refuerzo esté correctamente anclado y sea continuo para asegurar el correcto funcionamiento y rigidez del sistema.

Generalmente, en viviendas de uno o dos niveles y en techos de edificios se utilizan diafragmas flexibles en los cuales, durante un sismo, se puede generar un efecto de látigo debido a los cambios de rigidez en el sistema.

#### **4.3. Conexiones entre diafragmas y muros**

Para sistemas de mampostería que funcionan como estructuras tipo cajón, es importante asegurar una correcta conexión entre las losas o entrepisos y los muros. En el capítulo 16 del código ACI 318-14 se establece que, para conexiones a otros miembros para elementos prefabricados, se permite que las fuerzas se transfieran por medio de juntas inyectadas con mortero, llaves de cortante, apoyos, anclajes, conectores mecánicos, refuerzo de acero, afinados de piso reforzado, o una combinación de estos métodos. Las conexiones y regiones de miembros adyacentes a las conexiones se diseñan para resistir las

fuerzas y acomodar las deformaciones causadas por todos los efectos de las cargas en el sistema estructural prefabricado.

La resistencia requerida para la conexión de muros a otros miembros para sistemas prefabricados se calcula de acuerdo con los distintos métodos de análisis estructural conocidos, o bien a los procedimientos de análisis que establece el ACI 318-14 así como las combinaciones de carga. La resistencia de diseño de las conexiones de miembros prefabricados debe ser mayor o igual a la resistencia requerida para las conexiones y regiones adyacentes.

Para sistemas no prefabricados de mampostería se asegura una correcta conexión entre la losa y el muro por medio del cálculo de corte por metro de unión losa-muro con la ecuación siguiente:

$$v_u = \frac{V_u}{\phi b d}$$

Donde:

- $v_u$ : Cortante por metro de unión losa-muro, en kg/cm<sup>2</sup>.
- $V_u$ : Cortante último total a lo largo del muro, en kg.
- $\phi$ : Factor de reducción de resistencia para cortante (0.75).
- $b$ : Longitud del muro, en cm.
- $d$ : Espesor efectivo de la losa (0.80h), en cm.
- $h$ : Espesor total de losa, en cm.

La capacidad del concreto en la losa se define por la siguiente ecuación:

$$v_c = 0.53\sqrt{f'_c}$$

Donde:

- $v_c$ : Capacidad del concreto.
- $f'_c$ : Resistencia a la compresión del concreto.

Si  $v_u \geq v_c$ , entonces el cortante lo tomará el concreto, de lo contrario lo tomará el acero el cual se obtiene por medio de los principios de cortante por fricción que se establece en el ACI318-14 en la sección 22.9:

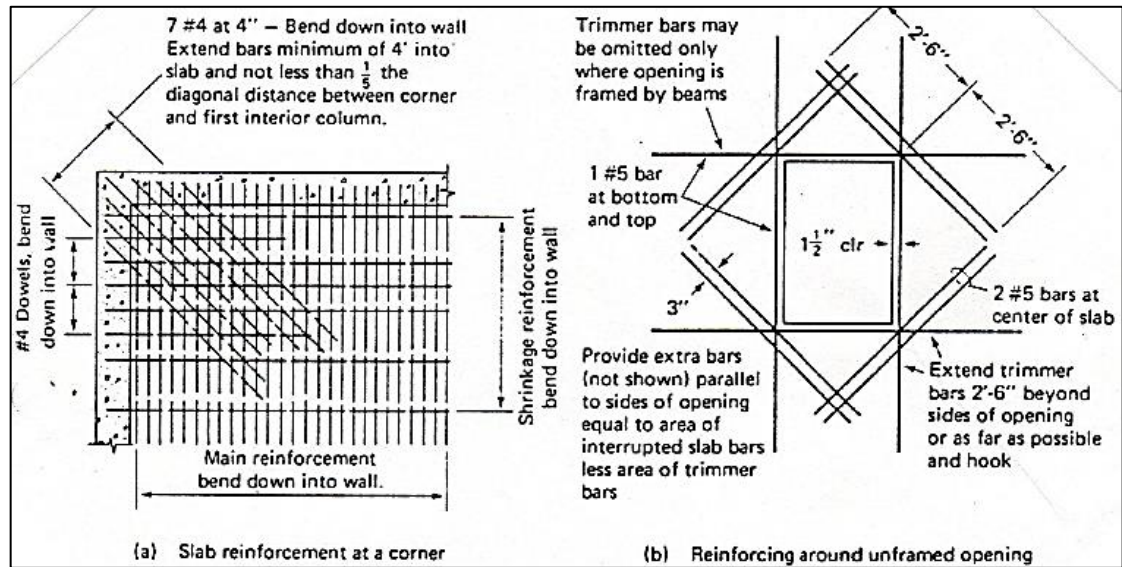
$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu}$$

Donde:

- $A_{vf}$ : Área de refuerzo de cortante por fricción a lo largo del muro, en  $\text{cm}^2$ .
- $f_y$ : Resistencia a la fluencia del refuerzo no preesforzado, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .
- $\mu$ : Coeficiente de fricción que será 1.0 para concreto de peso normal colocado contra concreto endurecido que está limpio, libre de lechada, e intencionalmente rugoso con una amplitud total de aproximadamente 6 mm, según la tabla 22.9.4.2 de ACI 318-14.

Para este tipo de sistemas el ACI 318-14 recomienda colocar refuerzo adicional en áreas donde la estructura se vea comprometida por una mayor concentración de esfuerzos sean estas las esquinas de aperturas o vanos de puertas y ventanas, y ductos, así como se indica en la figura siguiente:

Figura 30. Refuerzo adicional



Fuente: Poveda, Á. (2010). *Edificios de mampostería*.

Este mismo principio puede ser aplicado para sistemas tipo cajón con elementos prefabricados para proveer la reducción de concentración de esfuerzos en las áreas vulnerables.

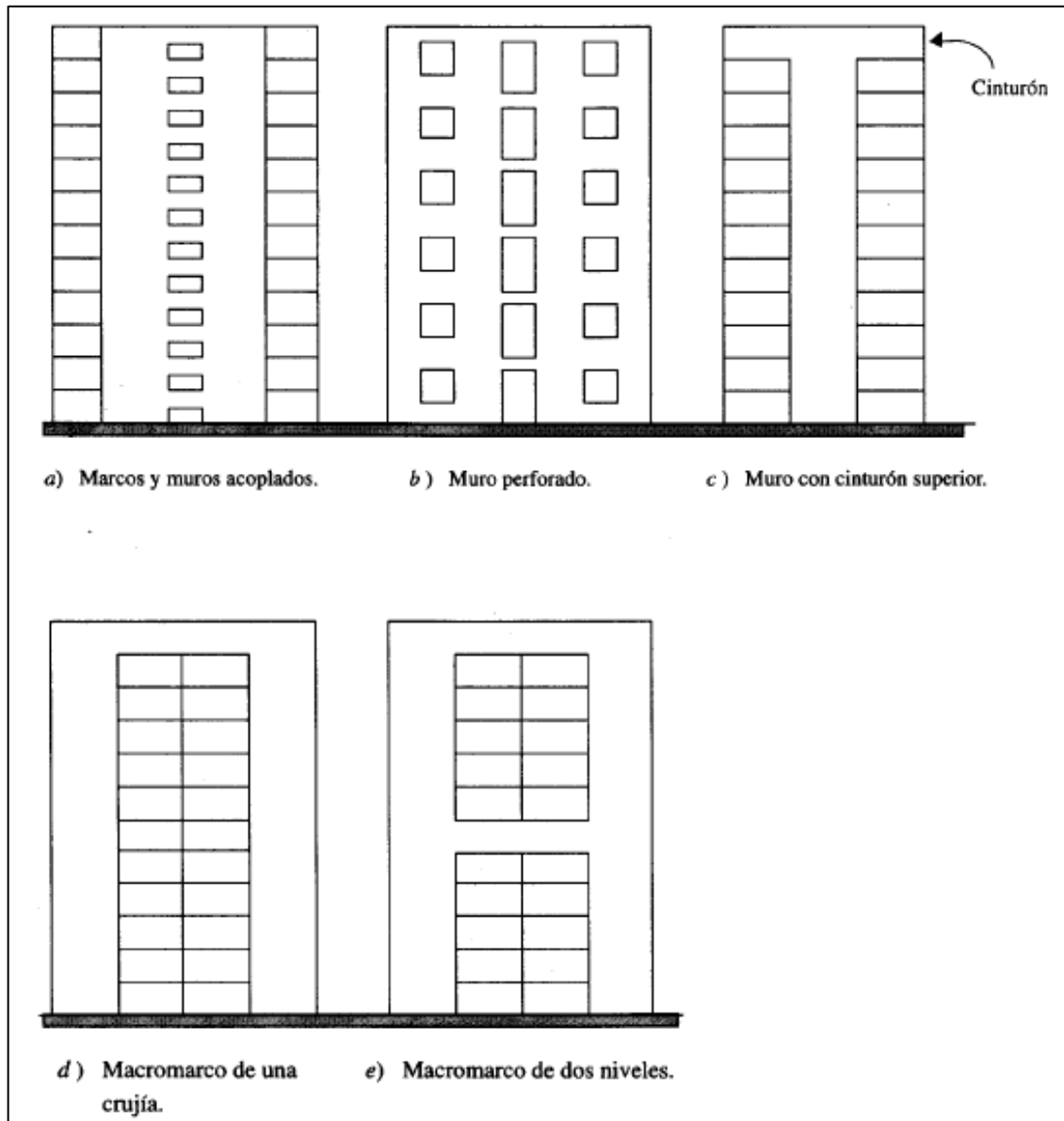
#### 4.4. Otras formas de rigidización de sistemas estructurales elementales

La combinación de distintos sistemas estructurales elementales puede resultar en una correcta respuesta de la estructura ante los efectos causados por fuerzas laterales. Una correcta distribución de elementos rigidizantes es ventajoso para reducir costos, libertad de uso de espacio, o bien asegurar la ductilidad de la estructura. Una distribución inapropiada de estos elementos rigidizantes podría llevar a la concentración excesiva de esfuerzos en estas áreas de la estructura y comprometer la integridad estructural debido a la extrema

diferencia de rigideces. Cualquier irregularidad de rigidez implicaría la transmisión de fuerzas elevadas, especialmente la transmisión crítica de fuerzas a la cimentación, por lo que no es recomendable concentrar la rigidez en pocos elementos rigidizantes.

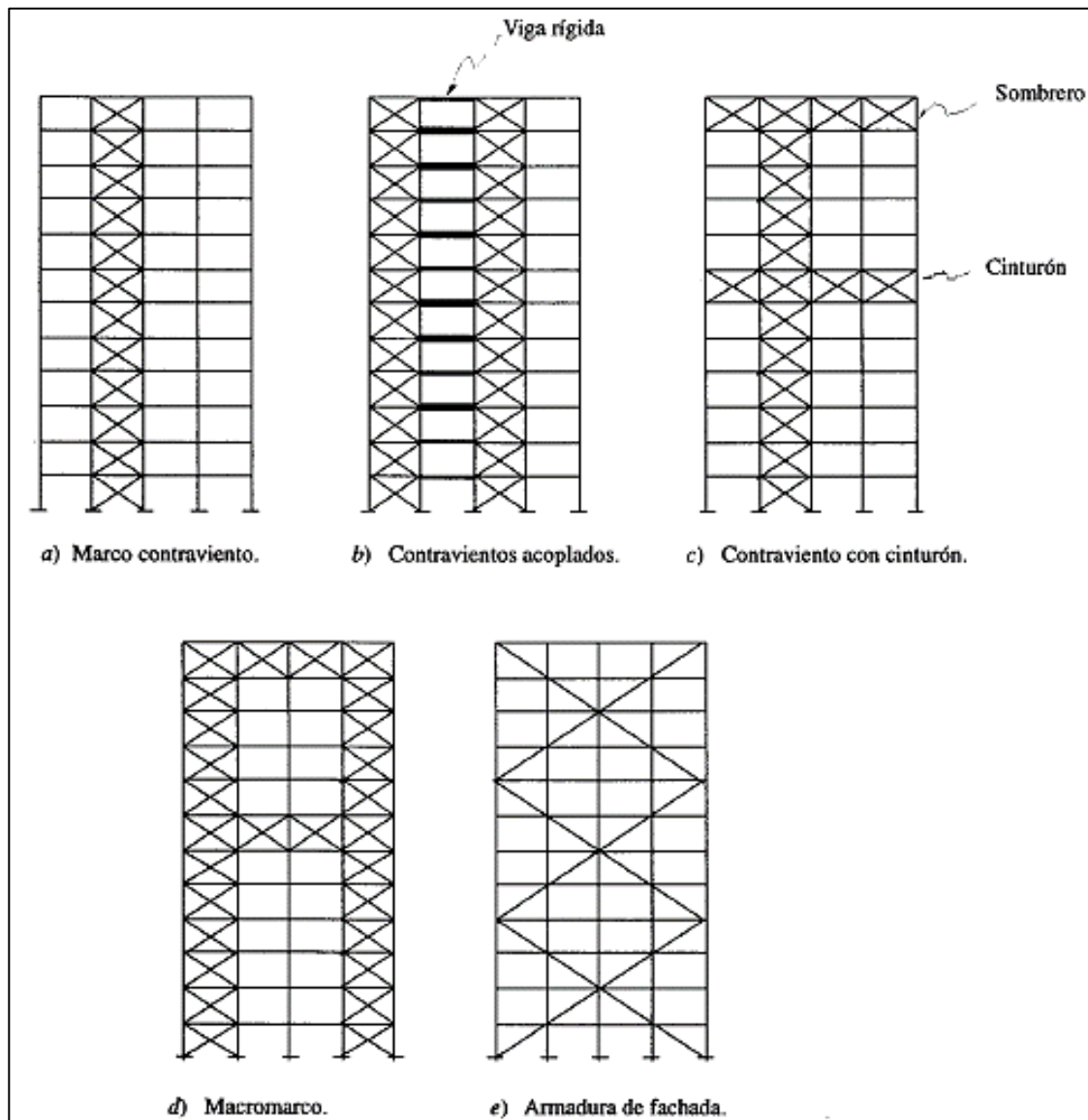
El aprovechamiento de las fachadas de casas o edificios de diferentes sistemas estructurales puede ser una forma de rigidizar el sistema ya que permite distintas soluciones para lograrlo, de manera que se obtiene la ventaja de distribuir la resistencia de fuerzas en el perímetro y a su vez minimizar la transmisión de esfuerzos a la cimentación. Algunas de estas soluciones consisten en la combinación de marcos y crujeías con contravientos o con muros rígidos.

Figura 31. Edificios rigidizados con muros de concreto acoplados



Fuente: Bazán, E. y Meli, R. (2005). *Diseño sísmico de edificios*.

Figura 32. Edificios rigidizados con contravientos



Fuente: Bazán, E. y Meli, R. (2005). *Diseño sísmico de edificios*.



#### **4.5. Consideraciones de diseño de conexiones viga-columna según ACI 352RS-02**

El código ACI 352RS-02 dispone sobre las conexiones de elementos donde se clasifican en dos tipos:

- Tipo 1: conexión que se compone por miembros sin deformaciones inelásticas significativas.
- Tipo 2: conexiones que deben disipar energía por medio de deformaciones alternadas en el rango inelástico.

Las conexiones deben tener la capacidad de resistir las fuerzas transferidas por los miembros adyacentes considerando efectos de excentricidad en cada miembro. Para conexiones tipo 2 las fuerzas que transfieren los elementos al nudo no deben limitarse a un análisis de cargas mayoradas, sino a la resistencia a la flexión de los elementos. Se debe considerar el efecto de la losa dentro de un ancho de ala efectivo, por lo que las fuerzas que llegan al nudo deben basarse en la resistencia a la flexión de la viga considerando la contribución al momento negativo por el efecto de la losa en tracción. Se debe de determinar los miembros que alcanzan en primera instancia la fluencia a flexión debido a la aplicación de carga.



## **5. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **5.1. Metodología y diseño del experimento para el sistema losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado**

Para este sistema se elaboraron ensayos para simular una carga dinámica sobre una franja actuante de 10 cm. Los materiales, equipo y resultados obtenidos se describen a continuación.

#### **5.1.1. Equipo utilizado**

El equipo utilizado consiste en gatos hidráulicos, deformímetros, un tubo de concreto de 32" de diámetro y peso de 2.2 toneladas, estructura de madera y cilindros de concreto con peso entre 12 kg y 14 kg cada uno.

#### **5.1.2. Materiales**

Se utilizaron cuatro placas de 40 cm para el mecanismo de arriostamiento del sistema sujetadas con tornillos tipo *Hilti* de dos medidas:

- Diámetro 1/2" y longitud de 4".
- Diámetro 1/2" y longitud de 2".

### 5.1.3. Metodología de ensayo

Para fines comparativos, se elaboraron ensayos aplicando carga de la misma forma, pero en diferentes formas del sistema: arriostrado y sin arriostrar. Para el sistema arriostrado se elaboraron placas metálicas que sirven

Se elaboraron cuatro placas que fueron colocadas uniendo la losa con el muro de mampostería. Se aseguraron con tornillos tipo *Hilti* de  $\frac{1}{2}$ " x 4" y de  $\frac{1}{2}$ " x 2".

Figura 33. Placas metálicas



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

La perforación se hizo de manera que la placa formara un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la horizontal. La colocación de las placas se realizó cuando la losa estaba cargada en una franja de 10 cm, por un tubo de concreto de 32" y peso de 2.2 toneladas.

Figura 34. **Placas colocadas en sistema**

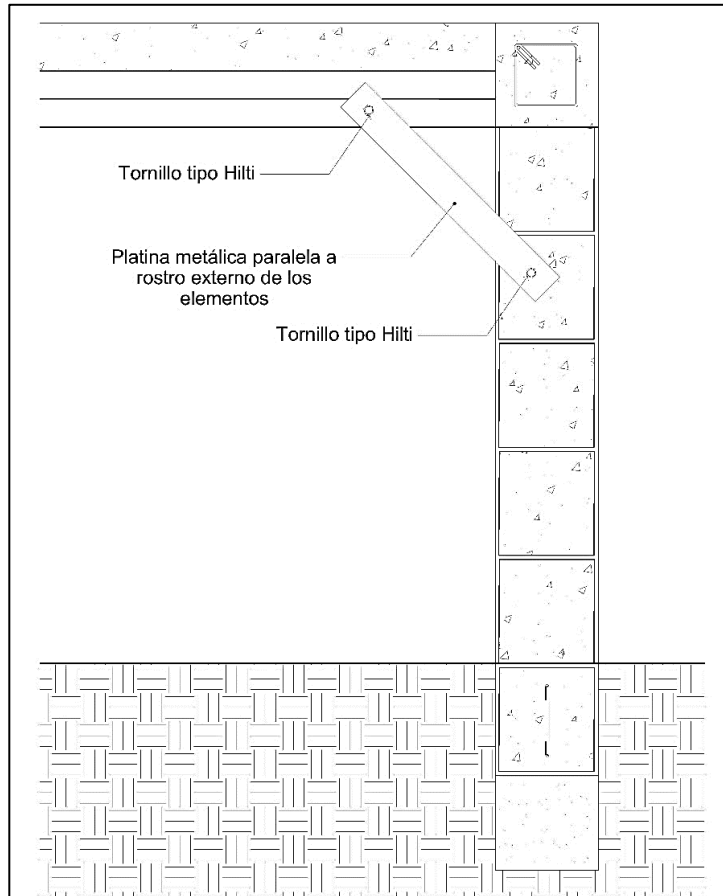


Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.

Las placas fueron colocadas de dos maneras:

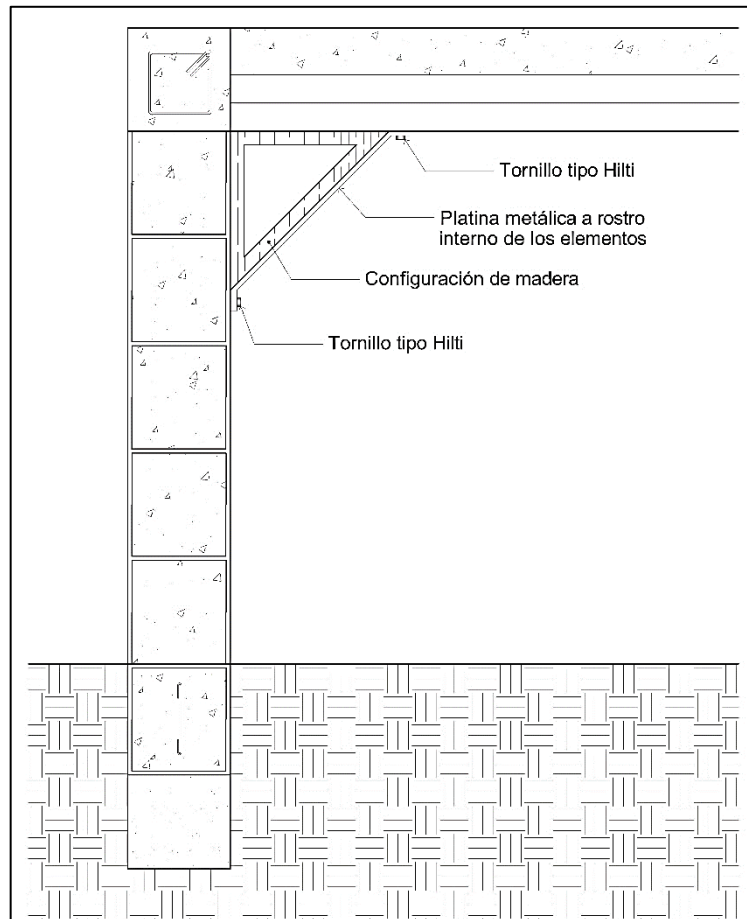
- Placa rígida: en un lado del sistema, se anclaron dos placas paralelas al rostro exterior de la losa y del muro anclando los tornillos al centroide de cada elemento.
- Placa biela: en el otro lado, se anclaron dos placas en los rostros interiores de la losa y del muro, de manera que el mecanismo de acción es similar a un sistema de bielas con la consideración que las articulaciones para este caso serán rígidas. Se agregó una configuración de madera dentro del espacio del nudo para rigidizar más el sistema.

Figura 35. **Placas a rostros externos**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 36. **Placas a rostros internos**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Además, se agregó una configuración de madera dentro del espacio resultante en las esquinas donde la placa metálica está en el rostro interno de los elementos que conforman el sistema con el fin de rigidizar más el sistema.

En dos esquinas del mismo lado respecto al sentido corto de la losa se colocaron dos placas a rostros internos reforzados con la configuración de madera, y en las otras dos esquinas se colocaron las placas a rostros externos.

Figura 37. **Configuración de madera en el sistema**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 38. **Placas a rostros externos en el sistema**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

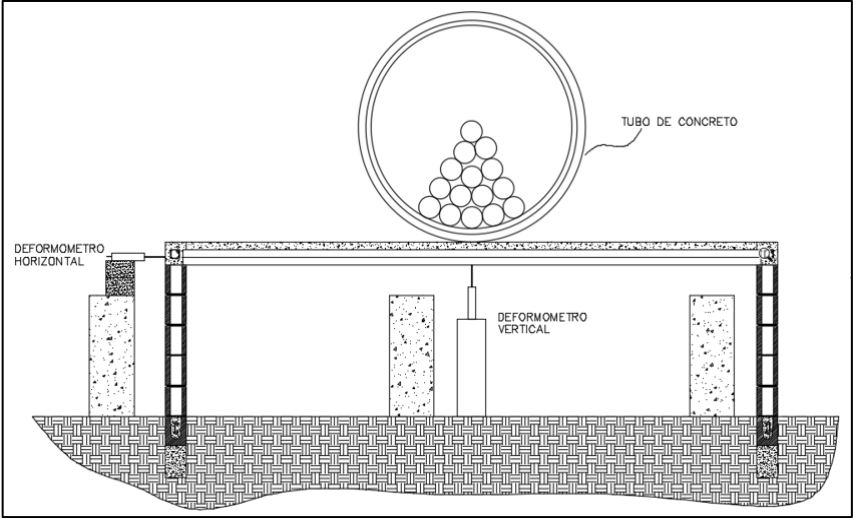


Figura 39. Vista general del sistema ensayado



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 40. Diagrama de metodología de carga en el sistema



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2019). *Sección de Estructuras. Informe No. 01 ELF 26/04/2019.*

Se ejecutaron tres ensayos dinámicos:

- El primer ensayo consiste en el movimiento del tubo de concreto de 2.2 toneladas con el sistema sin arriostrar.
- El segundo ensayo consiste en el movimiento del tubo de concreto de 2.2 toneladas con el sistema arriostrado.
- El tercer ensayo consiste en el movimiento del tubo de concreto de 2.2 toneladas, además de unos cilindros de concreto con peso entre 12 kg y 14 kg con el sistema arriostrado (figura 40).

#### 5.1.4. Datos obtenidos

De los ensayos ejecutados, se obtuvo lo siguiente.

Tabla V. **Datos obtenidos primer ensayo dinámico. Sistema sin arriostrar**

Deformación (cm)		Carga (kg)	Condición de carga	Observaciones
Horizontal	Vertical			
0.00	0.00	2,600.00	Estática	INICIO
1.30	0.60	2,600.00	Dinámica	1 ciclo
9.10	0.70	2,600.00		3 ciclos
0.15	0.10	2,600.00	Estática	
1.00	0.60	2,600.00	Dinámica	
0.10	0.60	2,600.00	Estática	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla VI. **Datos obtenidos segundo ensayo dinámico. Sistema arriostrado**

Deformación (cm)		Carga (kg)	Condición de carga
Horizontal	Vertical		
0.00	0.00	2,600.00	Estática
0.10	0.20	2,600.00	
0.10	0.20	2,600.00	
1.00	0.30	2,600.00	Dinámica
0.10	0.20	2,600.00	Estática
0.85	0.30	2,600.00	Dinámica
0.15	0.20	2,600.00	Estática
0.10	0.20	2,600.00	
0.65	0.40	2,600.00	Dinámica
0.15	0.30	2,600.00	Estática
0.10	0.50	3,084.50	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla VII. **Datos obtenidos tercer ensayo dinámico. Sistema arriostrado**

Deformación (cm)		Carga (kg)	Condición de carga
Horizontal	Vertical		
0.00	0.00	3,084.50	Estática
1.35	0.50	3,084.50	Dinámica
0.20	0.15	3,084.50	Estática
1.45	1.10		Dinámica
0.25	0.40		Estática
1.65	0.80		Dinámica
0.10	0.10		Estática
1.65	0.55	2,653.40	Dinámica
0.05	0.10	2,653.40	Estática

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

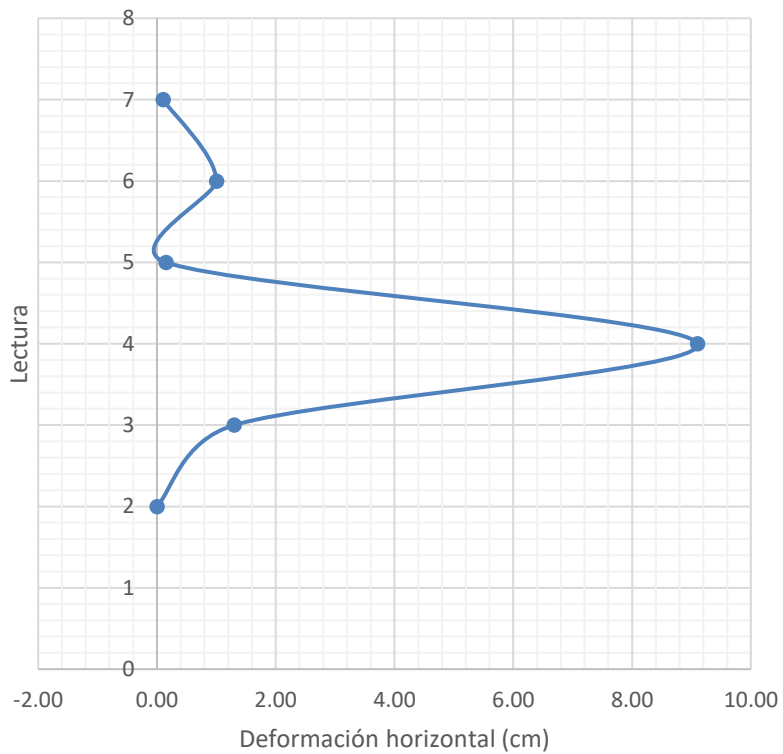
### 5.1.5. Resultados: gráficas y comparaciones del sistema

Se realizaron tres ensayos dinámicos, de los cuales uno es sin arriostrar y los otros con el sistema arriostrado.

#### 5.1.5.1. Primer ensayo dinámico

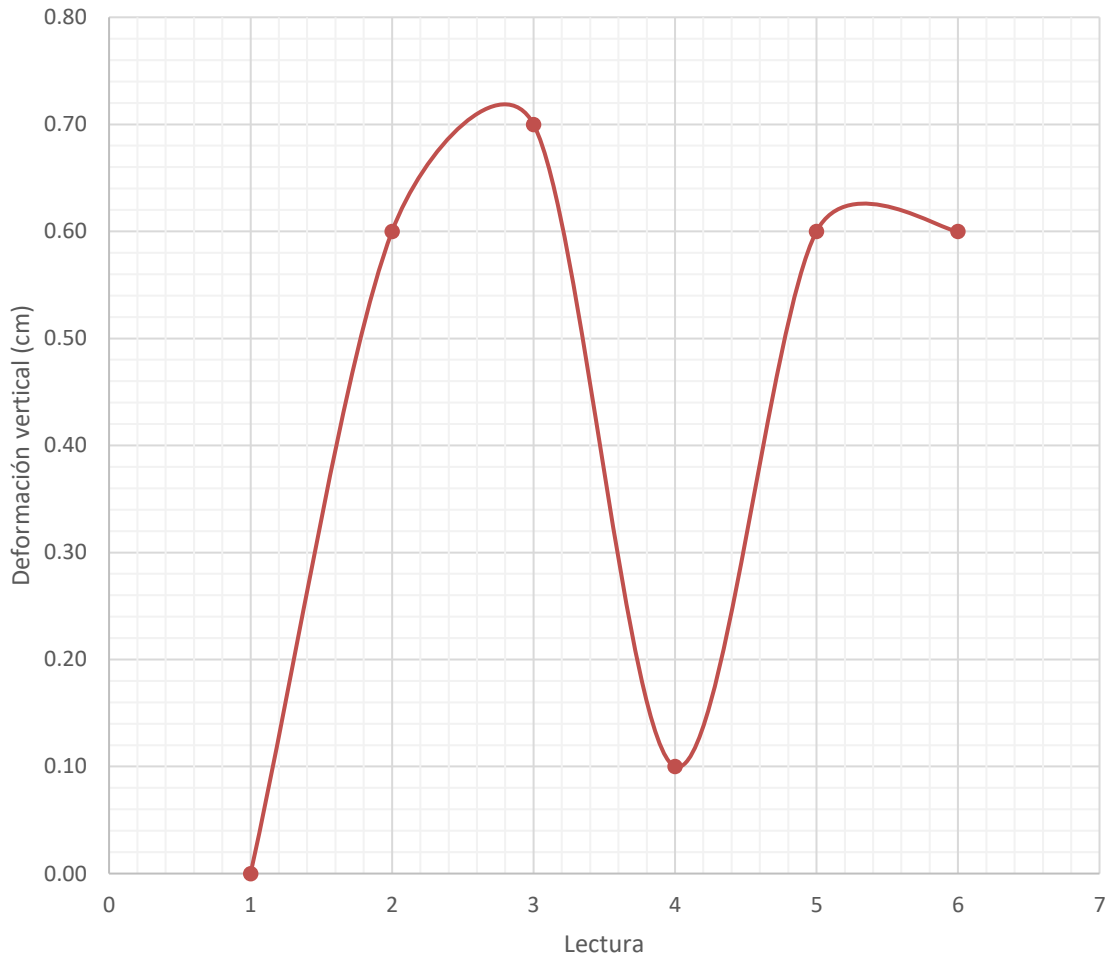
Para el primer ensayo dinámico del sistema sin arriostrar se obtuvieron deformaciones verticales y horizontales.

Figura 41. **Curva de deformación horizontal primer ensayo dinámico sin arriostrar**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 42. **Curva de deformación vertical primer ensayo dinámico sin arriostrar**

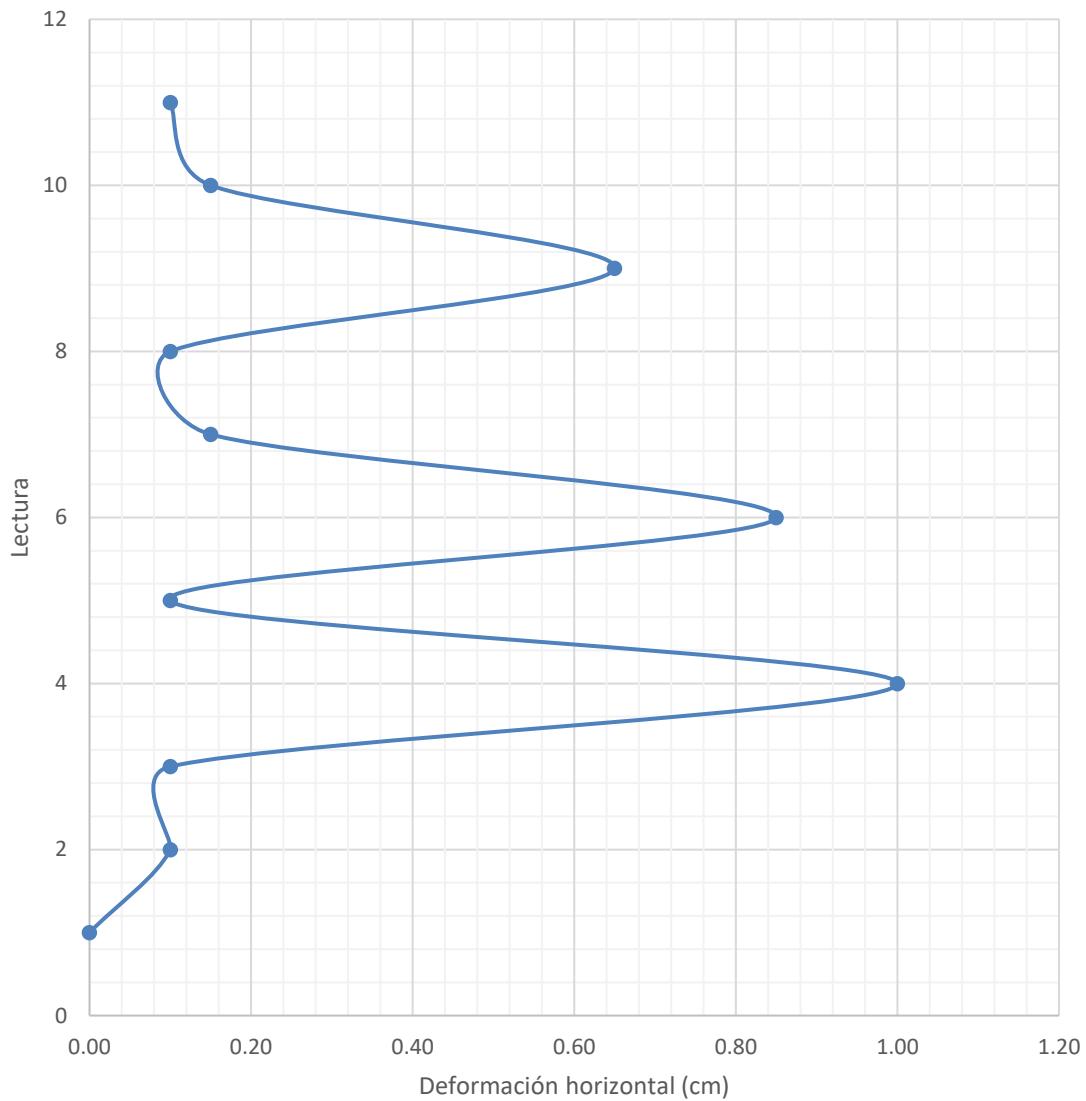


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

### 5.1.5.2. Segundo ensayo dinámico

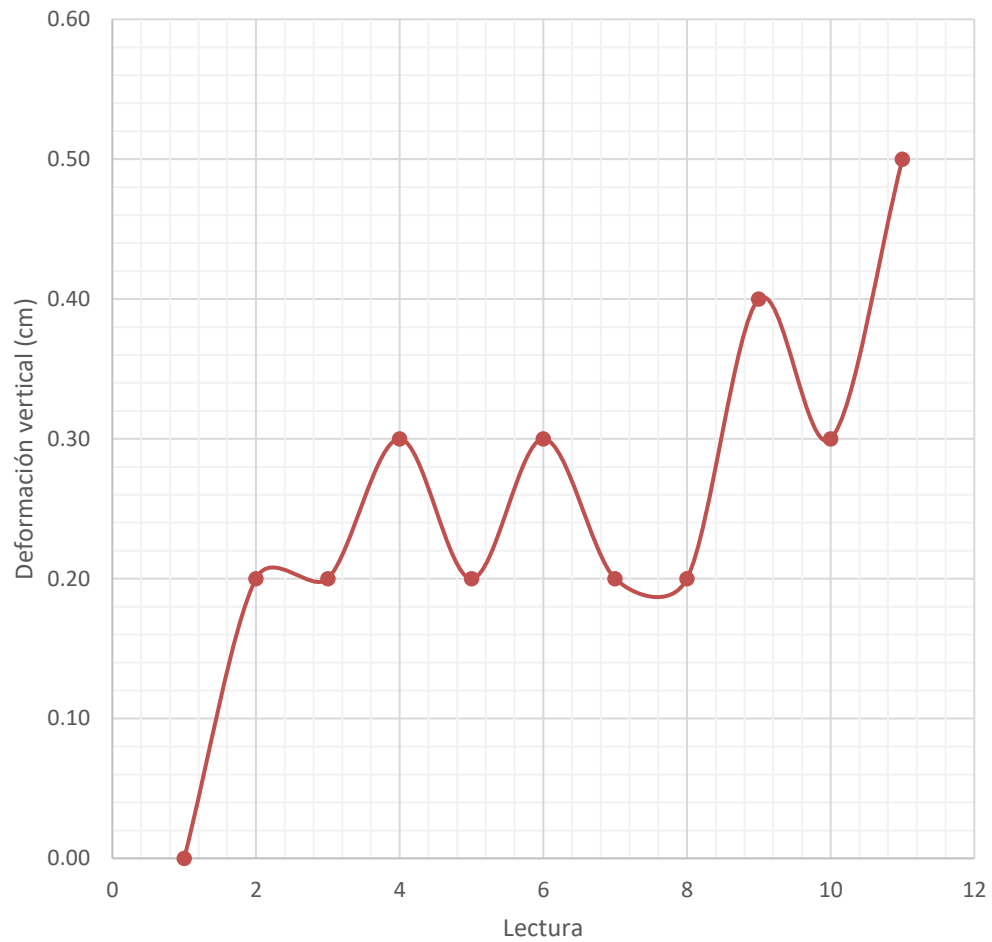
Para el segundo ensayo dinámico del sistema, en este caso arriostrado con la placa metálica y madera, se obtuvieron deformaciones verticales y horizontales como se indica en las figuras siguientes.

Figura 43. **Curva de deformación horizontal segundo ensayo dinámico sistema arriostrado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 44. **Curva de deformación vertical segundo ensayo dinámico sistema arriostrado**

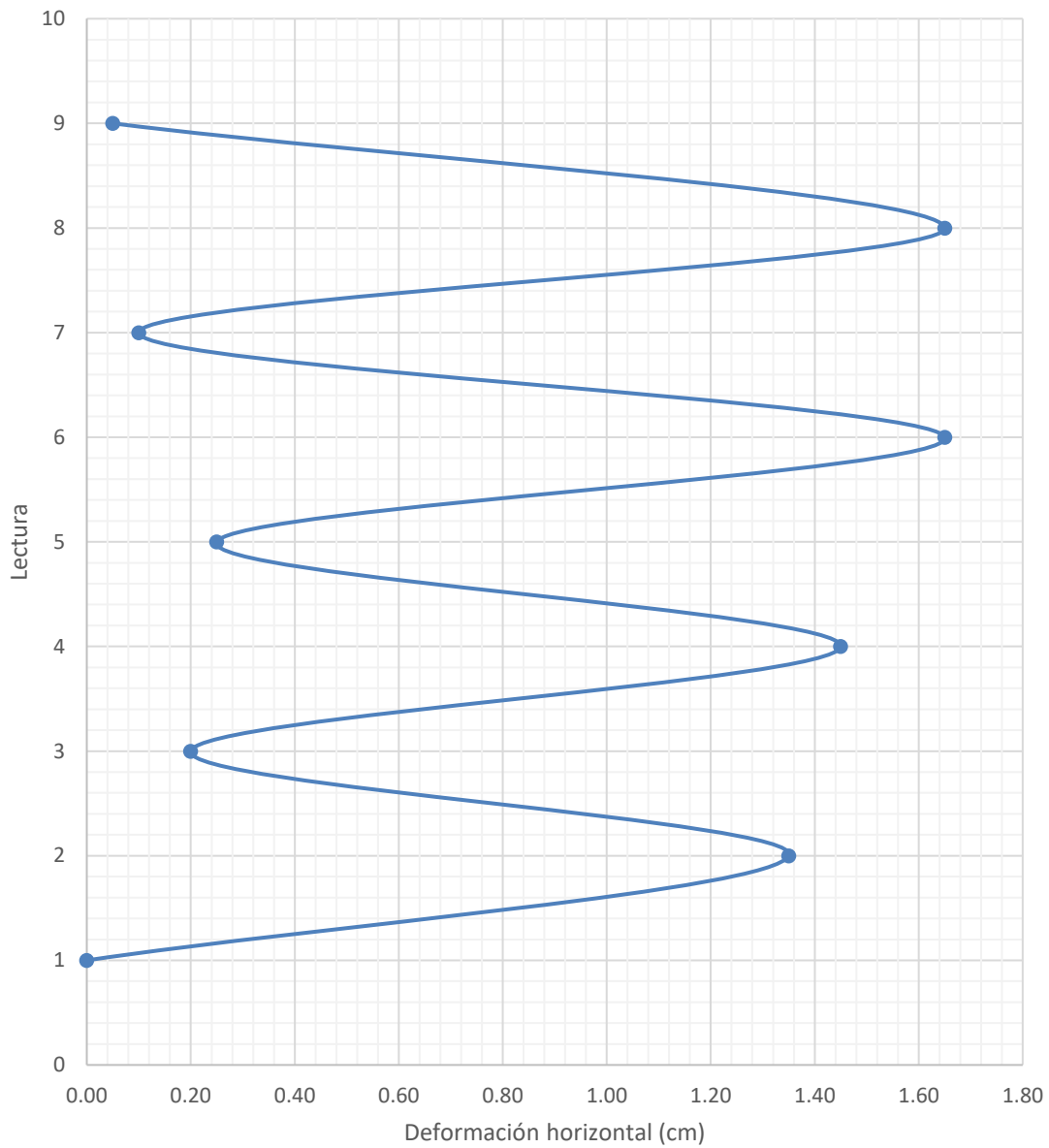


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

### 5.1.5.3. Tercer ensayo dinámico

Para el tercer ensayo dinámico del sistema, en este caso arriostrado con la placa metálica y madera, se obtuvieron deformaciones verticales y horizontales como se indica en las figuras siguientes.

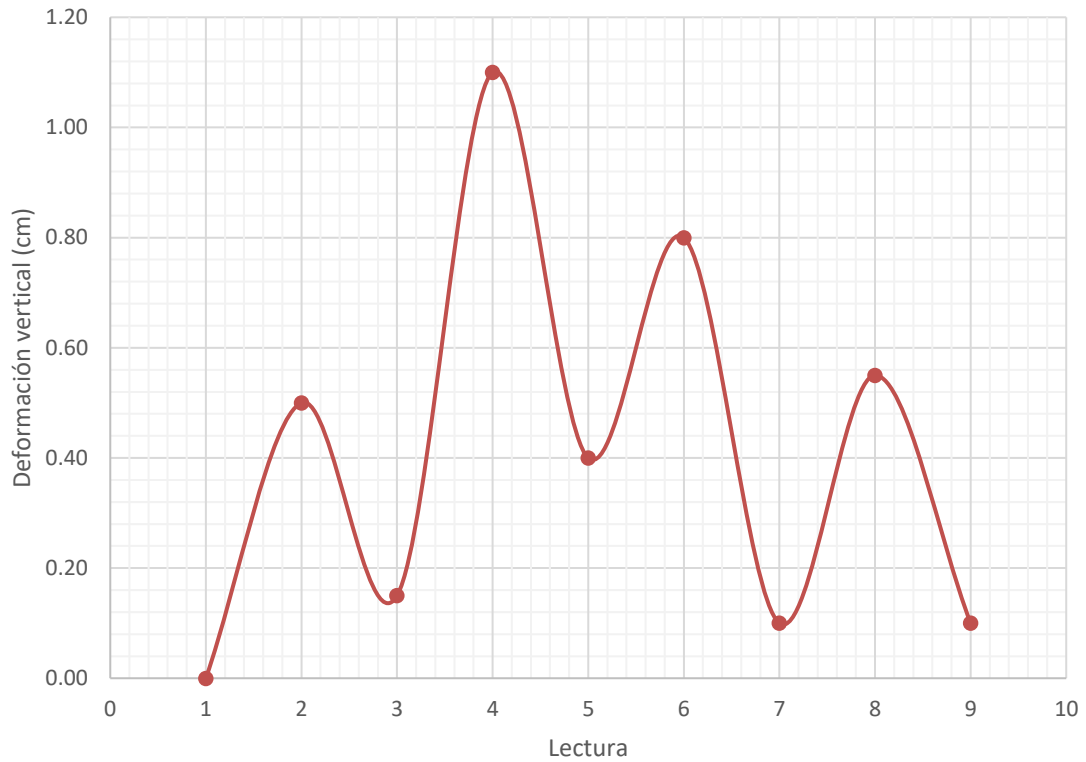
Figura 45. **Curva de deformación horizontal tercer ensayo dinámico sistema arriostrado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.



Figura 46. **Curva de deformación vertical tercer ensayo dinámico sistema arriostrado**

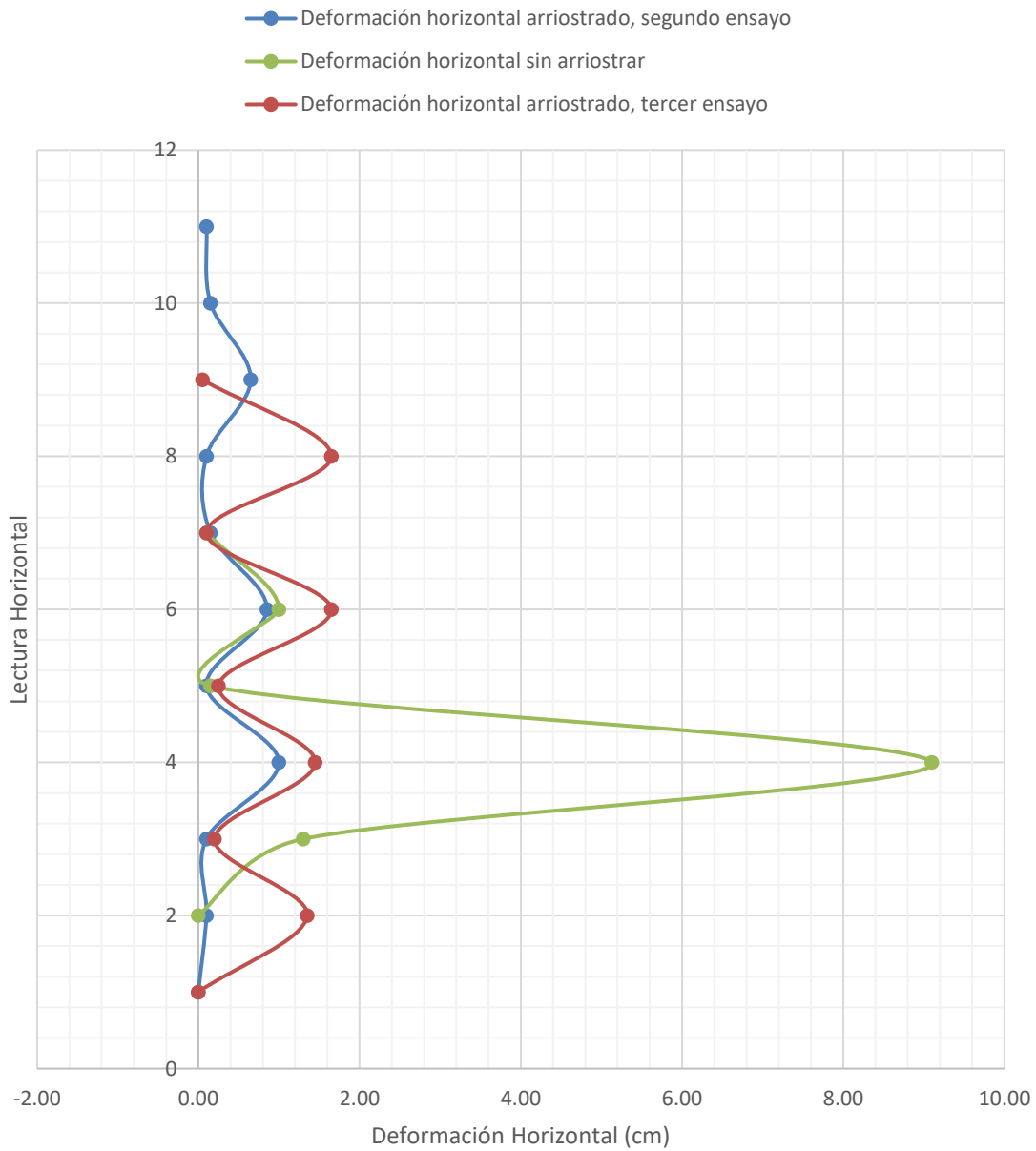


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

#### **5.1.5.4. Comparación del sistema sin arriostrar con el sistema arriostrado**

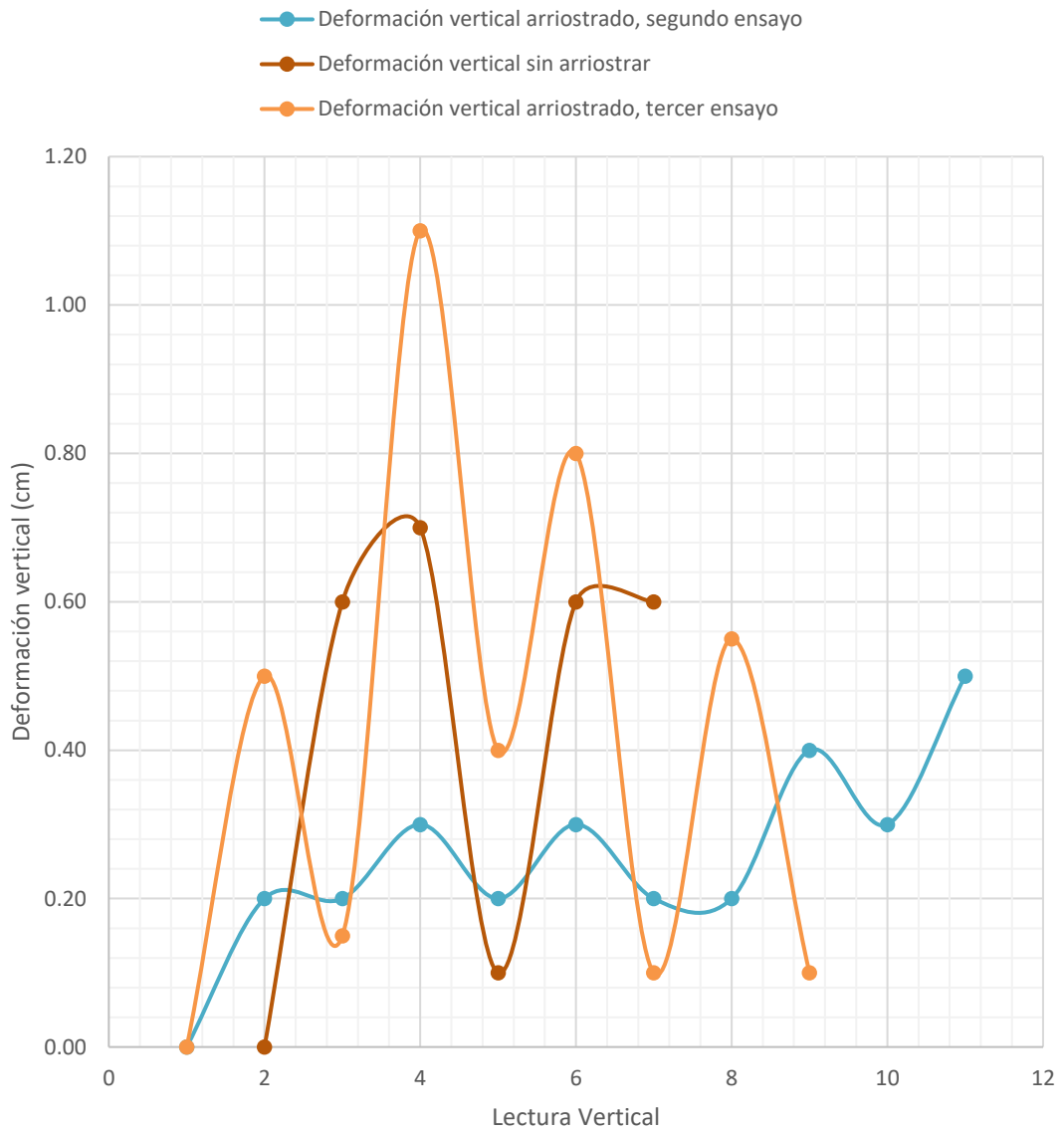
En las figuras siguientes se evidencia la diferencia de la reacción del sistema arriostrado respecto al sistema sin arriostrar.

Figura 47. **Comparación de deformaciones horizontales sistema arriostrado y sin arriostrar**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 48. **Comparación de deformaciones verticales sistema arriostrado y sin arriostrar**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

## **5.2. Metodología y diseño del experimento para el sistema losa tipo vigueta-bovedilla con muro revestido con poliestireno expandido**

La metodología empleada para evaluar este sistema consiste básicamente en la aplicación de carga horizontal por medio de un sistema de poleas en la parte superior del módulo empleado.

### **5.2.1. Equipo utilizado**

Para este ensayo fue se empleó lo siguiente:

- Sistema de polea con polipasto y cadena.
- Dinamómetro.
- Cable de acero (torón).
- Nivel de burbuja.
- Nivel láser.
- Deformímetros.

### **5.2.2. Materiales**

Los materiales para el arriostamiento del sistema consisten en:

- Placas rectangulares de acero de 40 cm de longitud.
- Tornillos tipo *Hilti* de diámetro 1/2" y longitud de 4".
- Tornillos tipo *Hilti* de diámetro 1/2" y longitud de 2".

### 5.2.3. Metodología de ensayo

Para este sistema, la metodología de ensayo es similar al sistema anterior con diferencia en la forma de aplicación de carga. Se aplicó únicamente carga lateral. Se consideró la deriva máxima como el 1 % de la altura del sistema, midiendo desde la base hasta el centroide de la losa donde se anclarán las placas.

Tabla VIII. Deriva máxima del sistema

<b>DIMENSIONES DEL SISTEMA</b>		<b><math>\Delta</math> MÁX (cm)</b>
Altura, H (cm)	260.00	2.6
Largo, L (cm)	382.00	
Ancho, W (cm)	240.00	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Las placas metálicas fueron colocadas de la misma manera que el sistema anterior: en las esquinas de un lado corto de la losa, se colocaron dos placas a rostros internos (placas biela) y en las otras dos esquinas del sentido corto dos placas paralelas al rostro externo (placas rígidas).

Figura 49. **Placas biela ancladas a rostro interno**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.

Figura 50. **Placas rígidas ancladas a rostros externos**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.

El sistema de carga consiste en la aplicación de carga estática por medio de un sistema a tensión ingeniado con polipasto, polea y cable, con el fin de halar los cables que sujetan todo el sistema desde un extremo hasta llevarlo a un desplazamiento igual a la deriva máxima calculada. La tensión generada en el sistema se mide por medio de un dinamómetro conectado a este indicando lecturas a cada 100 lb.

Se obtienen lecturas de deformación en el mismo rostro en la parte superior de ambos muros y al centro del muro sin ventana. Además, con un medidor láser se obtiene la deformación al otro rostro del muro sin ventana.

Se ejecutan ensayos de este tipo con el sistema sin arriostrar y arriostrado.

Figura 51. **Sistema poleas y dinamómetro**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.

Figura 52. **Extremo halado por cables**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 53. **Cables de tensión que rodean el sistema**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.



Figura 54. **Medición de deformaciones en los nudos**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

#### **5.2.4. Datos obtenidos**

En el primer ensayo, se aplicó carga horizontal con el sistema sin arristrar. De este se obtuvo:

Tabla IX. **Deformación en muros, primer ensayo. Sistema sin arriostrar**

Estado de carga	Carga (kg)	Deformación $\Delta$ (cm)		
		Rostro interno de muro s/ventana	Muro c/ventana	Muro s/ventana
Carga	11.36	0.00	0.00	0.00
	22.73	0.05	0.01	0.00
	34.09	0.07	0.02	0.05
	45.45	0.07	0.02	0.05
	68.18	0.07	0.02	0.05
	90.91	0.09	0.03	0.25
Descarga	0.00	0.00	0.15	0.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En el segundo ensayo, se aplicó carga horizontal con el sistema sin arriostrar. De este se obtuvo:

Tabla X. **Deformación en muros, segundo ensayo. Sistema sin arriostrar**

Estado de carga	Carga (kg)	Deformación $\Delta$ (cm)		
		Rostro interno de muro s/ventana	Muro s/ventana	Muro c/ventana
Carga	11.36	0.00	0.00	0.00
	22.73	0.03	0.00	0.00
	45.45	0.03	0.00	0.00
	79.55	0.03	0.20	0.00
	102.27	0.03	0.30	0.10
	136.36	0.03	0.50	0.35
	170.45	0.03	0.70	0.55
	204.55	0.02	0.80	0.65
	227.27	2.25	0.90	0.85
	250.00	2.25	1.10	0.95
	272.73	2.25	1.20	1.05

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En el tercer ensayo, se aplicó carga horizontal con el sistema sin arriostrar y se descargó de forma progresiva. De este se obtuvo:

Tabla XI. **Deformación en muros, tercer ensayo. Sistema sin arriostrar**

Estado de carga	Carga (kg)	Deformación $\Delta$				
		Rostro interno de muro s/ventana (cm)	Muro c/ventana (cm)	Muro s/ventana (cm)	L/2 Muro s/ventana (mm)	
Carga	27.27	0.00	0.00	0.00		
	45.45	0.00	0.00	0.00		
	68.18	0.10	0.00	0.05		
	90.91	0.10	0.00	0.05		
	113.64	0.20	0.10	0.15		
	136.36	0.30	0.20	0.40	1.00	
	159.09	0.40	0.40	0.50	2.00	
	181.82	0.50	0.50	0.60	3.50	
	204.55	0.50	0.60	0.70	4.00	
	227.27	0.55	0.70	0.75	4.50	
	250.00	0.55	0.80	0.85	4.50	
	272.73	0.55	0.90	0.95	5.00	
	295.45	0.60	0.95	1.00	6.00	
	318.18	0.70	1.00	1.10	6.50	
	340.91	0.70	1.15	1.20	7.00	
	363.64	0.70	1.30	1.35	8.00	
	386.36	0.80	1.45	1.50	8.50	
	Carga 2 min	340.91	0.80	1.45	1.50	8.50
	Carga	363.64	0.90	1.50	1.50	8.50
	Descarga	386.36	0.95	1.60	1.55	9.50
340.91		0.90	1.55	1.50	9.00	
295.45		0.80	1.45	1.40	8.00	
250.00		0.65	1.35	1.30	7.00	
204.55		0.60	1.20	1.15	6.00	
159.09		0.60	1.00	1.00	4.50	
113.64		0.60	0.80	0.80	2.00	
68.18		0.45	0.30	0.45	0.50	
Descarga 2 min	34.09	0.15	0.00	0.10	0.00	
Descarga	0.00	0.15	0.00	0.05	0.00	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En el cuarto ensayo, se aplicó carga horizontal con el sistema sin arriostrar y se descargó de forma progresiva. De este se obtuvo:

Tabla XII. **Deformación en muros, cuarto ensayo. Sistema sin arriostrar**

Estado de carga	CARGA (kg)	DEFORMACIÓN $\Delta$				
		Rostro interno de muro s/ventana (cm)	Muro c/ventana (cm)	Muro s/ventana (cm)	L/2 Muro s/ventana (mm)	
Carga	45.45	0.000	0.00	0.00	0.00	
	90.91	0.150	0.20	0.10	1.00	
	136.36	0.150	0.45	0.40	2.50	
	181.82	0.170	0.65	0.70	3.50	
	227.27	0.272	0.85	0.90	5.50	
	272.73	0.339	1.05	1.10	6.50	
	318.18	0.339	1.25	1.30	7.50	
	318.18	0.550	1.25	1.30	7.50	
	363.64	0.600	1.55	1.60	9.50	
	409.09	0.800	1.85	1.80	12.00	
	454.55	1.000	2.10	2.10	13.00	
	500.00	1.300	2.75	2.70	16.50	
	545.45	1.700	3.60	3.50	22.00	
	545.45	1.700	3.60	3.55	21.50	
	Descarga	454.55	1.60	3.45	3.45	21.00
		409.09	1.50	3.35	3.35	21.00
363.64		1.30	3.25	3.25	20.50	
318.18		1.20	3.10	3.00	19.00	
272.73		1.10	2.90	2.80	18.00	
227.27		1.00	2.65	2.60	16.50	
181.82		0.75	2.35	2.40	14.50	
136.36		0.50	1.90	2.00	11.50	
90.91		0.40	1.40	1.50	8.00	
79.55		0.25	1.00	1.00	5.50	
45.45	0.25	0.65	0.55	3.50		
Descarga 2 min	45.45	0.25	0.65	0.55	3.50	
Descarga 30 min	45.45	0.20	0.60	0.55	3.00	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En el quinto ensayo, se aplicó carga horizontal con el sistema arriostrado y se descargó de forma progresiva. De este se obtuvo:

Tabla XIII. **Deformación en muros, quinto ensayo. Sistema arriostrado**

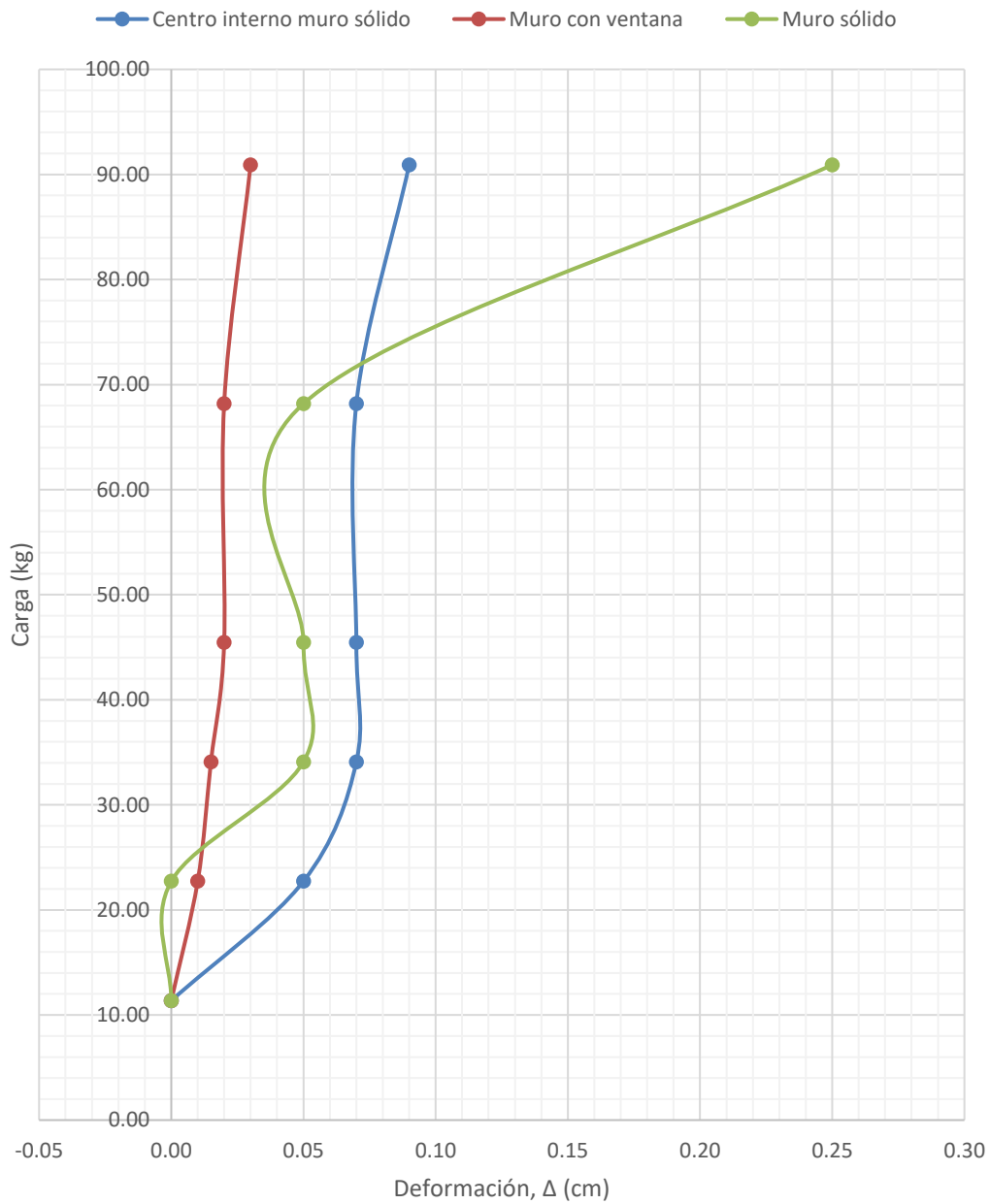
Estado de carga	Carga (kg)	Deformación $\Delta$			
		Rostro interno de muro s/ventana (cm)	Muro c/ventana (cm)	Muro s/ventana (cm)	L/2 Muro s/ventana (mm)
Carga	27.27	0.00	0.00	0.00	0.00
	45.45	0.00	0.00	0.00	0.00
	90.91	0.05	0.10	0.00	0.50
	136.36	0.10	0.35	0.20	2.00
	181.82	0.25	0.70	0.60	4.50
	227.27	0.50	1.05	1.00	6.50
	272.73	0.20	1.50	1.50	7.50
	318.18	1.30	1.80	1.70	11.00
	363.64	1.40	2.10	1.95	13.00
	409.09	2.00	2.45	2.30	15.00
	454.55	2.00	2.80	2.60	17.50
	500.00	2.40	3.00	2.90	19.00
	545.45	2.70	3.45	3.40	22.00
	Carga 2 min	545.45	2.70	3.45	3.35
Descarga	454.55	2.70	3.35	3.25	20.50
	409.09	2.80	3.25	3.15	20.00
	363.64	2.80	3.10	3.00	19.50
	318.18	2.40	2.95	2.85	18.50
	272.73	2.20	2.75	2.65	17.50
	227.27	2.00	2.45	2.40	15.50
	181.82	2.20	2.00	1.95	12.90
	136.36	1.80	1.45	1.40	9.00
	90.91	1.60	0.90	0.80	5.50
	45.45	0.90	0.45	0.35	2.50
Descarga 2 min	45.45	0.20	0.45	0.35	2.50
Descarga 15 min	45.45	0.20	0.35	0.35	2.50

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

### 5.2.5. Gráficas carga vs deformación en sistema sin arriostrar

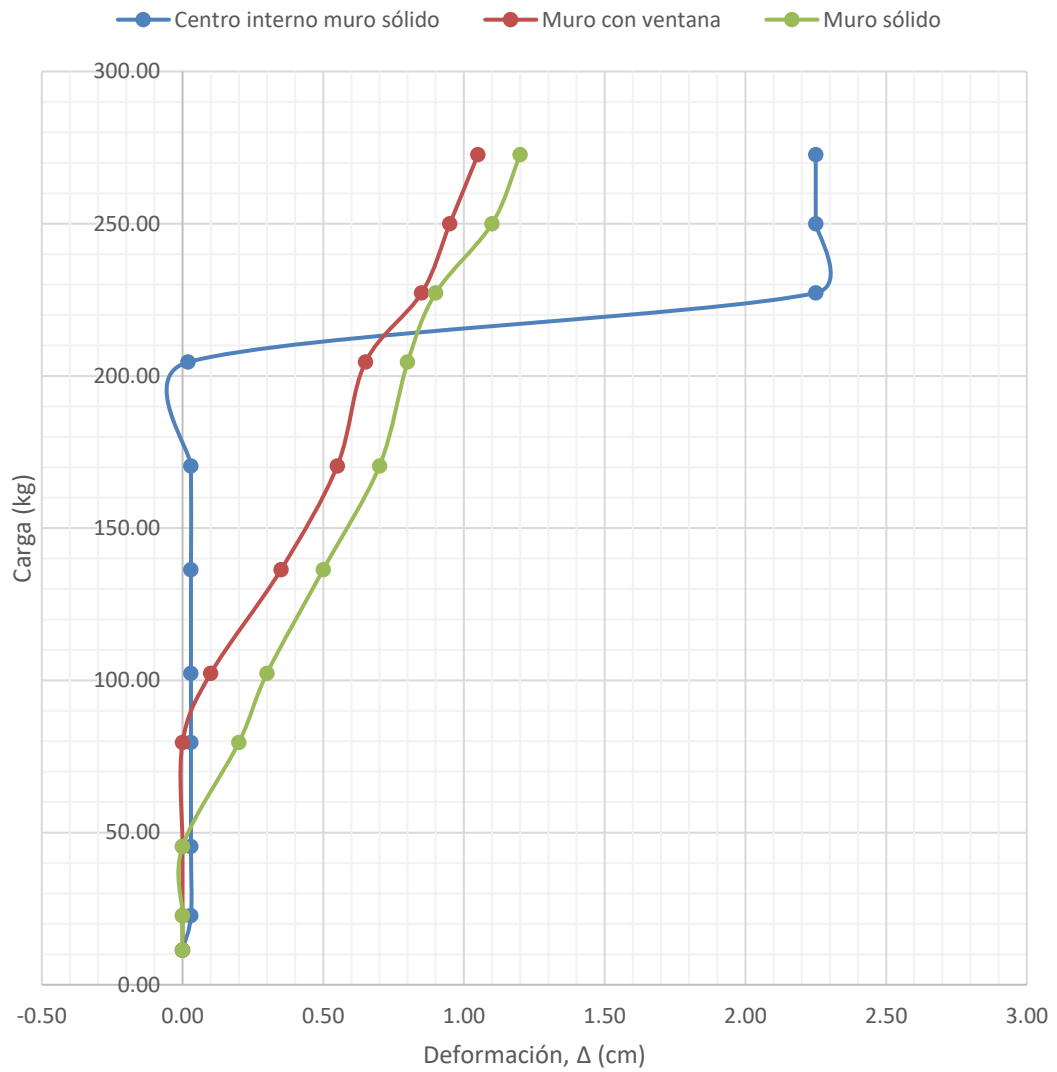
En el sistema sin arriostrar, para el muro sin ventana, sólido y al centro del rostro interno del muro sólido, según los datos obtenidos en la tabla IX, tabla X, tabla XI y tabla XII la deformación resultante se establece en las gráficas siguientes.

Figura 55. **Carga vs deformación en el muro sólido, al centro del rostro interno del muro sólido y en el muro con ventana, primera prueba**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

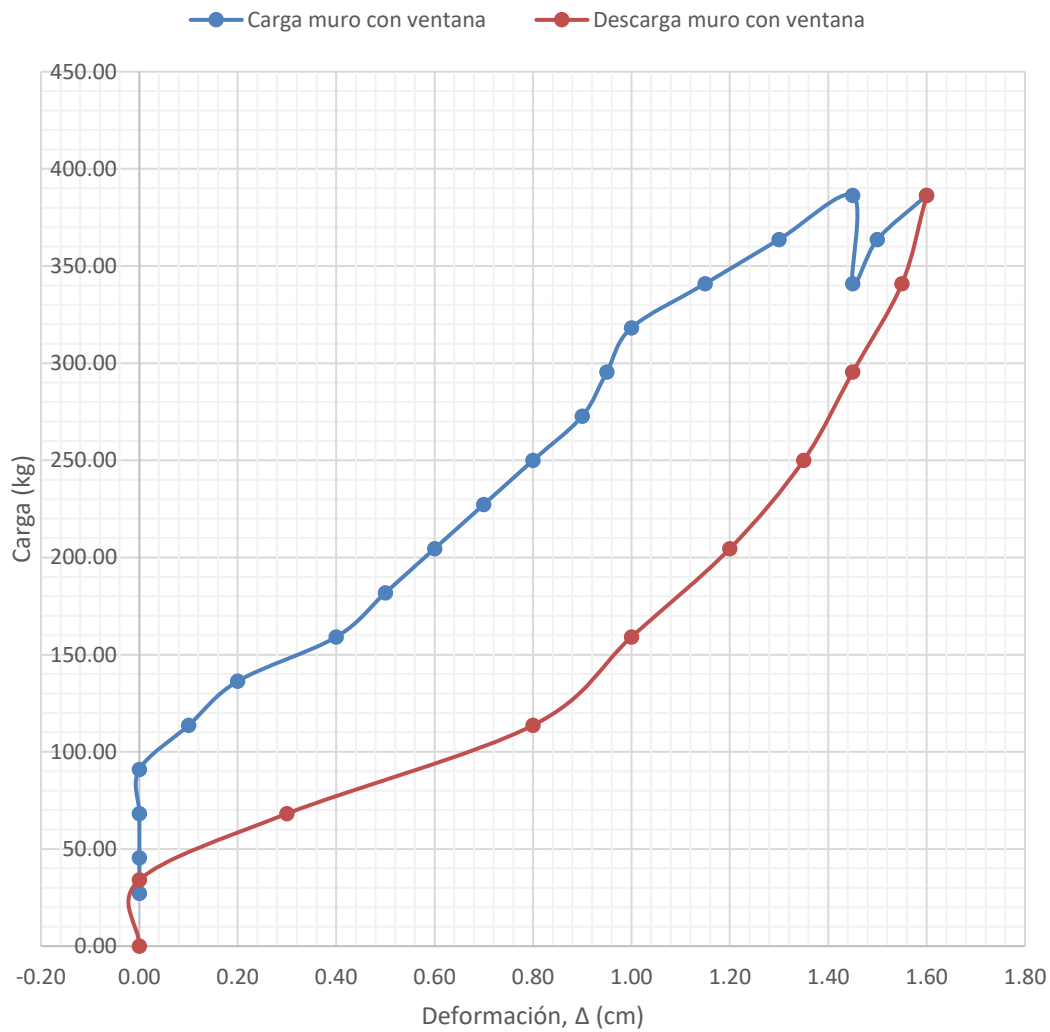
Figura 56. **Carga vs deformación en el muro sólido, al centro del rostro interno del muro sólido y en el muro con ventana, segunda prueba**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Para el tercer ensayo, se elaboró un proceso de carga y luego descarga, de forma gradual, resultando lo siguiente.

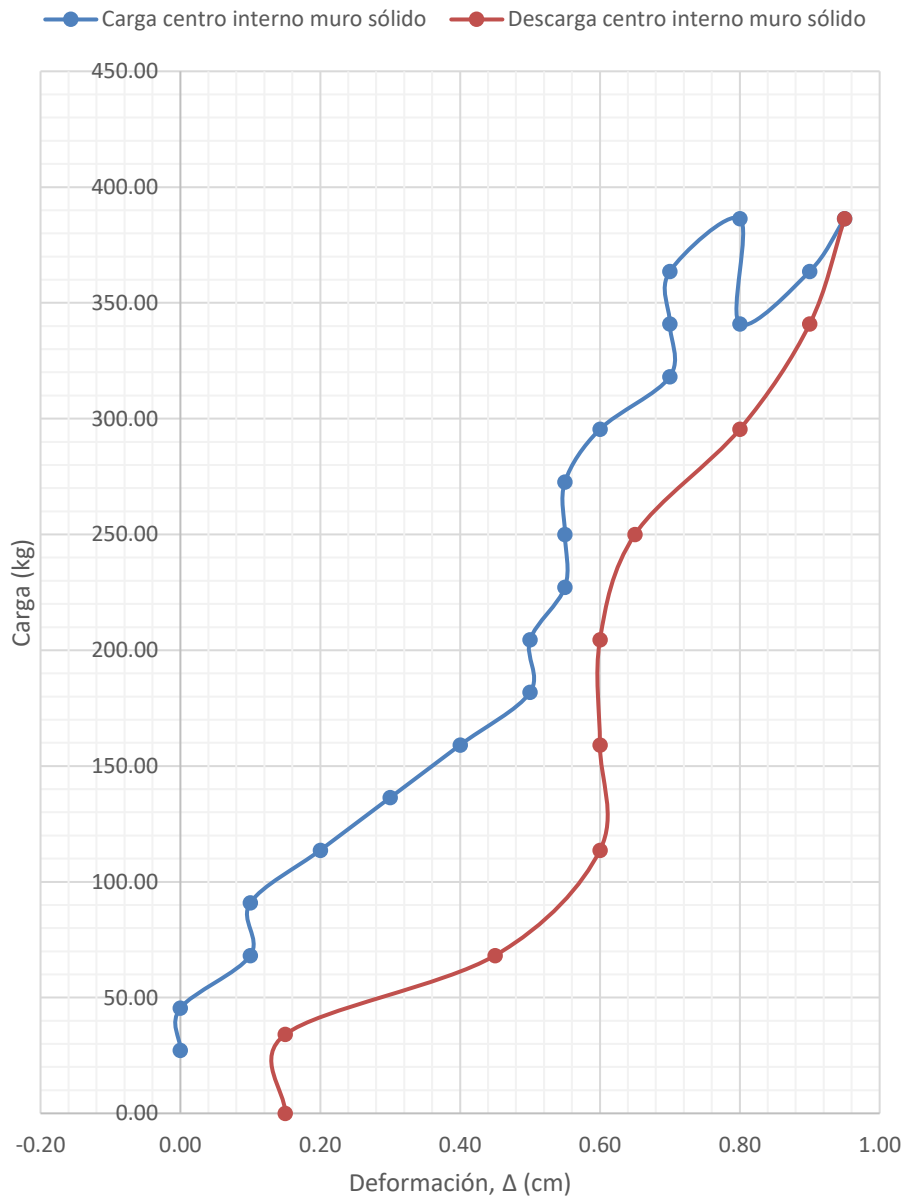
Figura 57. **Carga vs deformación del muro con ventana**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

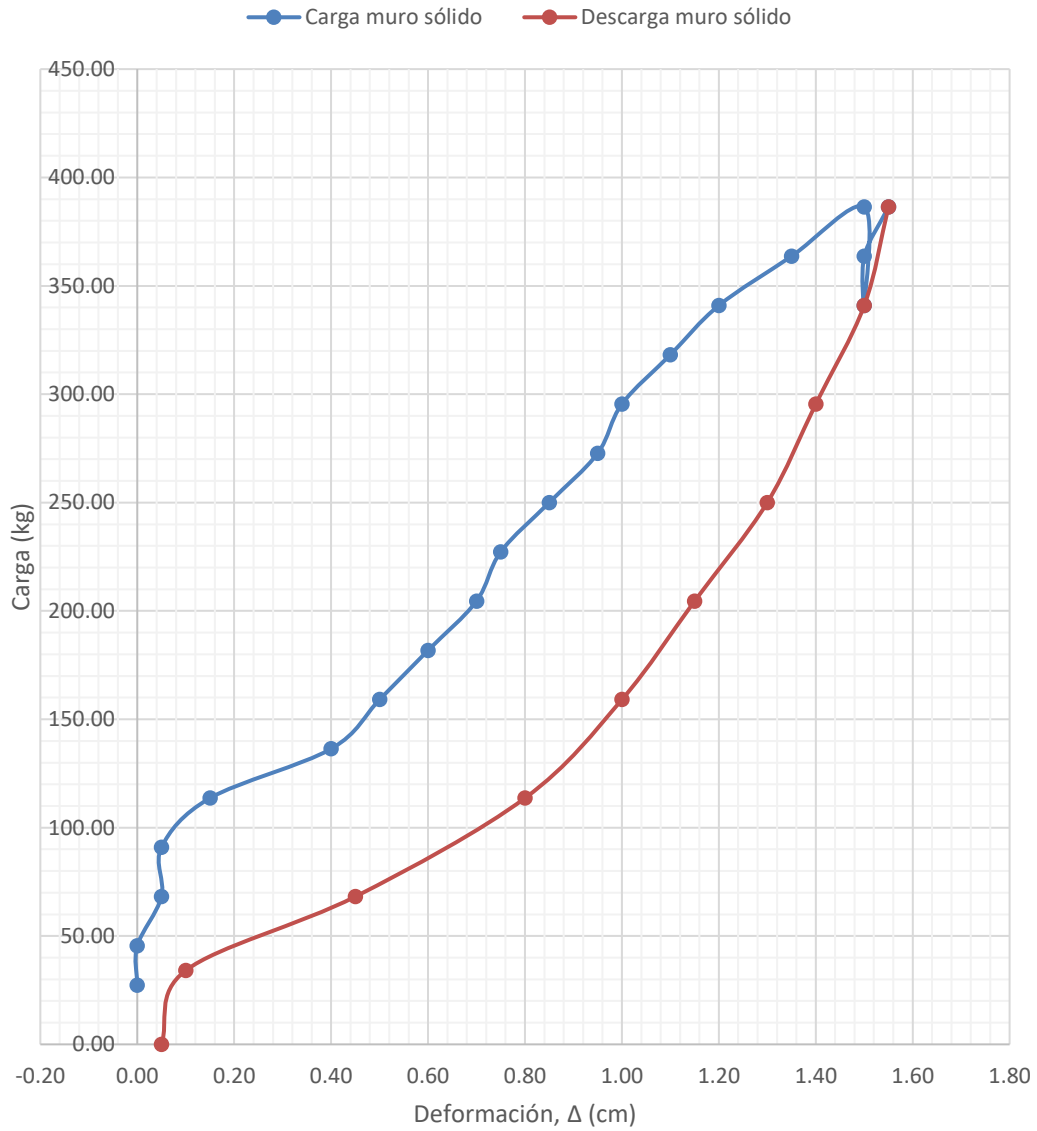


Figura 58. **Carga vs deformación al centro del rostro interno del muro sólido**



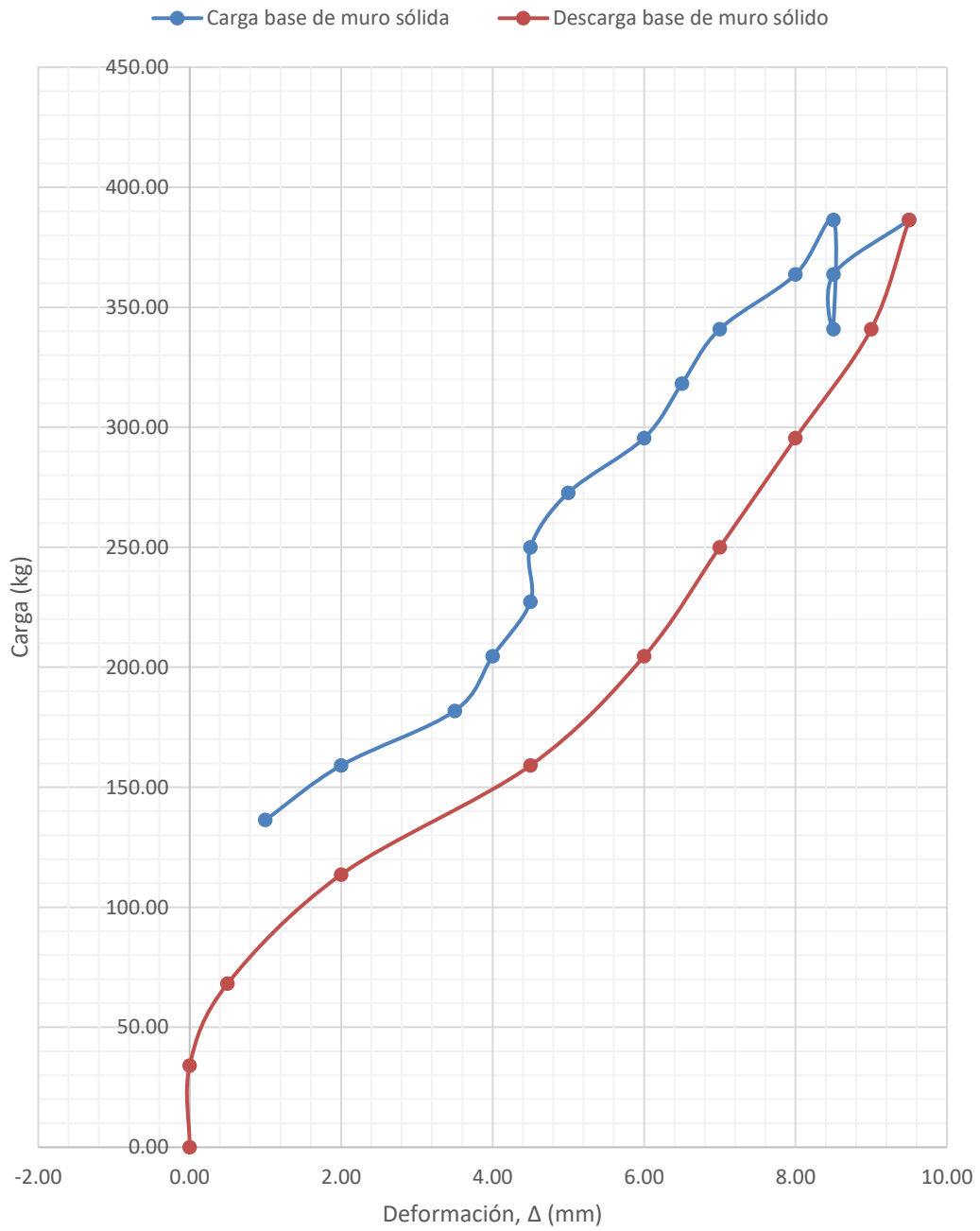
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 59. Carga vs deformación del muro sólido



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

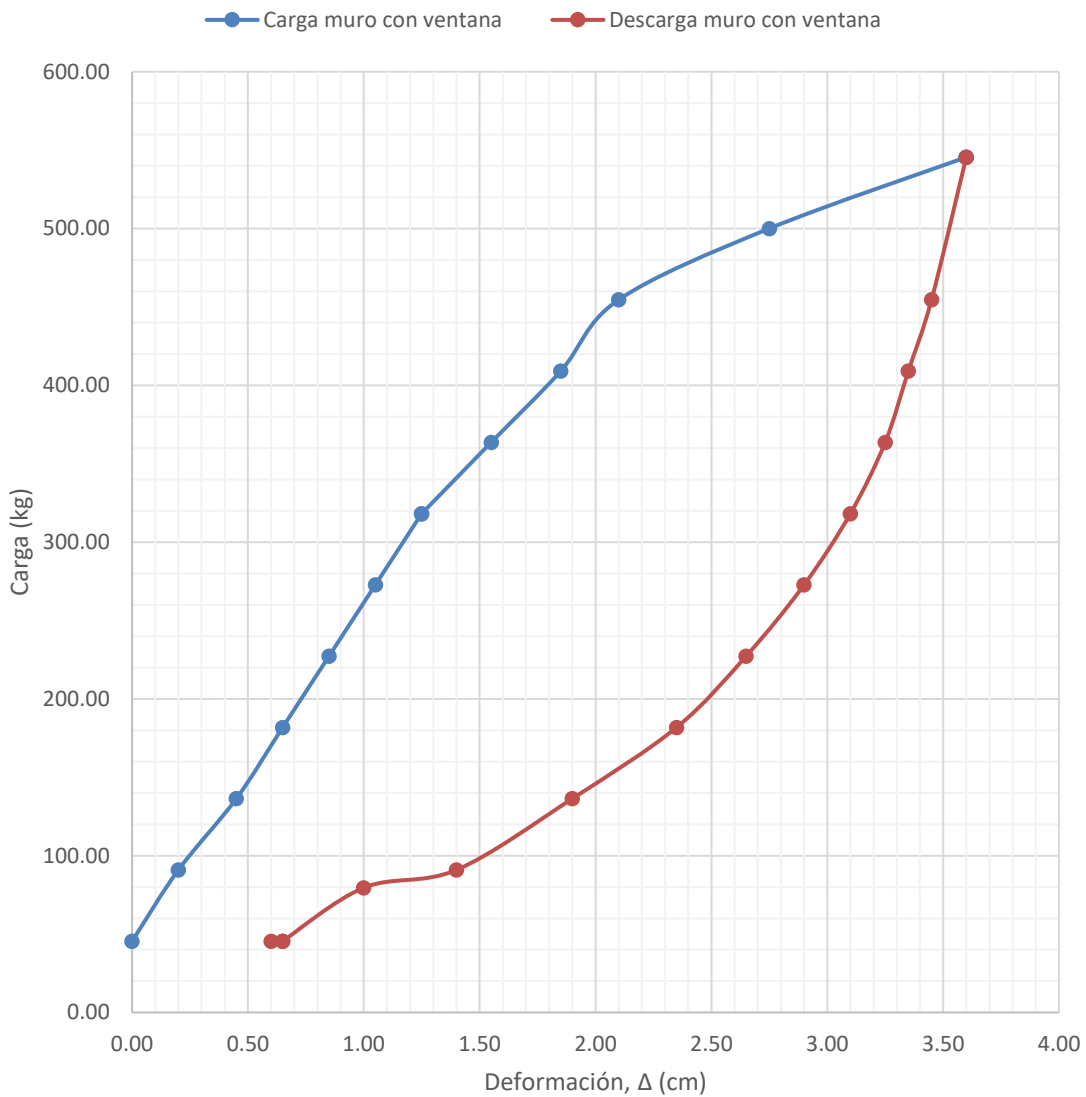
Figura 60. **Carga vs deformación a la base del muro sólido**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

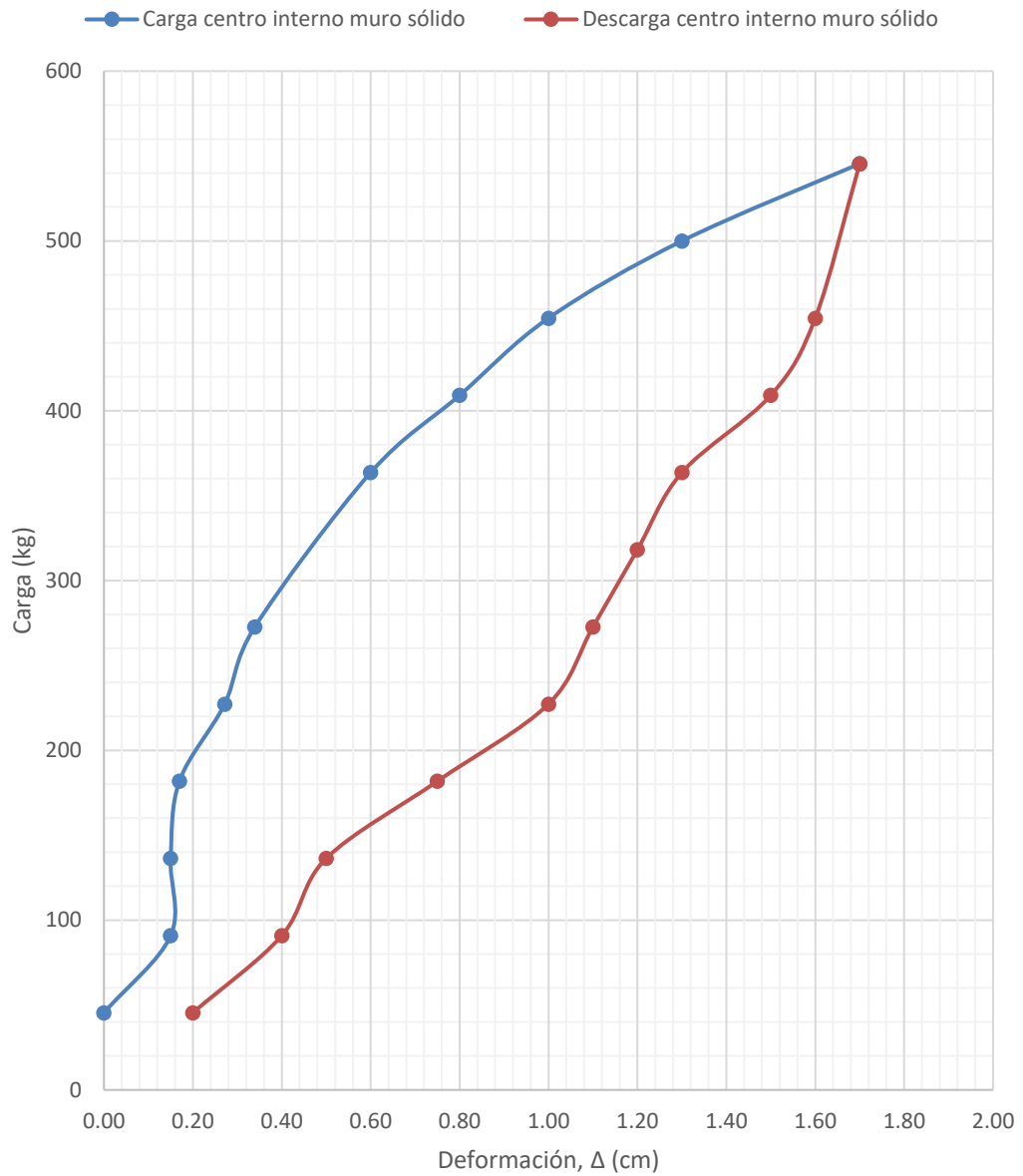
Para el cuarto ensayo, se elaboró un proceso de carga y luego descarga, de forma gradual, resultando lo siguiente.

Figura 61. **Carga vs deformación del muro con ventana**



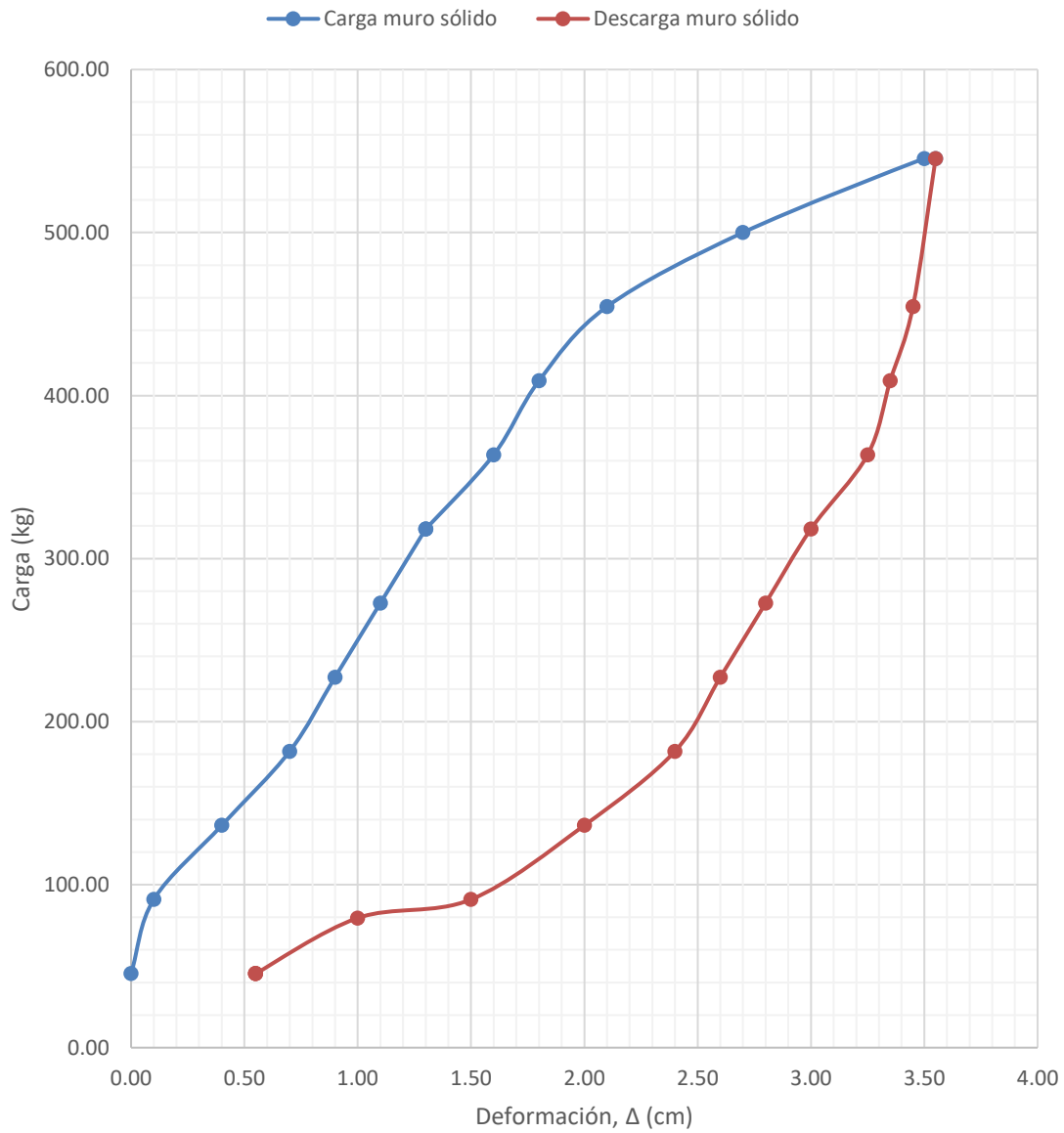
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 62. **Carga vs deformación al centro del rostro interno del muro sólido**



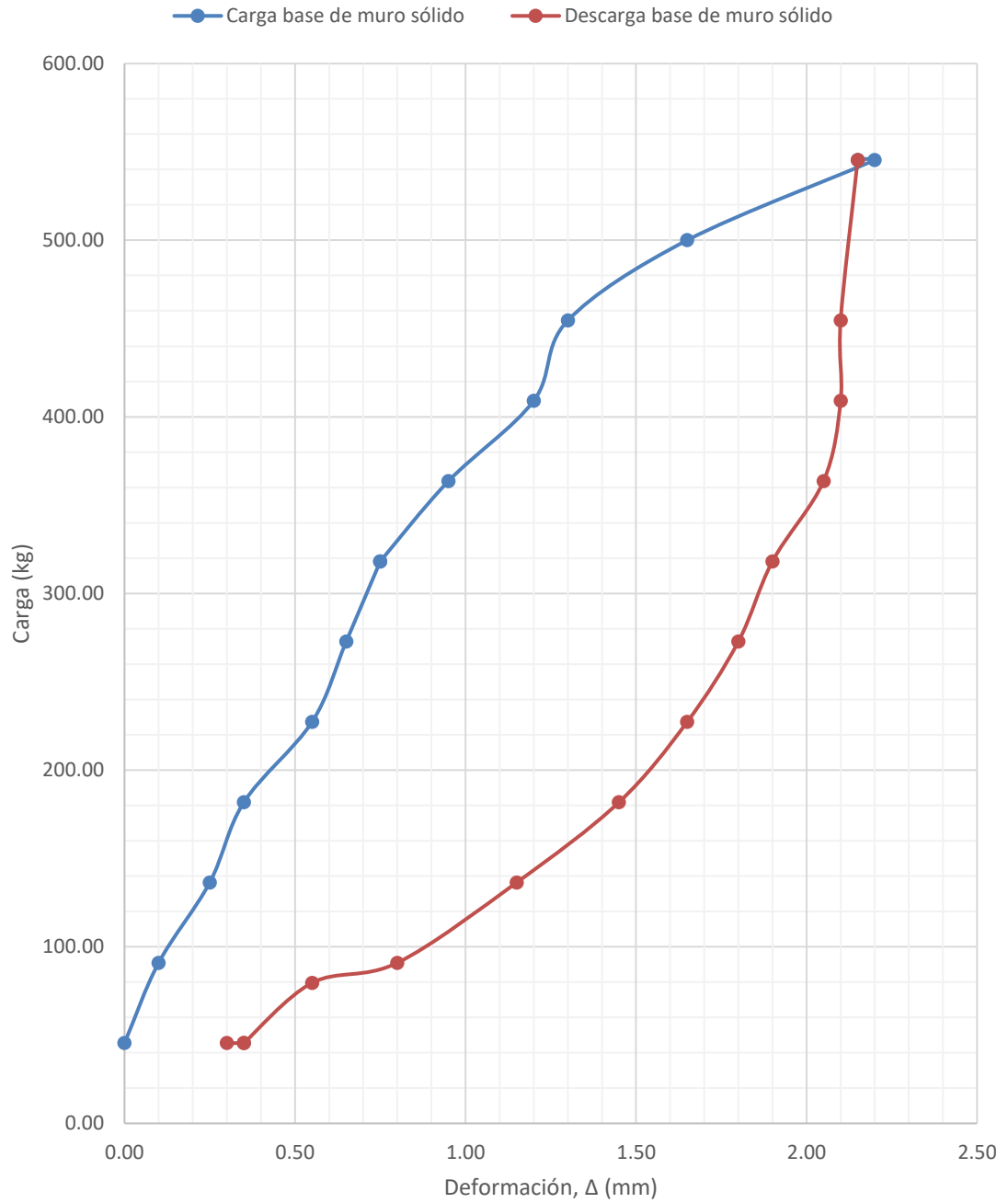
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 63. **Carga vs deformación del muro sólido**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 64. **Carga vs deformación en la base del muro sólido**

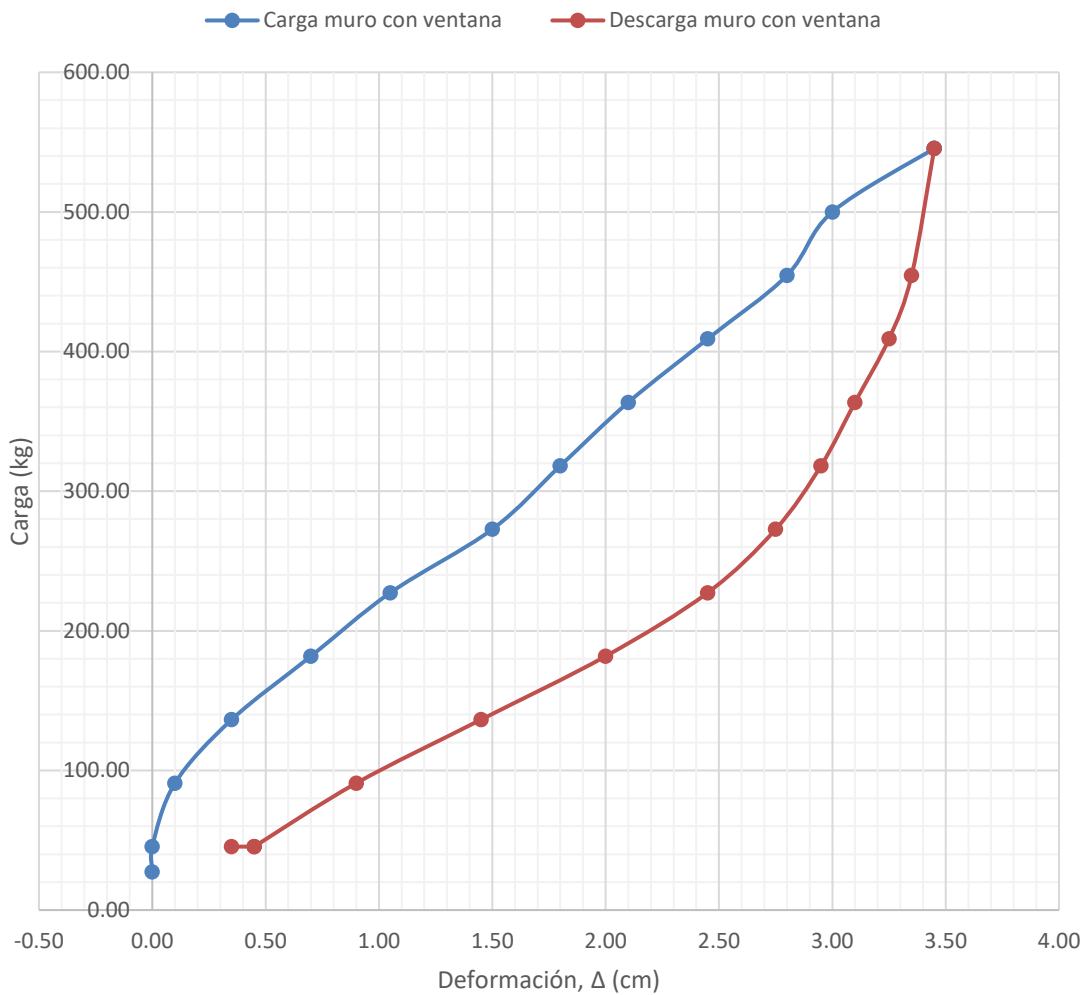


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

### 5.2.6. Gráficas carga vs deformación en sistema arriostrado

En el sistema arriostrado, para el muro sin ventana, sólido y al centro del rostro interno del muro sólido, según los datos obtenidos en la tabla XIII la deformación resultante se establece en las gráficas siguientes.

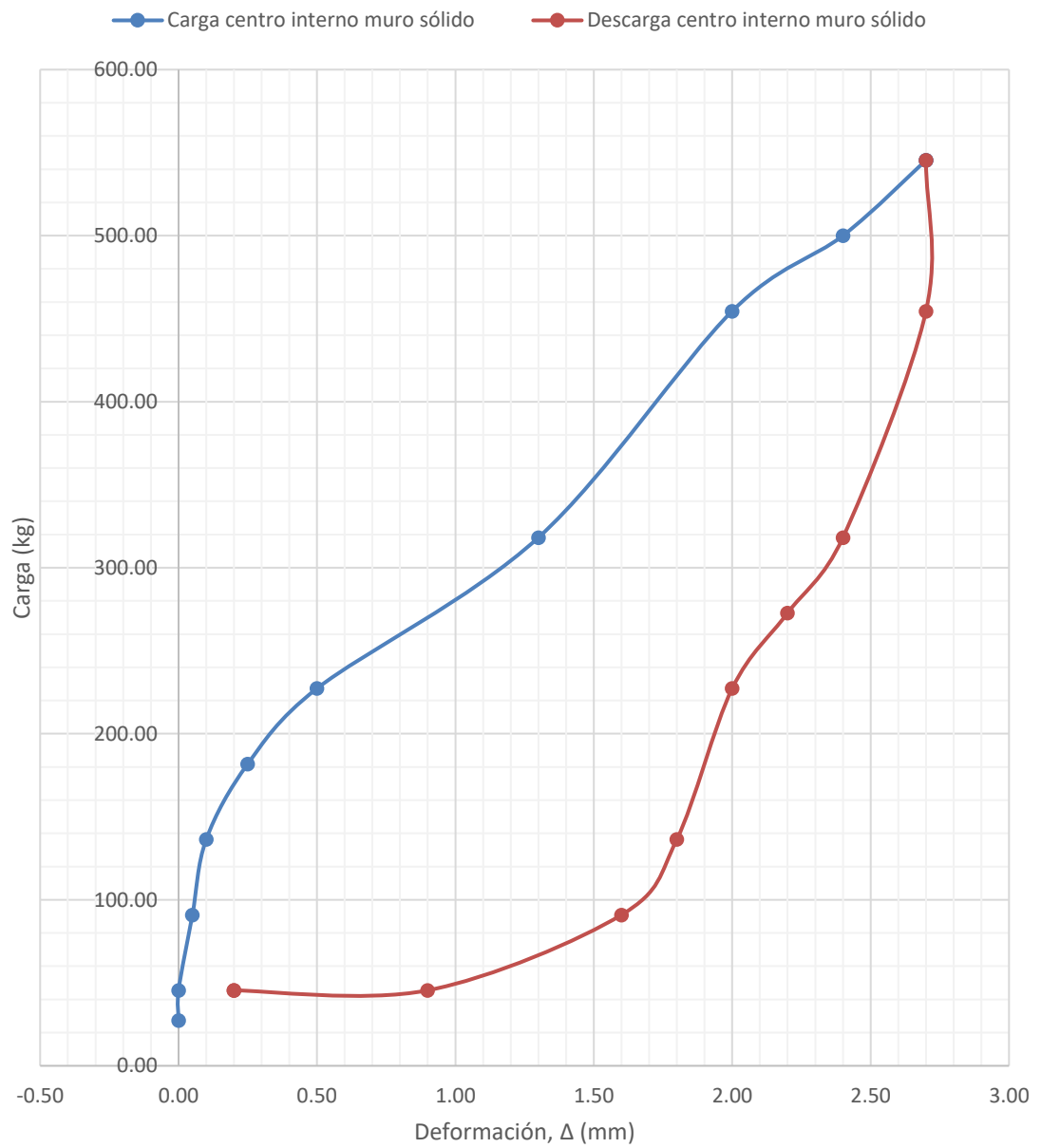
Figura 65. Carga vs deformación de muro con ventana



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

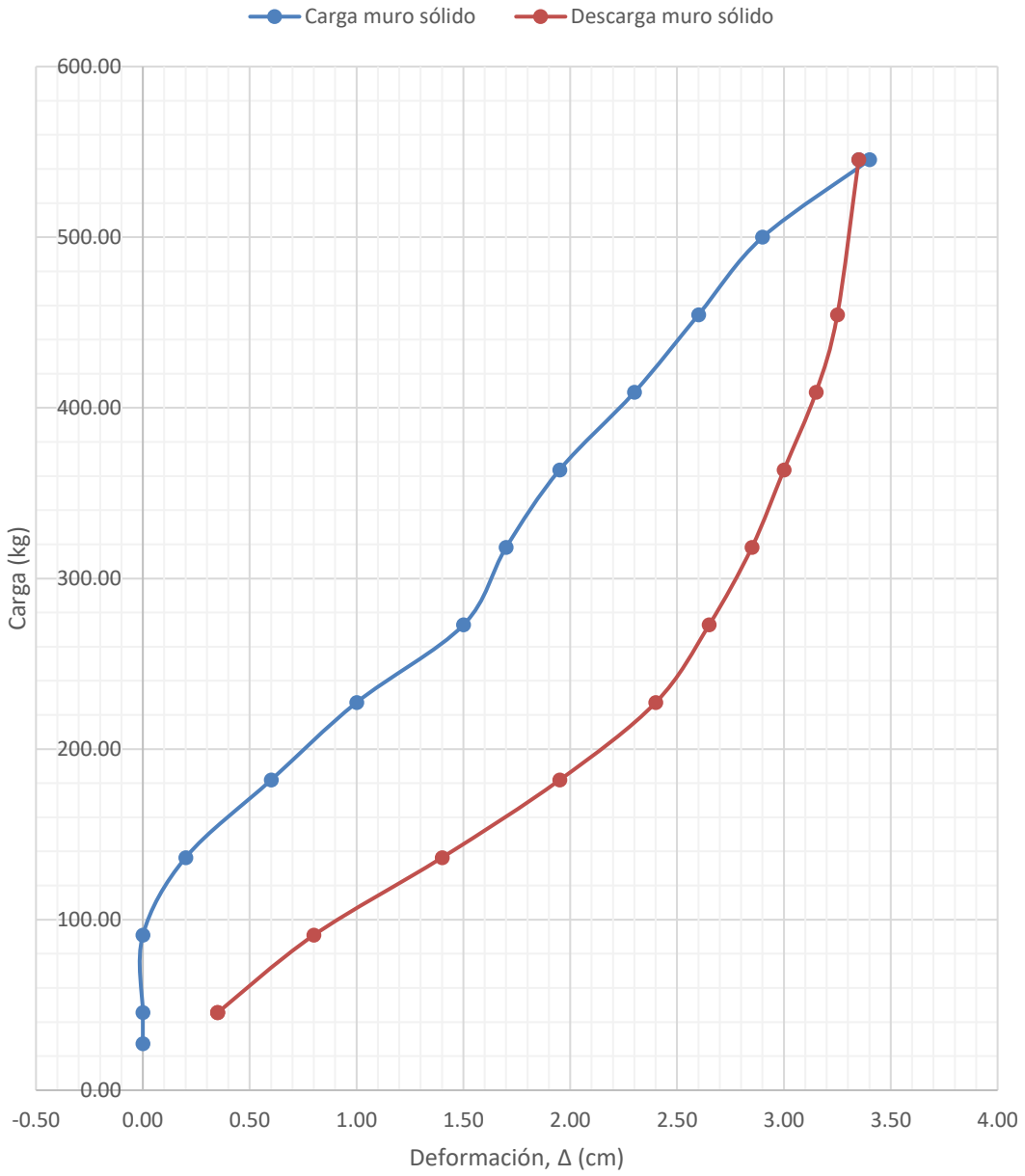


Figura 66. **Carga vs deformación al centro del rostro interno del muro sólido**



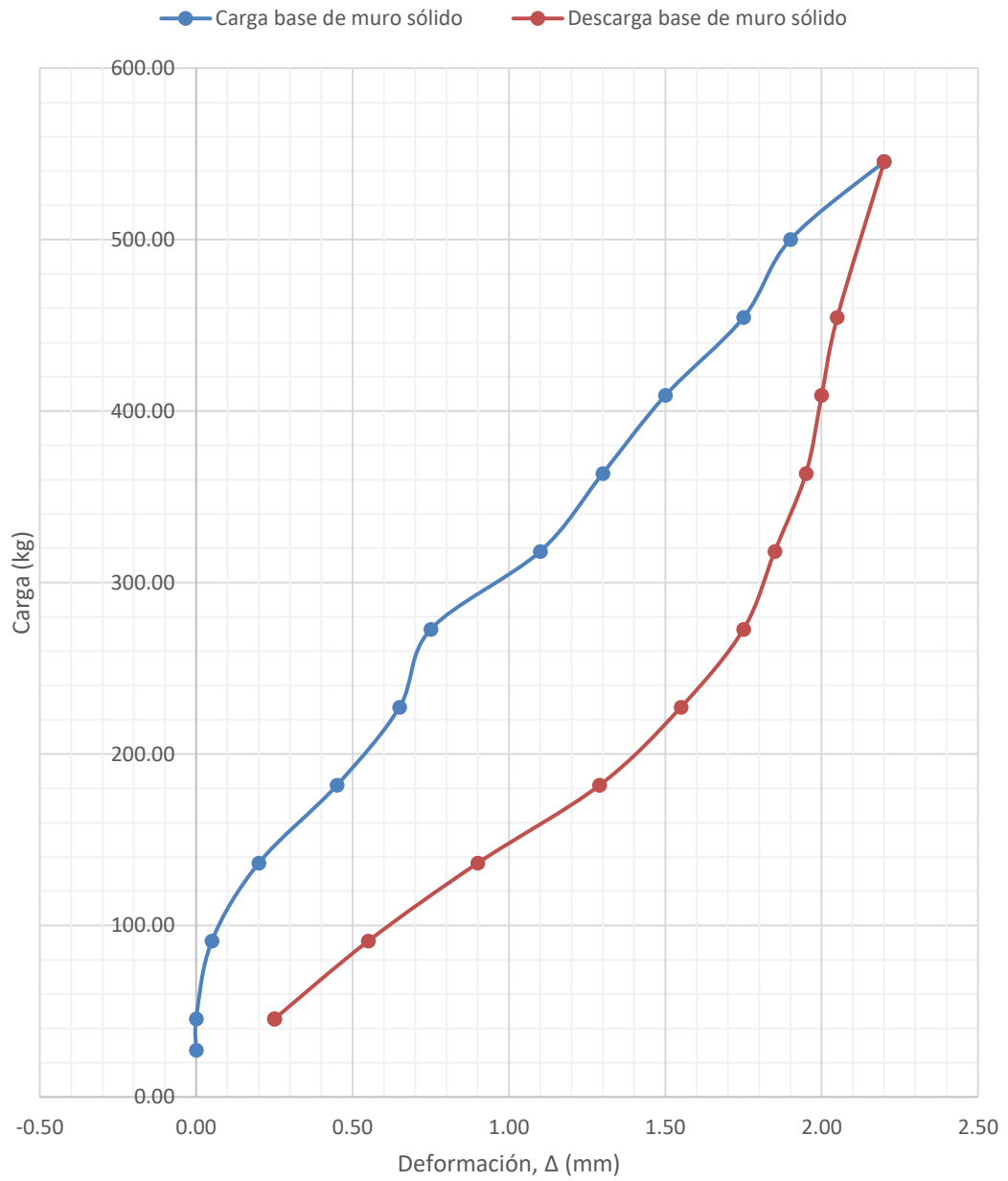
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 67. Carga vs deformación de muro sólido



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 68. **Carga vs deformación a la base del muro sólido**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

### **5.2.7. Cálculos del análisis estructural para el sistema sin arriostrar**

Para el sistema sin arriostrar, se han calculado los momentos finales debido a las cargas en este como se indica a continuación.

#### **5.2.7.1. Cargas del sistema sin arriostrar**

Las cargas del sistema consisten en carga muerta y carga horizontal, consideradas para una franja unitaria de 1 m. La carga horizontal es la carga aplicada al sistema con el fin de simular carga horizontal de sismo.

Tabla XIV. **Integración de cargas del sistema sin arriostrar**

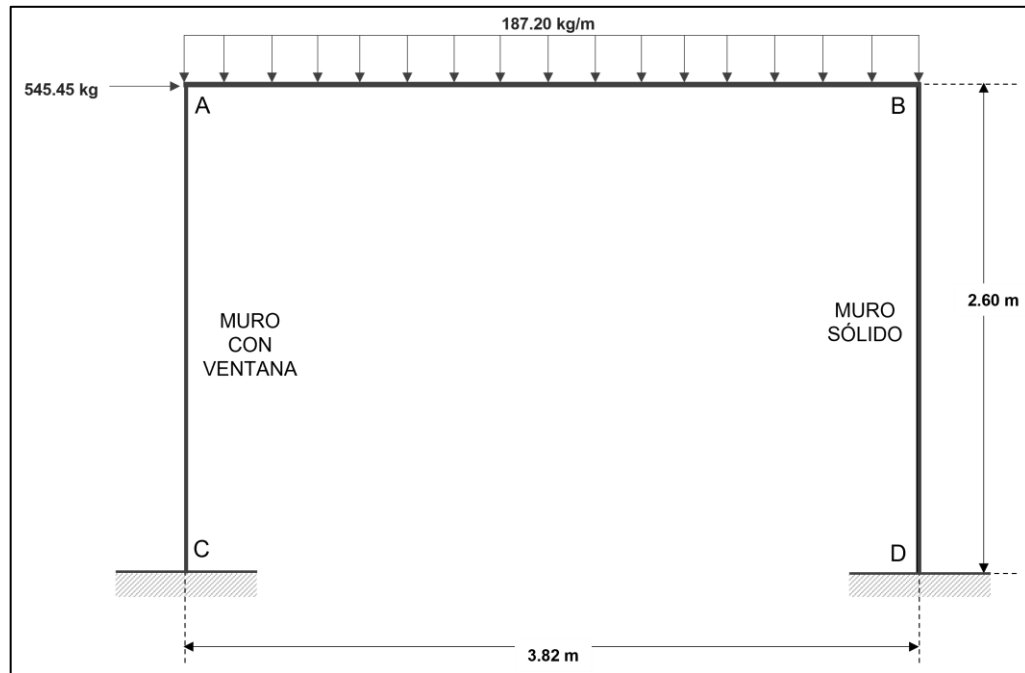
<b>Carga</b>	<b>Valor</b>
Carga viva, LL (kg/m <sup>2</sup> )	0.00
Carga muerta, DL (kg/m <sup>2</sup> )	156.00
<b>Carga última, U (kg/m)</b>	<b>187.20</b>

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

#### **5.2.7.2. Análisis estructural del sistema sin arriostrar por medio del método de Kani**

Para el análisis estructural del sistema, se aplicó el método de Kani como se indica a continuación.

Figura 69. Diagrama de cargas del sistema sin arriostrar



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Conociendo los datos generales del sistema se obtienen las cargas actuantes dadas en la tabla XV.

Tabla XV. Datos generales del sistema sin arriostrar

$A_T$	9.17 m <sup>2</sup>
$A_e$	4.58 m <sup>2</sup>
<b>Lado a (menor)</b>	2.40 m
<b>Lado b (mayor)</b>	3.82 m
<b>Sentido losa</b>	0.63 ≤ 0.5; 2 sentidos
$h_{muro}$	2.60 m
$t_{muro}$	0.16 m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XVI. **Cargas totales en el sistema sin arriostrar**

<b>Vertical</b>	<b>Carga viva, LL</b>	0.00 kg/m <sup>2</sup>
	<b>Carga muerta, DL</b>	1430.21 kg
		156 kg/m <sup>2</sup>
	<b>Carga última, U</b>	187.20 kg/m <sup>2</sup>
		187.20 kg/m
<b>Horizontal</b>	<b>Fuerza de fijación, F<sub>f</sub></b>	545.45 kg

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Aplicando el método de análisis de Kani para encontrar momentos últimos, se obtiene lo siguiente.

Tabla XVII. **Relación de inercia de elementos**

<b>Vigueta</b>	1	I
<b>Muro A-C</b>	1	I
<b>Muro B-D</b>	2	I

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XVIII. **Rigidez en elementos**

<b>Rigidez en Muros</b>		
K-AC	0.38	kg-m
K-BD	0.77	kg-m
<b>Rigidez en Vigas</b>		
K-AB	0.26	kg-m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XIX. Factores de Kani

	Factores de corrimiento	Factores de Giro			
		Nodo A		Nodo B	
v-AC	-0.50 kg-m	$\mu - AB$	-0.202 kg-m	$\mu - BA$	-0.127 kg-m
v-BD	-1.00 kg-m	$\mu - AC$	-0.298 kg-m	$\mu - BD$	-0.373 kg-m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XX. Momentos de Kani

Momento de Piso	
$M_p$	472.72 kg-m
Momentos de Empotramiento	
M-AB	227.64 kg-m
M-BA	-227.64 kg-m
M-AC	0.00 kg-m
M-CA	0.00 kg-m
M-BD	0.00 kg-m
M-DB	0.00 kg-m

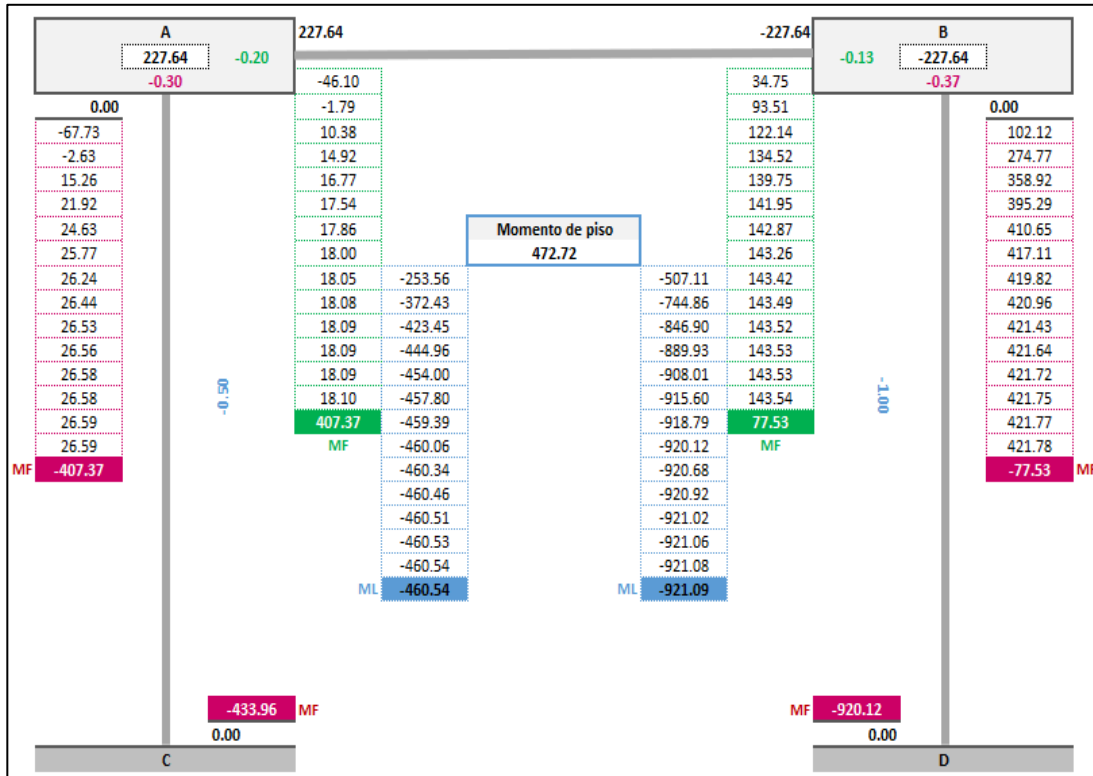
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XXI. Momentos finales del sistema sin arriostrar

Momentos Finales	
M-AB	407.37 kg-m
M-AC	-407.37 kg-m
M-CA	-433.96 kg-m
M-BA	77.53 kg-m
M-BD	-77.53 kg-m
M-DB	-920.12 kg-m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

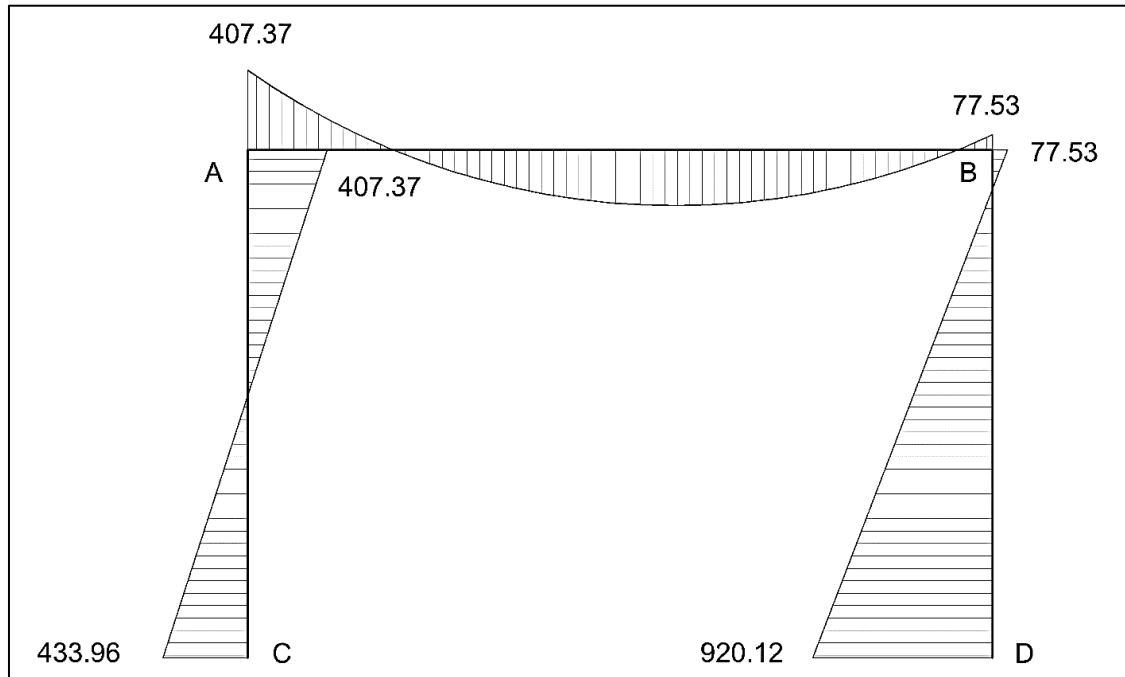
Figura 70. Diagrama de iteraciones de Kani



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.



Figura 71. **Diagrama de momentos finales del sistema sin arriostrar, en kg-m**



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

### 5.2.8. Cálculos del análisis estructural para el sistema arriostrado

Para el sistema arriostrado, se han calculado los momentos finales debido a las cargas en este como se indica a continuación.

#### 5.2.8.1. Cargas del sistema arriostrado

Las cargas del sistema consisten en carga muerta y carga horizontal, consideradas para una franja unitaria de 1 m. La carga horizontal es la carga aplicada al sistema con el fin de simular carga horizontal de sismo.

Tabla XXII. Integración de cargas del sistema arriostrado

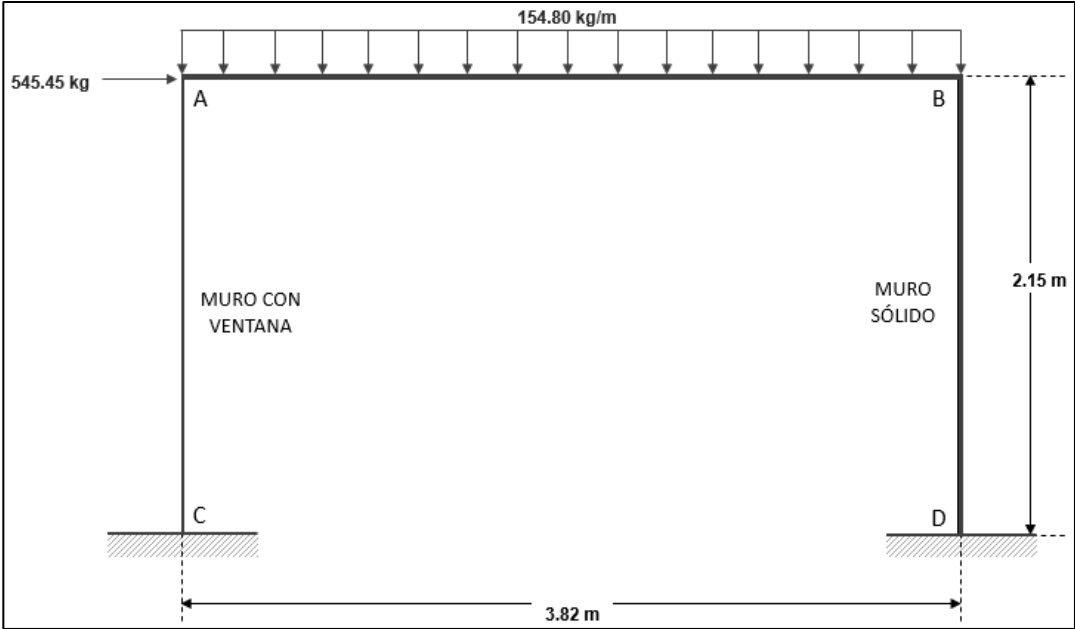
CARGA	VALOR
Carga viva, LL (kg/m <sup>2</sup> )	0.00
Carga muerta, DL (kg/m <sup>2</sup> )	129.00
<b>Carga última, U (kg/m)</b>	<b>154.80</b>

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

**5.2.8.2. Análisis estructural del sistema arriostrado por medio del método de Kani**

Para el análisis estructural del sistema, se aplicó el método de Kani.

Figura 72. Diagrama de cargas del sistema arriostrado



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

Conociendo los datos generales del sistema se obtienen las cargas actuantes dadas en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. **Datos generales del sistema arriostrado**

<b>A<sub>T</sub></b>	9.17 m <sup>2</sup>
<b>A<sub>e</sub></b>	4.58 m <sup>2</sup>
<b>Lado a (menor)</b>	2.40 m
<b>Lado b (mayor)</b>	3.82 m
<b>Sentido losa</b>	0.63 ≤ 0.5; 2 sentidos
<b>h<sub>muro</sub></b>	2.15 m
<b>t<sub>muro</sub></b>	0.16 m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XXIV. **Cargas totales en el sistema arriostrado**

<b>Vertical</b>	<b>Carga viva, LL</b>	0.00 kg/m <sup>2</sup>
	<b>Carga muerta, DL</b>	1182.67 kg
		129.00 kg/m <sup>2</sup>
	<b>Carga última, U</b>	154.80 kg/m <sup>2</sup>
		154.80 kg/m
<b>Horizontal</b>	<b>Fuerza de fijación, F<sub>f</sub></b>	545.45 kg

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Aplicando el método de análisis de Kani para encontrar momentos últimos, se obtiene lo siguiente.

Tabla XXV. **Relación de inercia de elementos**

<b>Vigueta</b>	0.75	I
<b>Muro A-C</b>	1.25	I
<b>Muro B-D</b>	1.50	I

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XXVI. **Rigidez en elementos**

<b>Rigideces en Columnas</b>		
K-AC	0.58	kg-m
K-BD	0.70	kg-m
<b>Rigidez en Vigas</b>		
K-AB	0.20	kg-m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XXVII. **Factores de Kani**

	<b>Factores de corrimiento</b>	<b>Factores de Giro</b>			
		<b>Nodo A</b>		<b>Nodo B</b>	
v-AC	-0.18 kg-m	$\mu$ - AB	-0.126 kg-m	$\mu$ - BA	-0.311 kg-m
v-BD	-0.22 kg-m	$\mu$ - AC	-0.374 kg-m	$\mu$ - BD	-0.189 kg-m

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XXVIII. **Momentos de Kani**

<b>Momento de Piso</b>	
M <sub>p</sub>	390.906 kg-m
<b>Momentos de Empotramiento</b>	
M-AB	188.24 kg-m
M-BA	-188.24 kg-m
M-AC	0.00 kg-m
M-CA	0.00 kg-m
M-BD	0.00 kg-m
M-DB	0.00 kg-m

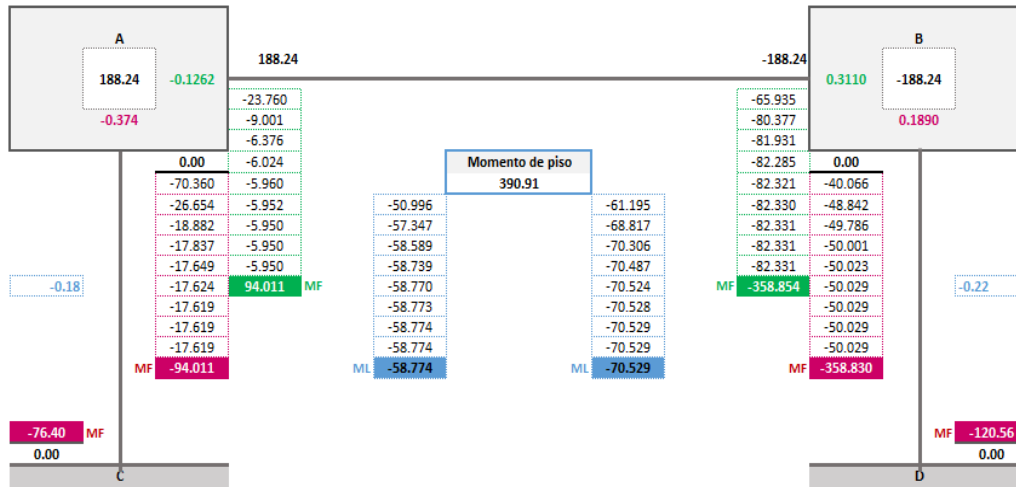
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla XXIX. **Momentos finales del sistema arriostrado**

<b>Momentos Finales</b>	
M-AB	94.01 kg-m
M-AC	-94.01 kg-m
M-CA	-76.40 kg-m
M-BA	-358.85 kg-m
M-BD	-358.83 kg-m
M-DB	-120.56 kg-m

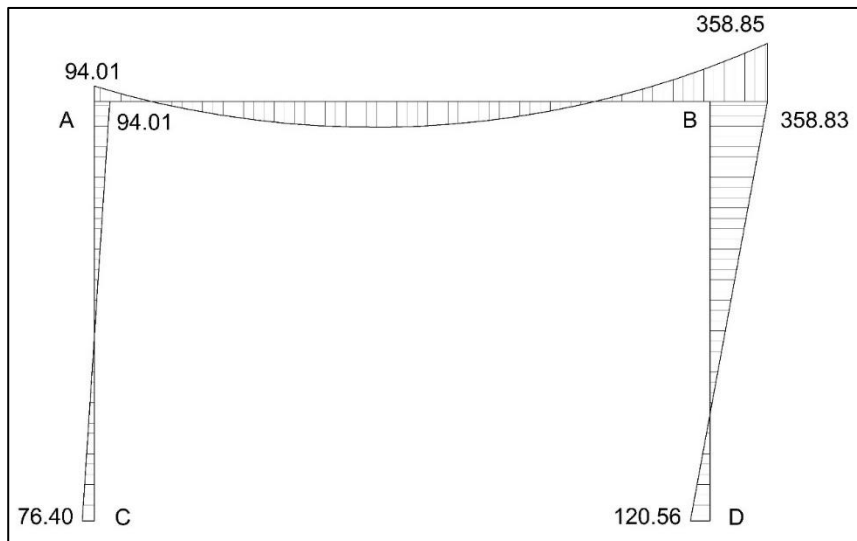
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 73. Diagrama de iteraciones de Kani



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

Figura 74. Diagrama de momentos finales sistema arriostrado, en kg-m



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

## **6. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

De los datos obtenidos y las gráficas resultantes, se realizó una comparación bajo las distintas condiciones de ensayo para cada sistema como se indica a continuación.

### **6.1. Análisis del sistema de losa tipo viga-losa con muro reforzado**

Para el sistema de losa tipo viga-losa con muro reforzado se observa en la figura 47 y la figura 48 las deformaciones verticales y horizontales, respectivamente durante distintos ciclos de carga.

#### **6.1.1. Comparación del sistema arriostrado y sin arriostrar en el sentido horizontal**

Se evidencia que la máxima deformación horizontal generada en el sistema fue durante la aplicación de tres ciclos de carga y el sistema sin arriostrar, alcanzando un valor de 9.10 cm. En el sistema arriostrado, al aplicar dos ciclos de carga se obtuvo la máxima deformación horizontal, siendo esta de 1 cm en el segundo ensayo. En el tercer ensayo, el sistema arriostrado y con dos ciclos de carga aumentada con cilindros de concreto, la deformación máxima horizontal es de 1.65 cm.

La amplitud de la onda generada por la carga dinámica se ve considerablemente reducida por la configuración de arriostramiento aplicada al sistema ya que para dos ciclos de carga se generó una diferencia del 89 %

respecto al sistema sin arriostrar, y para dos ciclos de carga aumentada con cilindros de concreto se generó una diferencia del 81 % respecto al sistema sin arriostrar.

### **6.1.2. Comparación del sistema arriostrado y sin arriostrar en el sentido vertical**

Según la figura 48, la máxima deformación generada en el sistema sin arriostrar en el sentido vertical se obtuvo durante la aplicación de tres ciclos de carga, siendo un valor de 0.70 cm. Para el segundo y tercer ensayo, con el sistema arriostrado, se obtuvo una deformación máxima de 0.50 cm y 1.10 cm, respectivamente. Durante el segundo ensayo, el valor de la amplitud de la onda generada fue mayor al aplicar 1.5 ciclos de carga aumentada con cilindros de concreto, mientras que durante el tercer ensayo la amplitud de la onda fue máxima para dos ciclos de carga aumentada con cilindros de concreto.

La deformación vertical se vio significativamente afectada por la carga aumentada colocada, donde se pudo apreciar la flexibilidad del sistema llevado a condiciones críticas de carga estática y dinámica. El arriostramiento restringe al sistema en el sentido horizontal, pero se evidencia los efectos de dicha restricción para el sentido vertical ya que, en la misma condición de carga sin aumentar existe una diferencia del 29 % aproximadamente respecto al sistema sin arriostrar, es decir, el arriostramiento aumenta la rigidez del sistema.

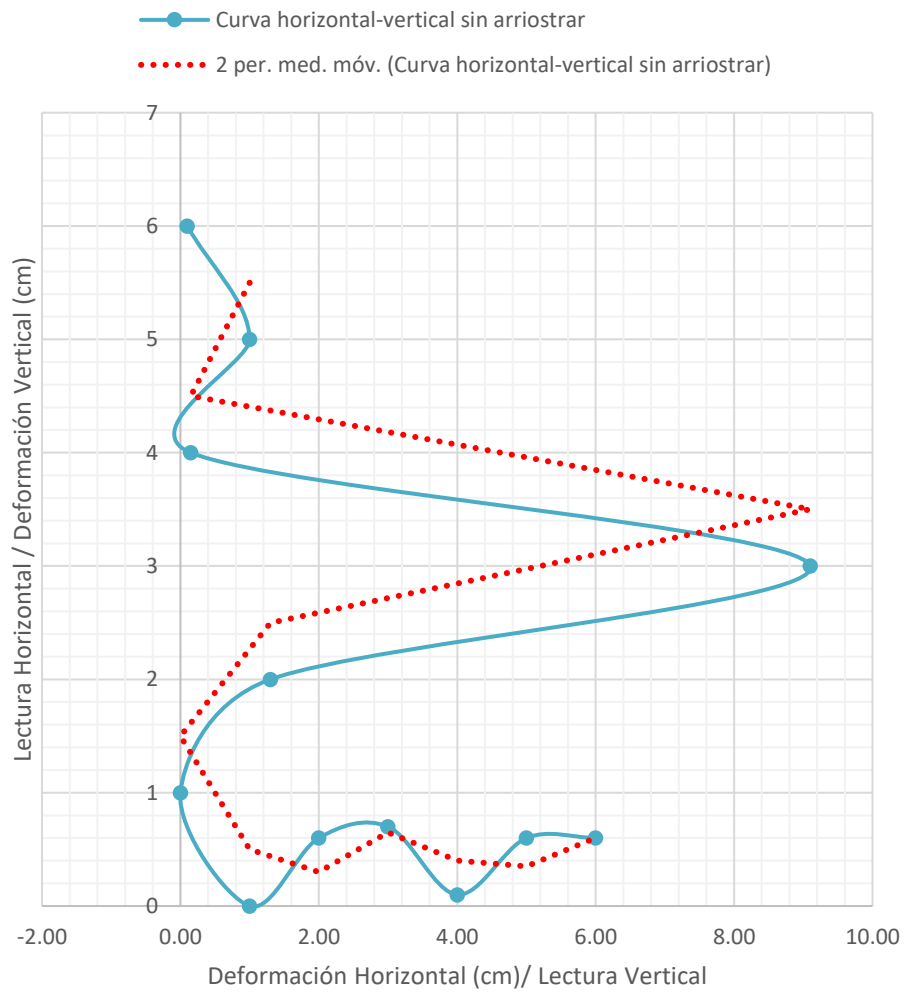
### **6.1.3. Relación de ambos sentidos de deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar**

Obteniendo una relación entre la curva generada en el sentido vertical y el sentido horizontal, para el sistema arriostrado y sin arriostrar, se puede



establecer el comportamiento en conjunto del sistema en análisis. De esta manera se obtiene lo siguiente:

Figura 75. **Relación horizontal-vertical del sistema sin arristrar**

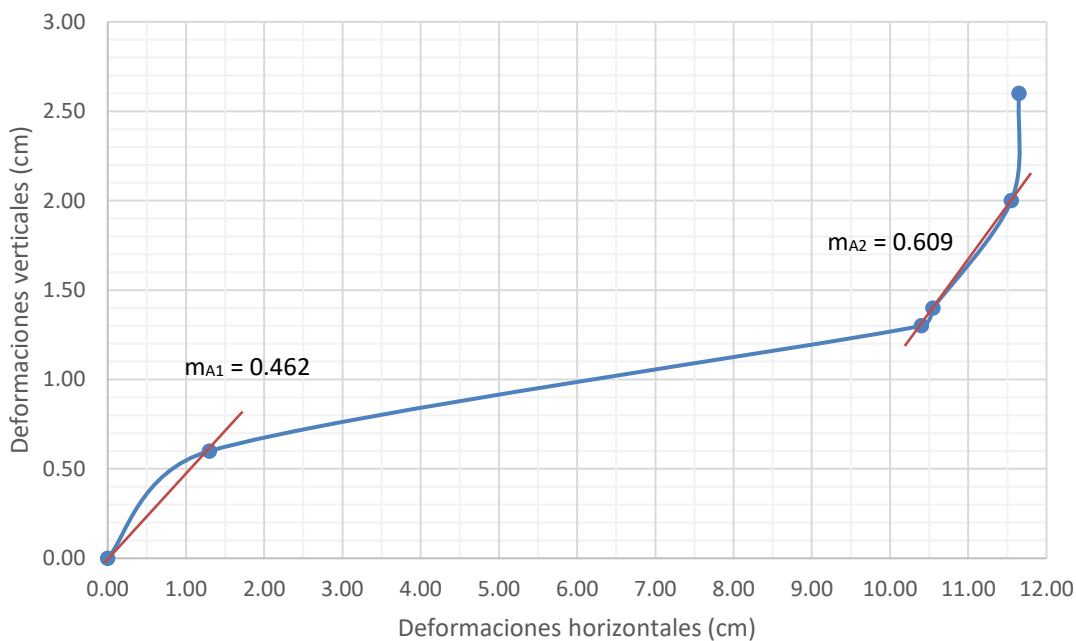


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Para el sistema sin arristrar, según las curvas generadas en las figuras 41 y 42 para las deformaciones horizontales y verticales, respectivamente, se

puede establecer una relación en conjunto por medio de un análisis de media móvil de dos períodos.

Figura 76. **Resultante de deformaciones verticales-horizontales sistema sin arriostrar**



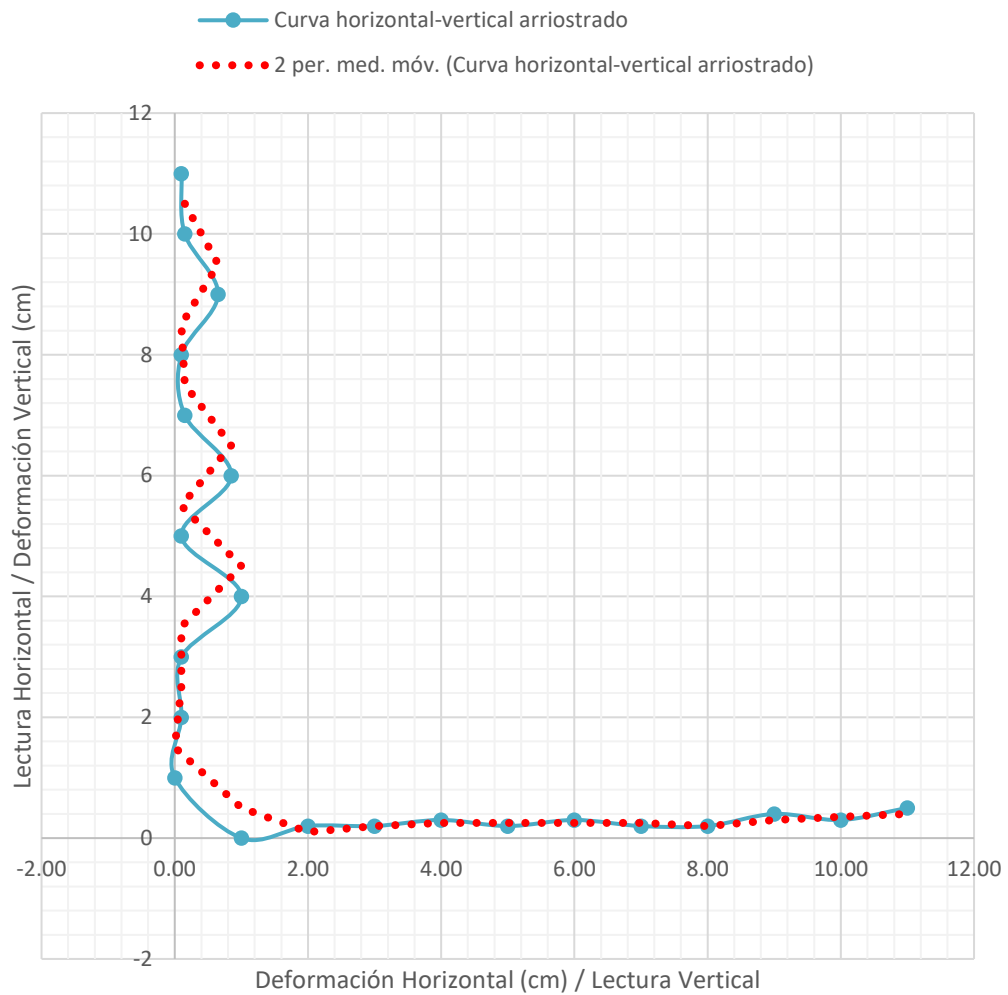
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

De la relación de las deformaciones horizontales y verticales en el sistema no arriostrado, se obtiene una curva resultante que relaciona estos dos parámetros. La pendiente  $m_{A1}$  indica la zona de resiliencia del sistema. Debido a la flexibilidad de este sistema, la zona elástica se genera en una linealidad en la curva que se observa en la figura 76, a partir de la deformación horizontal 1.3 cm a la deformación horizontal 10.55 cm. Después de la deformación de 10.55 cm, la curva cambia su pendiente a  $m_{A2}$ , con un valor de 0.609. Este cambio de pendiente refleja la zona plástica del sistema.

La diferencia entre pendientes evidencia que el sistema sin arriostrar es tan flexible que la zona elástica es mayor que la zona plástica.

Para el sistema arriostrado se obtuvo lo siguiente:

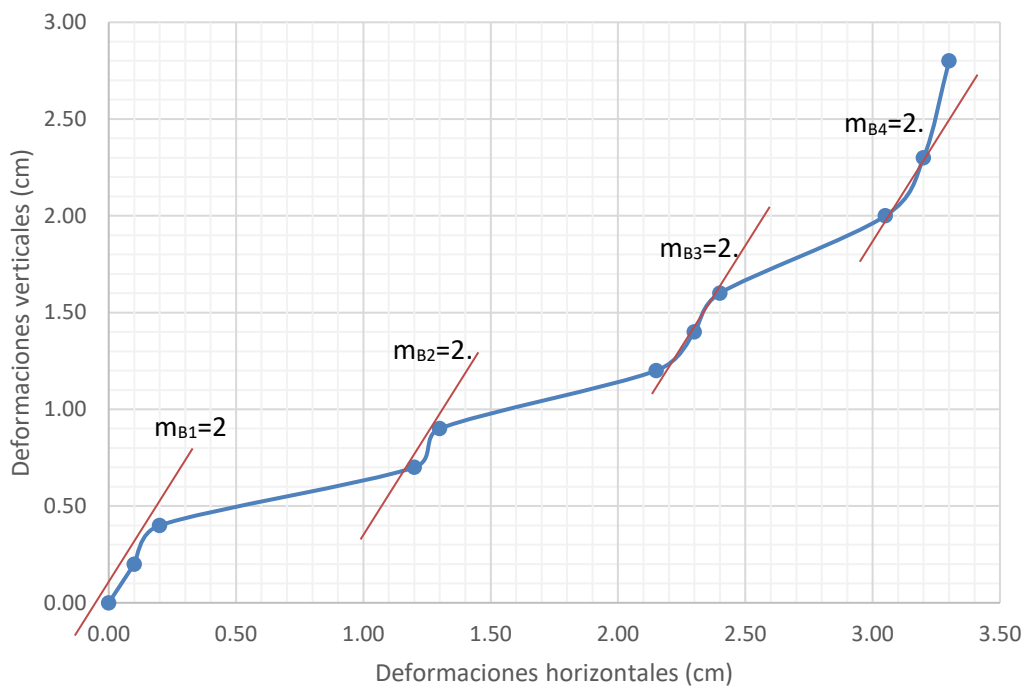
Figura 77. **Relación horizontal-vertical del sistema arriostrado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Para el sistema arriostrado, según las curvas generadas en las figuras 43 y 44 para las deformaciones horizontales y verticales, respectivamente, se puede establecer una relación en conjunto por medio de un análisis de media móvil de dos períodos como se indica en la figura 77.

Figura 78. **Resultante de deformaciones verticales-horizontales sistema arriostrado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

La curva generada en la figura 78 indica la resultante entre deformaciones horizontales y verticales del sistema arriostrado. La zona de resiliencia se genera en la región de la pendiente  $m_{B1}$  la cual tiene un valor de 2.0. La zona elástica se genera en la región de la pendiente  $m_{B2}$ . La zona de transición o elastoplástica se genera en la región de la pendiente  $m_{B3}$  y la zona plástica se genera en la

región de la pendiente  $m_{B4}$ . Tomando de referencia la pendiente la pendiente en la zona elástica se observa que esta se mantiene en el resto de las zonas del sistema, lo que indica que el arriostramiento da mayor estabilidad al sistema, de manera que aporta mayor tenacidad y una mejor distribución de los momentos y esfuerzos generados.

Comparando las pendientes del sistema arriostrado y sin arriostrar se observa que la pendiente en el sistema arriostrado es mayor que las pendientes generadas en el sistema sin arriostrar. Con esto, se puede definir una relación que permite conocer el porcentaje de eficiencia del arriostramiento en el sistema tomando de referencia el comportamiento en su zona plástica.

$$e = \frac{m_{B4}}{m_{A2}} = \frac{2.000}{0.609} = 3.28$$

La relación entre la pendiente del sistema arriostrado con la pendiente del sistema sin arriostrar da como resultado una eficiencia de 3.28, es decir que el arriostramiento da una mejora de 3.28 veces al sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muros reforzados.

## **6.2. Análisis del sistema losa tipo vigueta-bovedilla con muro revestido con poliestireno expandido**

Los primeros dos ensayos del sistema se realizaron con el fin de calibrar y ajustar la metodología de ensayo, así como la carga aplicada, obteniendo que el muro sólido sin aberturas es más rígido que el muro con abertura. En el tercer ensayo se evaluó el comportamiento del sistema no arriostrado con una metodología de carga y descarga gradual, evaluando al muro sólido en tres puntos: a  $H/2$ , al centro superior del rostro interno del muro y el desplazamiento

horizontal. Para este ensayo, se observa un remanente en la parte superior del muro sólido, siendo de 0.15 cm cerca del nudo losa-muro, y de 0.05 cm del desplazamiento horizontal (figura 58 y 59). El muro sólido tiene más rigidez que el muro con abertura, por lo que en el nudo del muro sólido se refleja una mayor absorción de la carga aplicada.

Considerando estos efectos generados durante las primeras pruebas, se evaluó el sistema en una cuarta prueba sin arriostrar, y finalmente, en una quinta prueba con el sistema arriostrado, resultando lo siguiente.

#### **6.2.1. Comportamiento del sistema losa tipo vigueta-bovedilla de muro revestido con poliestireno expandido sin arriostrar**

Considerando que el desplazamiento máximo permitido,  $\Delta_{MÁX}$ , es el 1 % de la altura total del panel, para esta configuración del sistema este es:

$$\Delta_{MÁX} = 0.01 * 260 \text{ cm} = 2.6 \text{ cm}$$

Durante el cuarto ensayo se llevó al sistema a un desplazamiento del 1.38 % de la altura, siendo esta deformación de 3.6 cm. El sistema soportó un desplazamiento de 1 cm más, de acuerdo con el máximo permisible establecido anteriormente. Este desplazamiento es equivalente a 545.45 kg de carga lateral aplicada al sistema.

Para el muro con abertura, el máximo desplazamiento permitido se alcanzó a los 490 kg de carga aplicada y a los 220 kg de descarga, según la curva generada que se muestra en la figura 60. La amplitud de dicha curva en  $\Delta_{MÁX}$ ,

entre el ciclo de aplicación de carga y el ciclo de descarga del sistema está dada por 270 kg, en términos de fuerza.

Para el muro sólido, se referenciaron tres puntos: la zona más crítica, el extremo superior del muro; a la mitad de la altura (H/2); a la mitad del rostro interno en el extremo superior del muro. Para el extremo superior, el  $\Delta_{M\acute{A}X}$  se alcanzó a los 490 kg de carga y a los 227.27 kg de descarga. La amplitud para el desplazamiento máximo permitido es de 262.73 kg. A la mitad del muro, el  $\Delta_{M\acute{A}X}$  es:

$$\Delta_{M\acute{A}X_{H/2}} = 0.01 * \frac{2.6 \text{ m}}{2} = 0.013 \text{ m}$$

$$\Delta_{M\acute{A}X_{H/2}} = 1.3 \text{ cm}$$

Por lo tanto, el  $\Delta_{M\acute{A}X}$  se alcanzó a los 4,545.55 kg de carga y a los 158 kg de descarga, resultando una amplitud de 296.55 kg. Y para el centro al rostro interno del muro se puede considerar que la máxima amplitud de la curva se dio a 1 cm de desplazamiento según la figura 62 de manera que, se alcanzó este desplazamiento a los 454.55 kg de carga y a los 227.27 kg de descarga, resultando una amplitud de 227.28 kg.

Tabla XXX. **Amplitudes de curva en muro sólido**

Referencia	Fuerza a $\Delta_{m\acute{a}x}$ en aplicación de carga	Fuerza a $\Delta_{m\acute{a}x}$ en descarga	Amplitud
Extremo superior	490.00 kg	227.27 kg	262.73 kg
Mitad de la altura	454.55 kg	158.00 kg	296.55 kg
Rostro interno	454.55 kg	227.27 kg	227.28 kg

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Se llevó al sistema más allá de su capacidad de desplazamiento teórico de manera que, para el muro con abertura se alcanzó un desplazamiento máximo real de 3.6 cm, mientras que para el muro sólido se obtuvo 3.55 cm, evidenciando que las aberturas en muros hacen que el elemento sea más flexible.

En el análisis estructural para esta configuración del sistema y según la tabla XVII, se consideró una relación de inercia de 1 para la vigueta y el muro A-C que representa al muro con abertura, y una relación de 2 para el muro B-D (sólido), esto indica que el muro sólido es más rígido respecto al resto de elementos que conforman al sistema, que se comprueba en la rigidez calculada para cada elemento según la tabla XVIII. Los momentos finales más críticos obtenidos, según la figura 71, se generan a la base del muro B-D, el más rígido, mientras que en el nudo losa-solera de corona el momento es aproximadamente 12 veces menor demostrando la alta flexibilidad del sistema en este punto, y la mayor cantidad de energía que absorbe el muro sólido, comparado al muro con abertura.

### **6.2.2. Comportamiento del sistema losa tipo vigueta-bovedilla de muro revestido con poliestireno expandido arriostrado**

La longitud efectiva para esta configuración del sistema se ve reducida debido al arriostramiento colocado. El arriostramiento reduce 45 cm de la altura total, por lo que el desplazamiento máximo permitido es:

$$\Delta_{MÁX} = 0.01 * 215 \text{ cm} = 2.15 \text{ cm}$$

De forma similar al ensayo anterior, se llevó el sistema a un desplazamiento máximo de 3.6 cm correspondiente a una carga de 545.45 kg.



Este desplazamiento corresponde al 1.67 % de la altura efectiva, siendo 1.45 cm más del desplazamiento máximo permitido.

Para el muro con abertura el desplazamiento máximo permitido ( $\Delta_{MÁX}$ ), en la configuración arriostrada del sistema, corresponde a 370 kg para el ciclo de carga aplicada y a 295 kg para el ciclo de descarga, según la curva generada en la figura 65. Por consiguiente, la amplitud de esta curva corresponde a 75 kg, en términos de fuerza.

Para el muro sólido en el sistema arriostrado se referenciaron los mismos tres puntos que en el sistema no arriostrado. Para el punto de referencia más crítico, el desplazamiento máximo permitido ( $\Delta_{MÁX}$ ) en la configuración arriostrada se obtuvo a los 290 kg durante el ciclo de carga y a los 200 kg durante el ciclo de descarga, según la curva generada en la figura 66. Esto indica que la amplitud de la curva para este punto ( $\Delta_{MÁX}$ ) es de 90 kg, en términos de fuerza. Para el punto de referencia al rostro interno en el extremo superior del muro, se puede determinar la amplitud de la curva a 1.50 cm de desplazamiento, por lo que para el ciclo de carga se obtuvo 395 kg y para el ciclo de descarga 110 kg resultando una amplitud de 285 kg. En el punto de referencia de H/2 del muro sólido la amplitud se determina considerando lo siguiente:

$$\Delta_{MÁX} = 0.01 * \frac{215 \text{ cm}}{2} = 1.08 \text{ cm}$$

En aproximadamente 1.08 cm de deformación según la curva mostrada en la figura 68, durante el ciclo de carga esta deformación se alcanza a los 315 kg y para el ciclo de descarga se alcanza a los 155 kg, por lo que resulta una amplitud de 160 kg en términos de fuerza.

En el análisis estructural para el sistema arriostrado se consideró una relación de inercia de 1.25 para el muro A-C (con ventana), 1.5 para el muro B-D (sólido) y 0.75 para la losa. Estas relaciones se obtienen considerando la pérdida de rigidez por aberturas en el muro ya que el área del muro con abertura representa un 83 % del área del muro sólido aproximadamente, por lo que la relación de inercia del muro A-C se ve reducida por un factor de 0.83. Considerando lo anterior se determina que la rigidez en el muro con abertura es menor que en el muro sólido, como se indica en la tabla XXVI donde el muro A-C (con abertura) tiene una rigidez  $K_{AC} = 0.58$  y el muro B-D (sólido) tiene una rigidez  $K_{BD} = 0.70$ , y la losa tiene una rigidez  $K_L = 0.20$ .

Para esta configuración del sistema se consideró un factor de corrimiento de 0.4 como se indica en la tabla XXVII que, a diferencia del sistema no arriostrado donde el factor de corrimiento es de 1.5, la redistribución de momentos en el nudo genera una reducción de este factor. Dada la composición del arriostramiento y la metodología de ensayo, los factores de giro vienen definidos por los valores dados en la tabla XXVII, donde para cada nudo se ha considerado un factor de -0.5 para la relación de rigideces de los elementos con la consideración especial para el nudo B. Existe una diferencia de rigideces entre muros por lo que se obtuvo una reducción del 20 % de la rigidez entre el muro con abertura y el muro sólido, por lo que se consideró un factor de corrección de 0.80 para el muro sólido, así el nudo B se compone por los factores de giro  $\mu_{BA}$  igual a 0.311 y  $\mu_{BD}$  igual a 0.189.

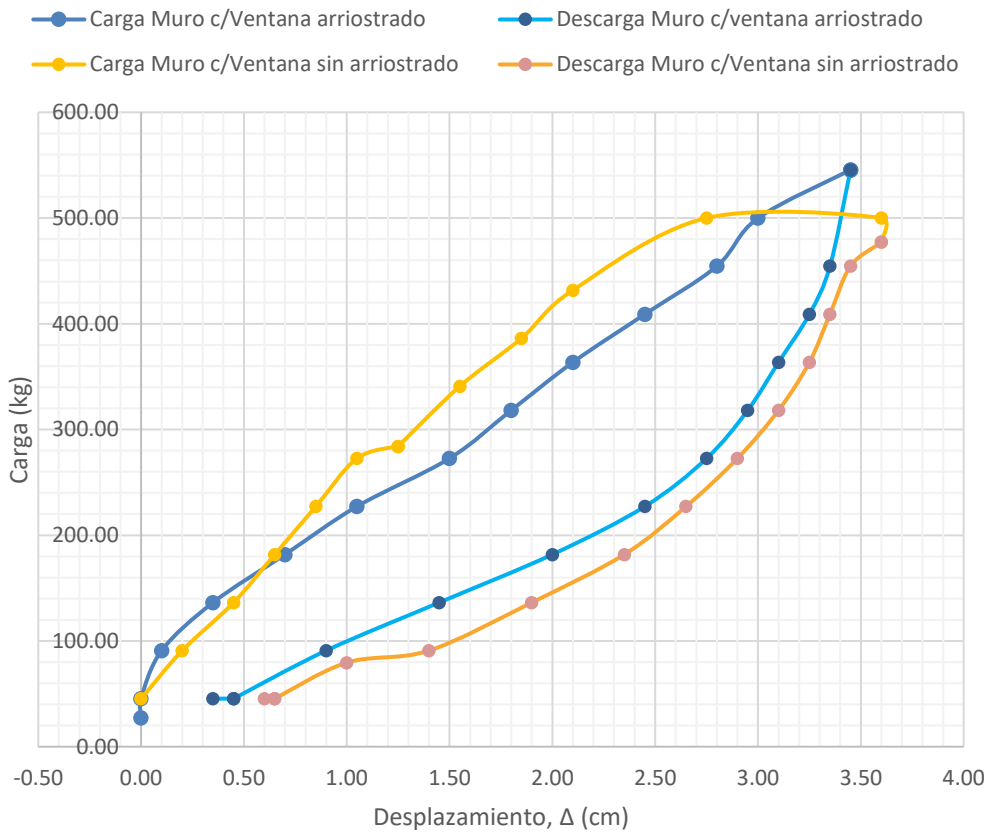
En la tabla XXVIII se indican los momentos de Kani con los que se obtienen los momentos de sujeción para cada nodo. Como se indica en la figura 73, los momentos de sujeción son 188.24 kg-m y -188.24 kg-m para el nodo A y el nodo B, respectivamente. Para 10 ciclos de iteraciones, se obtienen los momentos finales donde para el nodo A se obtuvo una reducción evidente

respecto al sistema no arriostrado, pues el valor del momento final en este es de 94.01 kg-m. Para el nodo B se suman los momentos manteniendo la integridad estructural, pues el ángulo de 90 ° en el nudo no cambió. Tanto para viga como para el muro el momento es de -358.80 kg-m. El incremento del momento en el nudo B, evidencia el aumento de la rigidez del muro sólido y la capacidad de energía que aumenta debido al arriostrado, además que el momento cerca del empotramiento al suelo del muro B-D (sólido) se ve disminuido y redistribuido al nudo B.

### **6.2.3. Comparación del sistema arriostrado y sin arriostrar**

Comparando cada muro con el sistema arriostrado y sin arriostrar, se observa el comportamiento siguiente:

Figura 79. **Carga-deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar del muro con abertura**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

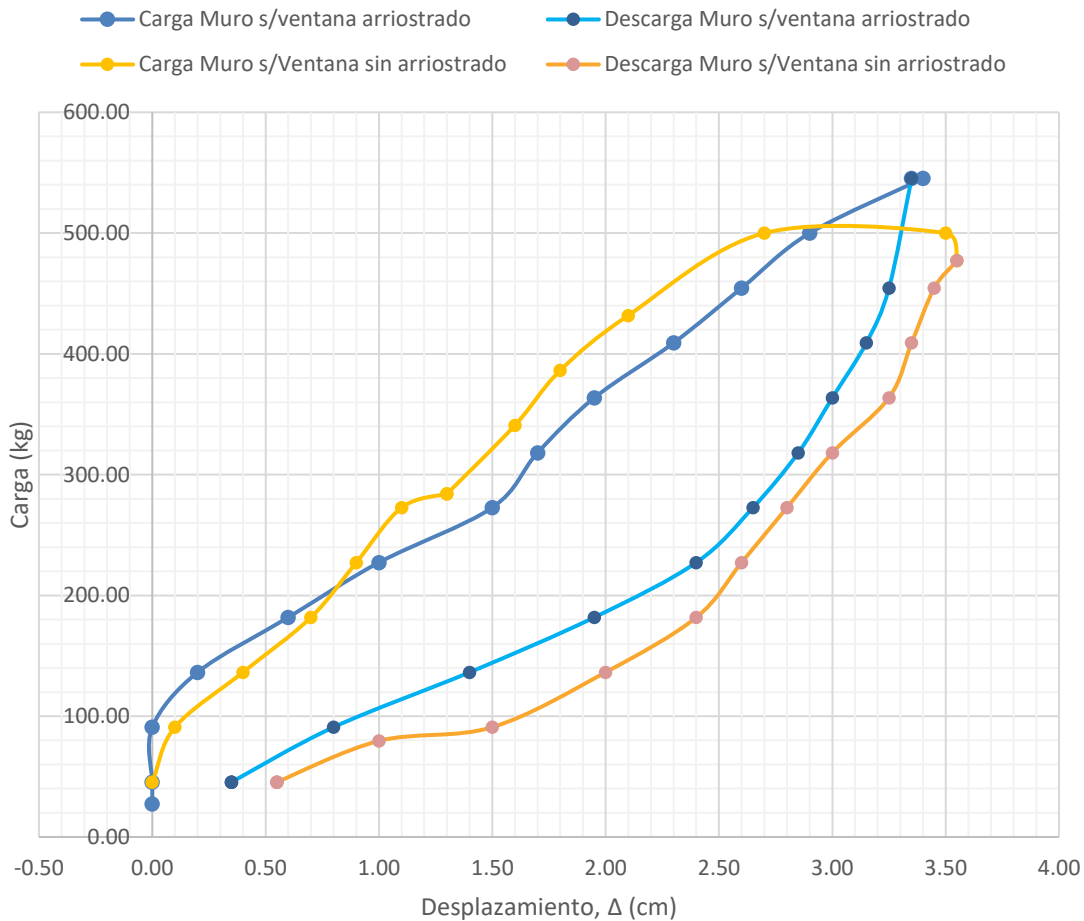
En la figura 79, se observan las curvas generadas en el muro con ventana donde la amplitud de la curva generada se ve reducida con el arriostramiento, de manera que existe una diferencia evidente en la zona de cedencia de la curva durante el ciclo de carga, es decir que el nivel de cedencia para el sistema sin arriostrar se alcanzó a los 284.09 kg en 1.25 cm de desplazamiento y para el sistema arriostrado sucede en 272.73 kg en 1.50 cm, por lo que el sistema arriostrado disminuye su nivel de cedencia por 11.36 kg.

Además, la resiliencia se ve aumentada debido al arriostamiento, ya que en el sistema no arriestrado este valor se encuentra en 45.45 kg aproximadamente, y el valor de resiliencia para el sistema arriestrado es de 90.91 kg aproximadamente.

El arriestrado da una capacidad de resiliencia de 45.45 kg que se ve reflejado en el punto máximo de la curva ya que para el sistema sin arristrar es de 500 kg, mientras que en el sistema arriestrado es de 545.45 kg.

Para el muro sin ventana, se obtuvo un comportamiento similar al anterior como se indica en la figura siguiente:

Figura 80. **Carga-deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar del muro sin abertura**

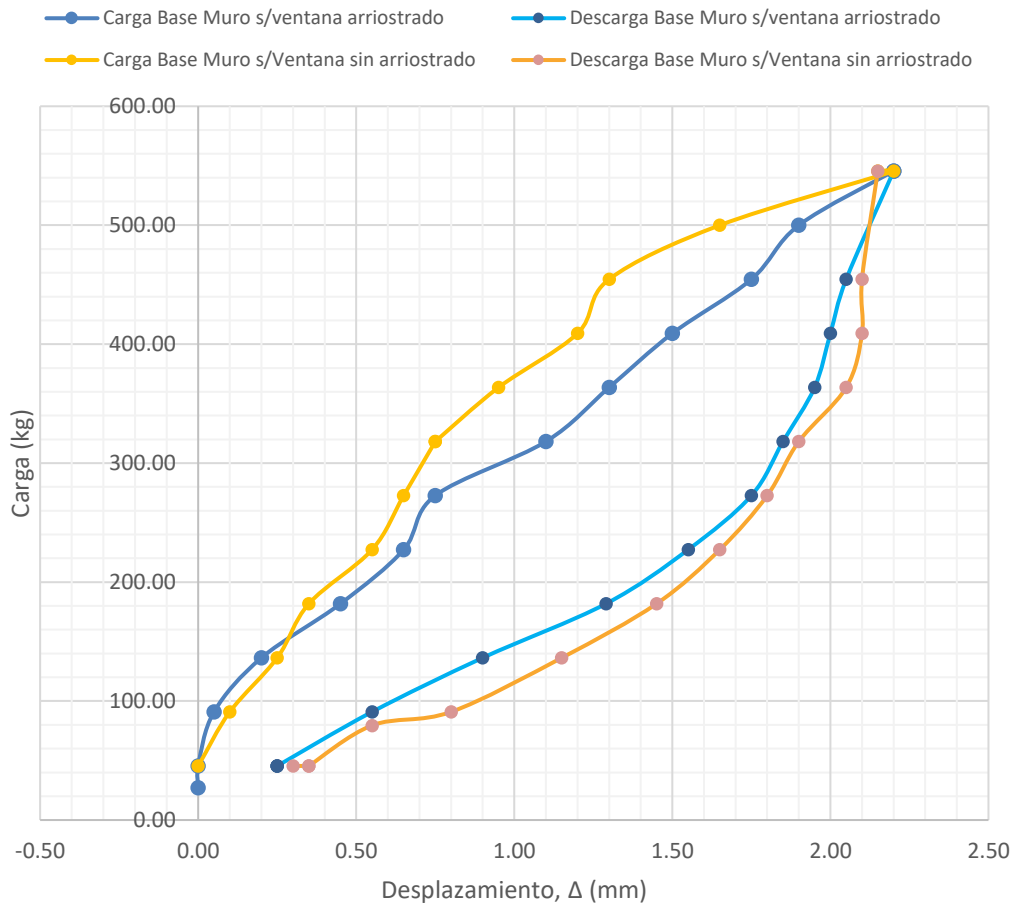


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

El muro sin abertura mantuvo un comportamiento similar al muro con abertura, ya que el nivel de cedencia se alcanzó a los 284.09 kg en 1.30 cm de desplazamiento cuando no está arriostrado, y 272.73 kg en 1.50 cm cuando está arriostrado, disminuyendo el nivel de cedencia en la misma magnitud que el muro con abertura. De la misma forma, se mantiene la capacidad de resiliencia del sistema en 45.45 kg.

Al analizar el muro sin abertura a H/2, se obtiene lo siguiente:

Figura 81. **Carga-deformación del sistema arriostrado y sin arriostrar a H/2 del muro sin abertura**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

A H/2 del muro sin abertura se observa el nivel de cedencia en 318.18 kg a 0.75 mm de desplazamiento en el sistema sin arriostrar, mientras que para el sistema arriostrado este se alcanzó a los 272.73 kg en 0.75 mm de desplazamiento, de manera que la diferencia del nivel de cedencia en este punto

es de 45.45 kg. Para H/2 del muro, la capacidad de resiliencia del sistema arriostrado y sin arriostrar se iguala en su punto máximo, por lo que se ve reflejado la influencia de la diferencia del nivel de cedencia para este punto.

Analizando el comportamiento de ambos muros en el sistema, se puede considerar un factor K de 0.5 para el sistema arriostrado, de manera que la longitud efectiva para el sistema arriostrado sería de aproximadamente 1.075 m, y considerando un desplazamiento máximo del 1 %, este es aproximadamente 1 cm. Para las curvas generadas del sistema arriostrado en ambos muros la zona elástica encuentra su límite hasta 1 cm de desplazamiento. La zona elástica se ve reducida en el sistema arriostrado, pero el arriostramiento aporta dureza en la zona plástica, es decir que el arriostramiento trabaja en la zona plástica.

El muro sin abertura mantiene una rigidez aún sin arriostramiento, pero también mantiene un comportamiento similar al muro con abertura ya que para ambos el límite de la zona elástica se encuentra en 1 cm de desplazamiento el muro y la rigidez que aporta el arriostramiento funciona para mejorar el comportamiento y reacción del sistema en el rango plástico. Esto es debido a las características del muro ya que estos sistemas son diseñados para un comportamiento muy flexible, así el arriostramiento da una tenacidad en la zona plástica, es decir que el arriostramiento aumentó la capacidad del sistema en la zona baja, porque hace que trabaje más arriba y que en la base tenga un comportamiento como parcialmente articulado, por lo que el arriostramiento ayuda a redistribuir la rigidez y los momentos a la parte superior del sistema.

El análisis a H/2 del muro sin abertura indica que el arriostramiento en la parte superior provoca que la parte inferior se flecte más aportando mayor tenacidad en la parte superior del muro, además de continuar absorbiendo el momento generado.



Comparando los diagramas resultantes del análisis estructural obtenidos en las figuras 71 y 74 (sin arriostrar y arriostrado, respectivamente), se evidencia la redistribución de momentos de la parte inferior a la parte superior del sistema. En el nudo A cuando el sistema no está arriostrado, se generó un momento mayor que en el nudo B, pero al reforzar con el arriostramiento en estos nudos, el momento se redistribuye al nudo B y disminuye en el nudo A.

En las bases de los muros, en los puntos C y D del sistema sin arriostrar, se generan momentos mayores a los que se formaron en los nudos muro-losa, debido a la considerable flexibilidad de este tipo de sistemas prefabricados, pero al arriostrar se evidencia que los momentos soportados en la base disminuyen significativamente y estos son redistribuidos a la parte superior, lo cual indica el comportamiento esperado del sistema. El arriostramiento absorbe una porción del momento ayudando a cada nudo como se indica en la tabla siguiente:

Tabla XXXI. **Porcentaje de momento redistribuido por arriostramiento**

<b>Muro</b>	<b>Cantidad de momento redistribuido (%)</b>
De C a A	82.4
De D a B	86.8

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Considerando que el muro A-C es menos rígido debido a la abertura por ventana respecto al muro B-D, la diferencia de la redistribución de momentos de un muro a otro no supera el 4.4 %.

### **6.3. Análisis de la metodología empleada para arriostramiento y ensayo en ambos sistemas**

La alta flexibilidad del sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado se vio contrarrestada, en una parte, por el arriostramiento y a pesar de fatigar el sistema con distintos ciclos de carga y descarga, el mecanismo de anclaje y las placas no sobrepasaron sus límites de esfuerzo que los llevara a un colapso súbito. Las placas biela fueron rellenas de madera para conocer el comportamiento de este tipo de arriostramiento embebido en el nudo (ver figura 37), de esta forma el arriostramiento presentó más rigidez y un comportamiento similar a las placas totalmente rígidas colocadas en el rostro externo del nudo losa-muro rigidizando aún más el sistema. En la figura 47 y figura 48 se observa la disminución de la amplitud de la onda generada por carga dinámica tanto en el sentido vertical como horizontal.

Figura 82. **Efecto generado en perno del muro para anclaje de placas biela**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 83. **Efecto generado en perno de losa para anclaje de placas biela**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 84. **Efecto generado en perno de losa para anclaje de placas totalmente rígidas**



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

La reacción en los pernos y las placas bajo distintos ciclos de carga dinámica denota el aumento de la rigidez si las placas biela son embebidas en el nudo, y evidencia que esta metodología de arriostamiento permite fallas elásticas evitando colapsos súbitos al rigidizar el sistema.

En el sistema de losa vigueta-bovedilla con muro revestido con poliestireno expandido se realizaron mejoras a la metodología de ensayo respecto a las primeras tres pruebas realizadas, las cuales permitieron una mejor distribución de carga aplicada dando resultados más certeros que se evidencia en las curvas resultantes de los ensayos cuatro (sin arriostar) y cinco (arriestrado).

En este sistema de muros revestidos con poliestireno expandido el muro sin abertura al ser más rígido genera un punto de inflexión en la losa a  $0.2 \ell$  del

nudo A y  $0.3 \ell$  del nudo B, donde  $\ell$  es la longitud de la losa lo cual demuestra que el arriostramiento de la placa rígida total tiene más rigidez que la placa tipo biela, ya que en la primera se genera más momento y menos deformación y en la segunda se genera menos momento y más deformación.

El tipo de arriostramiento placa biela cuenta con unas articulaciones que permiten una rigidez en menor magnitud que la placa rígida totalmente. Las placas rígidas tienen un comportamiento más plástico que las placas biela, mientras que estas últimas tienen un comportamiento elástico, por lo que el tipo de arriostramiento de placa rígida total puede que absorba el momento y haga fallas súbitamente a los pernos para anclaje, pero las placas biela tienen cierta elasticidad que permite que el anclaje no falle súbitamente. Las placas rígidas endurecen todo el sistema.

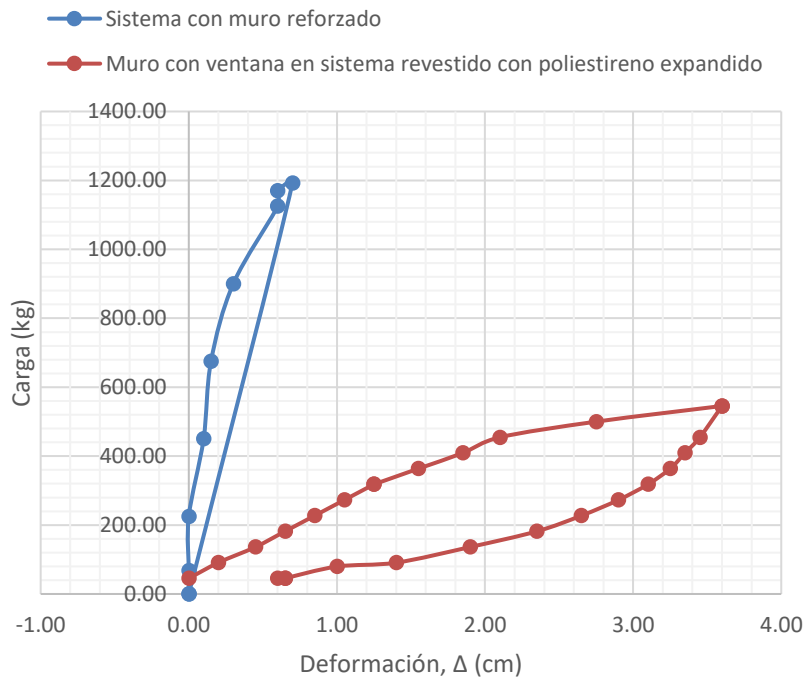
Para minimizar el efecto de columna corta al usar este tipo de arriostramiento en el nudo se deben de colocar las placas de manera que no ocupen más del 20 % de la altura total del muro, ya que después de este factor podría aumentarse la rigidez generando momentos muy grandes en los nudos losa-solera, además de mantener la simetría del arriostramiento respecto a la rigidez de cada muro considerando las aberturas en estos para establecer el tipo de arriostramiento más conveniente para mantener esta simetría. Si la diferencia de rigideces fuera mayor al 30 % se desestabiliza el sistema.

Cuando el porcentaje de vacíos en un muro es menor del 20 %, se puede suponer como que el muro es lleno, pero el poliestireno expandido es un material muy flexible por lo que el material utilizado para el revestimiento del muro es de vital consideración para su uso estructural en cuanto a la rigidez del sistema.

### 6.3.1. Comparación de metodologías entre el sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado con sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro revestido de poliestireno expandido

Considerando los ensayos previos con carga estática en el sistema de losa tipo vigueta-bovedilla con muro reforzado como se indicó en el capítulo de antecedentes, y tomando en cuenta en el ensayo realizado en el sistema con muro revestido con poliestireno expandido sin arriostrar, se obtuvo el comportamiento siguiente:

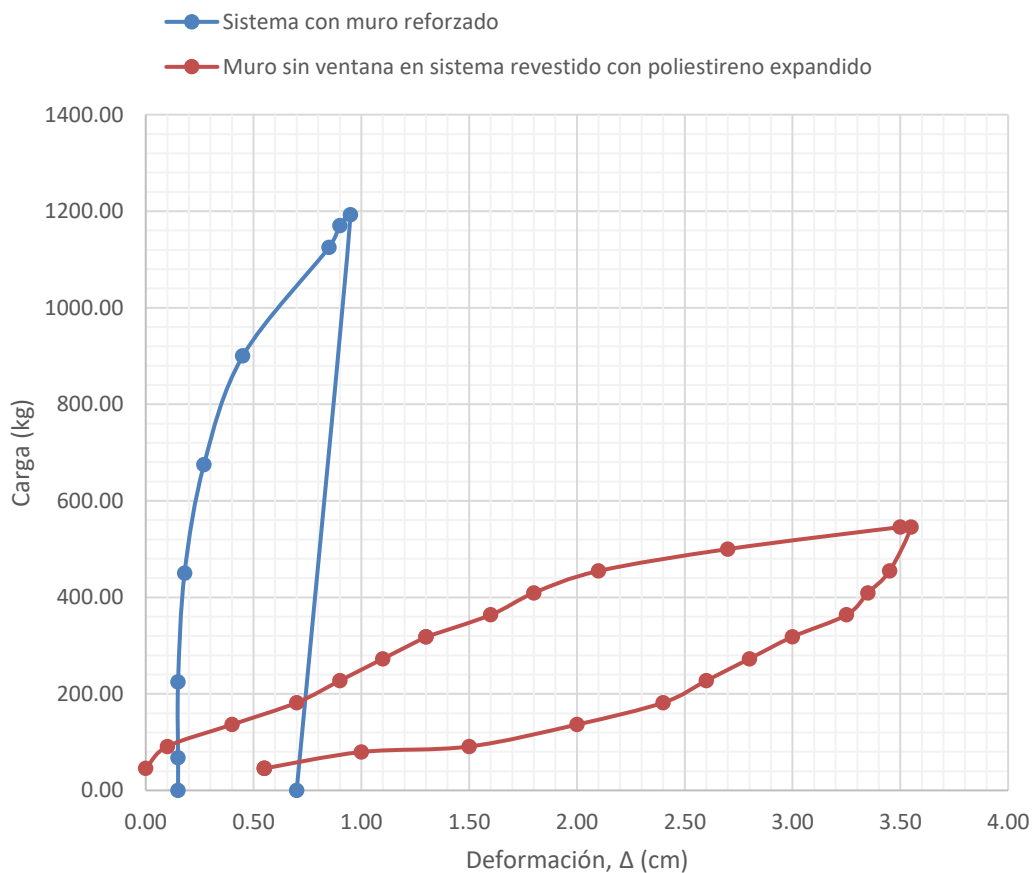
Figura 85. **Carga-deformaciones horizontales en ambos sistemas comparando muro 1**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Comparando el muro 1 en cada sistema (para el sistema con muro reforzado consiste en la deformación 1 según tabla III; para el sistema revestido con poliestireno expandido corresponde al muro con ventana) se evidencia la diferencia en cuanto a la flexibilidad de cada uno, ya que el muro revestido con poliestireno expandido es más flexible, y se debe considerar que los efectos por carga vertical son mayores en el sistema con muro reforzado.

Figura 86. **Carga-deformaciones horizontales en ambos sistemas comparando muro 2**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

De la misma forma, comparando el muro 2 (para el sistema con muro reforzado consiste en la deformación 2 según tabla III; para el sistema revestido con poliestireno expandido corresponde al muro sin ventana) el comportamiento es similar que en el muro 1, por lo que se denota que el área de abertura en el muro se encuentra en un rango aceptable y los efectos por carga vertical en este sistema de muros con poliestireno expandido no son evidentes respecto al otro sistema.

Aun sin los efectos de carga vertical, el sistema de muros revestidos con poliestireno expandido es más flexible por el comportamiento mecánico del material, aunque esto no causa que los muros no sean lo suficientemente rígidos por sí mismos como para no cumplir su función estructural.



## CONCLUSIONES

1. Se determinó que al arriostrar cada sistema se genera una redistribución de los momentos en la base al nudo superior losa-solera donde el arriostramiento aporta al sistema dando mayor capacidad de energía cuando el sistema entra a su zona plástica, sin afectar su capacidad en la zona elástica.
2. Se determinó que el comportamiento de los sistemas de losa tipo vigueta-bovedilla son más flexibles que un sistema tradicional, además de que los momentos generados en estos sistemas son mayores en los muros cuando son sometidos a cargas puntuales, distribuidas o a ciclos de carga dinámica.
3. Se determinó que, en un ciclo de carga y descarga, la amplitud de la onda generada disminuye considerablemente al arriostrar el sistema, por lo que el límite de cedencia y la resiliencia del sistema aumentan, además el arriostramiento genera que aumente la tenacidad cuando el sistema actúa en su zona plástica.
4. Se analizó que estos sistemas de losa prefabricada tipo vigueta-bovedilla con muros de mampostería al ser sometidos a distintos tipos de carga los efectos generados consisten en desplazamientos que pueden llegar a ser mayores a su deriva máxima permisible que representa el 1 % de su altura total, sin generar fallas súbitas debido a que tienen mayor capacidad de energía cuando trabajan en su zona elástica y elastoplástica.

5. Se determinó que para el sistema con muros revestidos con poliestireno expandido el material de revestimiento a pesar de su alta flexibilidad da un aporte estructural, pero para mantener la integridad del sistema la diferencia de rigideces entre muros no debe superar el 20 %, mientras que para el sistema con muros reforzados existe más rigidez que con el arriostramiento asegura una diferencia no mayor al 20 % entre estos.
6. Se comparó el sistema con muros de mampostería reforzada arriostrado y sin arriostrar de manera que, cuando el sistema está arriostrado la amplitud de la onda generada presenta oscilaciones más altas que cuando está arriostrado, ya que el sistema arriostrado disminuyó la amplitud de la onda por lo que fue posible aumentar la carga sin generar cortes súbitos en las placas y en los pernos, evidenciando que se generan más momento en los nudos sin provocar un colapso súbito del sistema.
7. Se comparó el sistema de muros revestidos con poliestireno expandido de manera que, con el sistema sin arriostrar se generaron momentos más grandes a la base de los muros que en los nudos A y B, pero cuando el sistema está arriostrado los momentos se redistribuyen hacia los nudos donde el nudo B es el que se comporta más rígido debido a que el arriostramiento no solo rigidiza al muro sino también en una porción a la losa.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar la aplicación de la metodología de arriostramiento con las placas biela con articulaciones que permita manejar la flexibilidad de estas.
2. Verificar el funcionamiento de la metodología de arriostramiento de placas biela articuladas en las esquinas embebidas en concreto, o bien, con un relleno sólido de madera u material de otro tipo considerando las reacciones que esta aplicación resulta en el sistema.
3. Verificar que la longitud de anclaje de las placas bielas en el muro no superen un 20 % de la altura total de este tomando en cuenta siempre de mantener un ángulo de inclinación de la placa de 45 grados para evitar un efecto de columna corta que aumente drásticamente la rigidez del sistema en uno o ambos muros del módulo evaluado.
4. Considerar que las aberturas en los muros por puertas o ventanas para estos sistemas flexibles no sobrepasen un 20 % del área total del muro ya que las aberturas disminuyen la rigidez del muro que conforma al sistema.
5. Analizar la metodología de anclaje que permita la evaluación de la reacción de los pernos respecto a las cargas aplicadas en el sistema arriostrado.
6. Tomar en cuenta que en sistemas donde no hay muros perpendiculares al sentido de la losa se recomienda aplicar la metodología de

arriostamiento analizada para la mejora en la distribución de momentos en los muros y para dar estabilidad al sistema.

## REFERENCIAS

1. American Concrete Institute. (2011). *Building Code Requirements and specification for masonry structures (ACI 530-11)*. Farmington Hills : Masonry Standards Joint Committee (MSJC).
2. American Concrete Institute . (2010). *Recomendaciones para el diseño de conexiones viga-columna en estructuras monolíticas de concreto reforzado (ACI-ASCE 352)*. Farmington Hills.
3. American Concrete Institute. (2014). *Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318S-14) y comentario (ACI 318SR-14): (versión en español y en sistema métrico SI)*. Farmington Hills.
4. Amrhein, J. y Porter, M. (2009). *Reinforced masonry engineering handbook*. Washington: Masonry Institute of America; International Code Council.
5. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2010). *NSE 3-10: Diseño estructural de edificaciones. Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala*. Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
6. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2010). *NSE 4-10: Requisitos prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles. Normas de seguridad estructural de*

*edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala.* Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.

7. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2010). *NSE 7.4: Mampostería reforzada (NR9: 2000). Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala.* Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
8. Barrera, L. (2010). *Validación del sistema constructivo prefabricado tipo poste pretensado placa ensamblada.* (Tesis de licenciatura) Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
9. Bazán, E. y Meli, R. (2002). *Diseño sísmico de edificios.* México: Limusa S.A.
10. Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2019). *Informe No. 01 ELF 26/04/2019.* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
11. Centro de Investigaciones de Ingeniería. (2018). *Informe No. ELF 01-NOV2018.* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
12. Chavarría, M. (2011). *Análisis y determinación teórica de la rigidez de muros de mampostería reforzada en edificios de hasta dos niveles.* (Tesis de licenciatura). Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

13. Colunga, A., Hernández, G. y Vergara, J. (11 de octubre, 2006). Estimación de la rigidez lateral elástica de muros con aberturas. [Mensaje en un blog] [https://www.scipedia.com/wd/images/2/27/Draft\\_Content\\_160063558Tena-Colunga\\_et\\_al\\_a.pdf](https://www.scipedia.com/wd/images/2/27/Draft_Content_160063558Tena-Colunga_et_al_a.pdf).
14. Corzo, M. (2008). Notas mampostéricas de una sabandija. Guatemala: s.n., 2008. pág. 194.
15. Hernández, G. (2017). *Diseño de losas tipo vigueta y bovedilla no preesforzado*. (Tesis de licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
16. International Code Building, Inc. 2017. *2018 International Building Code (International Code Council Series)*. [ed.] Codebook Downloads. Primera. Country Club Hills : s.n., 2017. pág. 757. 1609837347, 9781609837341.
17. International Conference of Building Officials. (Julio de 1997). Uniform Building Code. Whittier. International Conference of Building Officials, 1997. pág. 431. Vol. II. 1884590896, 9781884590894.
18. Juárez, H. (2012). *Guía de aspectos técnicos a considerar en la supervisión de proyectos de techo mínimo, para el ejecutor y el supervisor*. (Tesis de licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
19. López, C. y Music, J. (2016). *Análisis del período y desplazamiento de edificios de hormigón armado considerando distintos grados de*

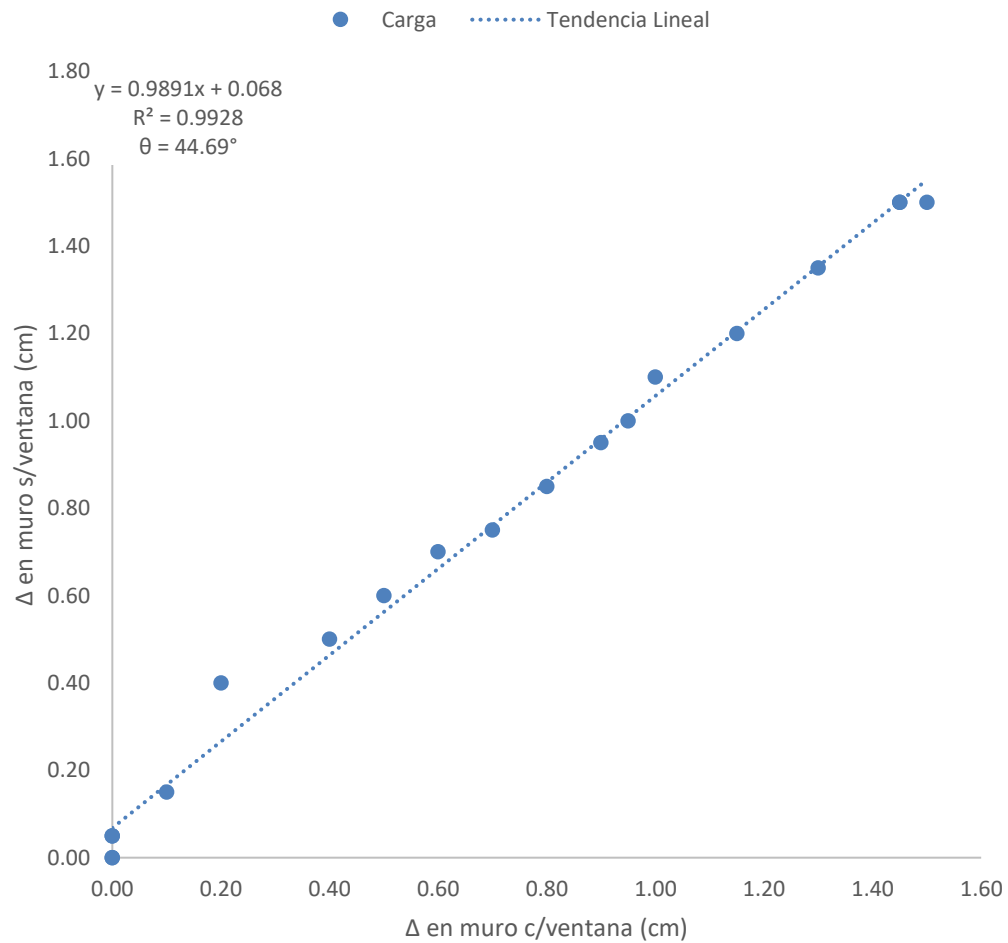
*rigidez en sus elementos resistentes*. Antofagasta, Chile : s.n., Junio de 2016. Obras y proyectos, (19). 0718-2813.

20. McCormac, J. y Csernak, S. (2013). *Diseño de estructuras de acero*. México: Alfaomega Grupo Editor.
21. Orózco, P. (2019). *Propuesta de vivienda unifamiliar utilizando muros de poliestireno expandido, reforzado con acero y concreto*. (Tesis de licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
22. Poveda, Á. (2010). *Edificios de mampostería*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
23. Ramírez, M. (2015). *Análisis y diseño estructural de viviendas unifamiliares de dos niveles, con diferente unidad de mampostería por nivel*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala.
24. Seisdodos, D. (2016). *Diseño computarizado de losas macizas en dos direcciones utilizando el método de los coeficientes*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala.
25. Velásquez, S. (2012). *Análisis de aberturas máximas en un muro de mampostería, para considerarlo continuo*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala.



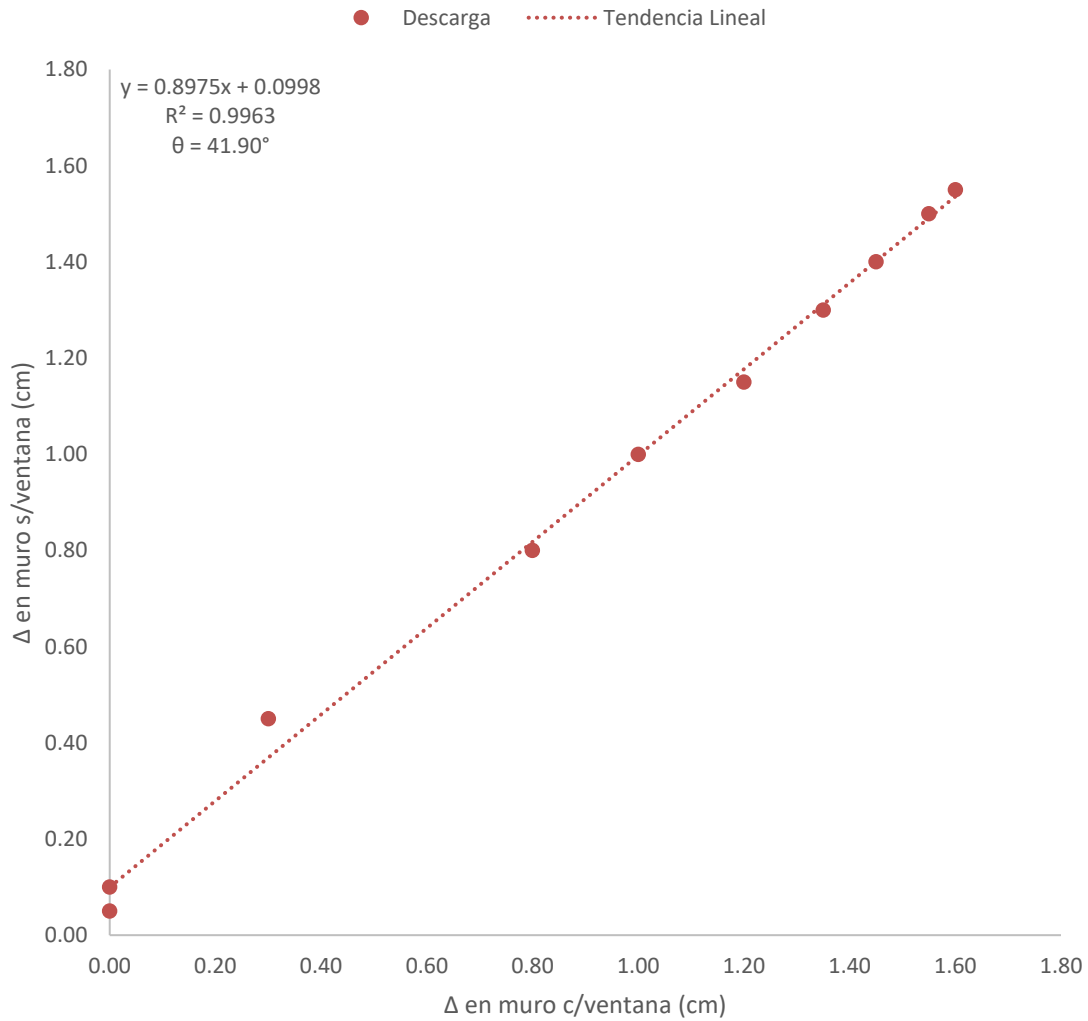
## APÉNDICES

### Apéndice 1. Correlación lineal de deformaciones resultantes en tercer ensayo de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo de carga



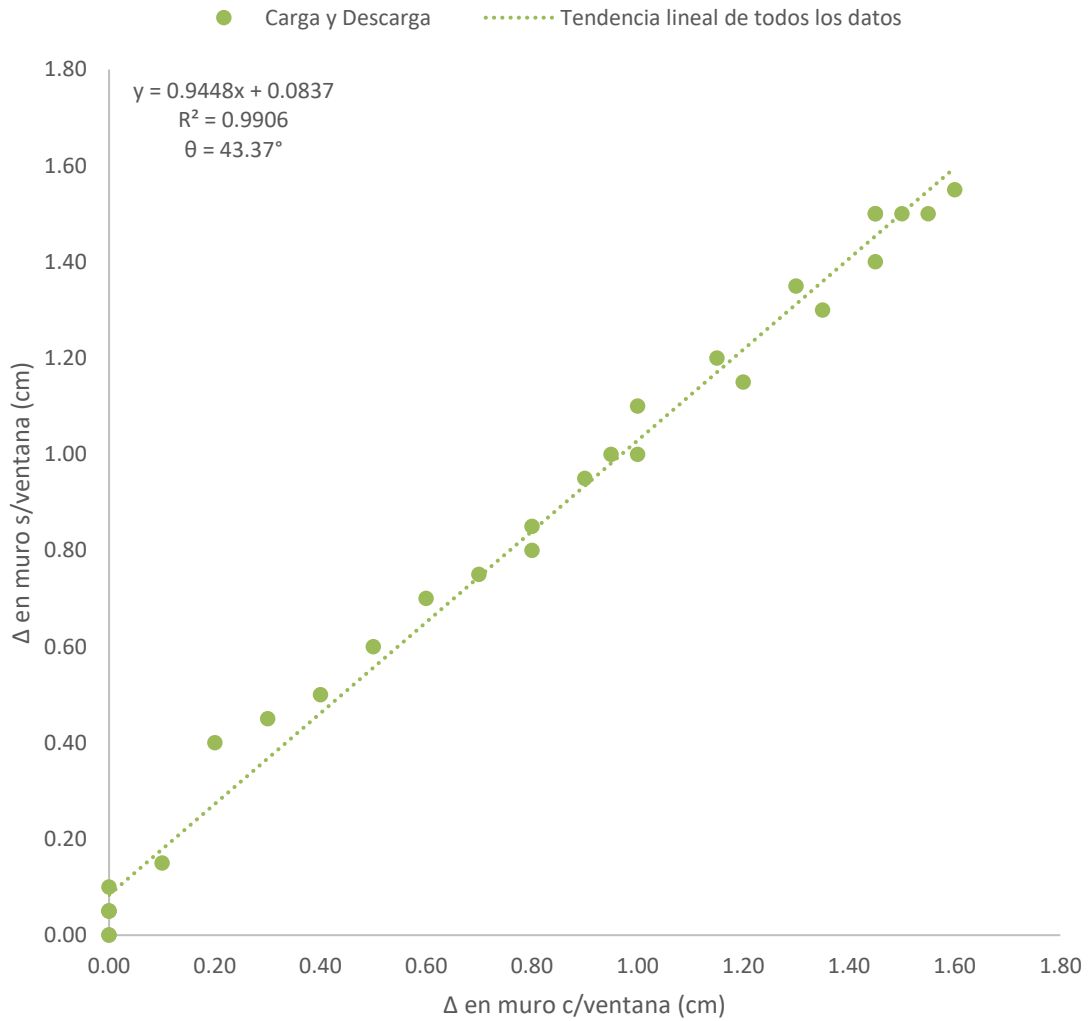
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 2. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en tercer ensayo de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo de descarga**



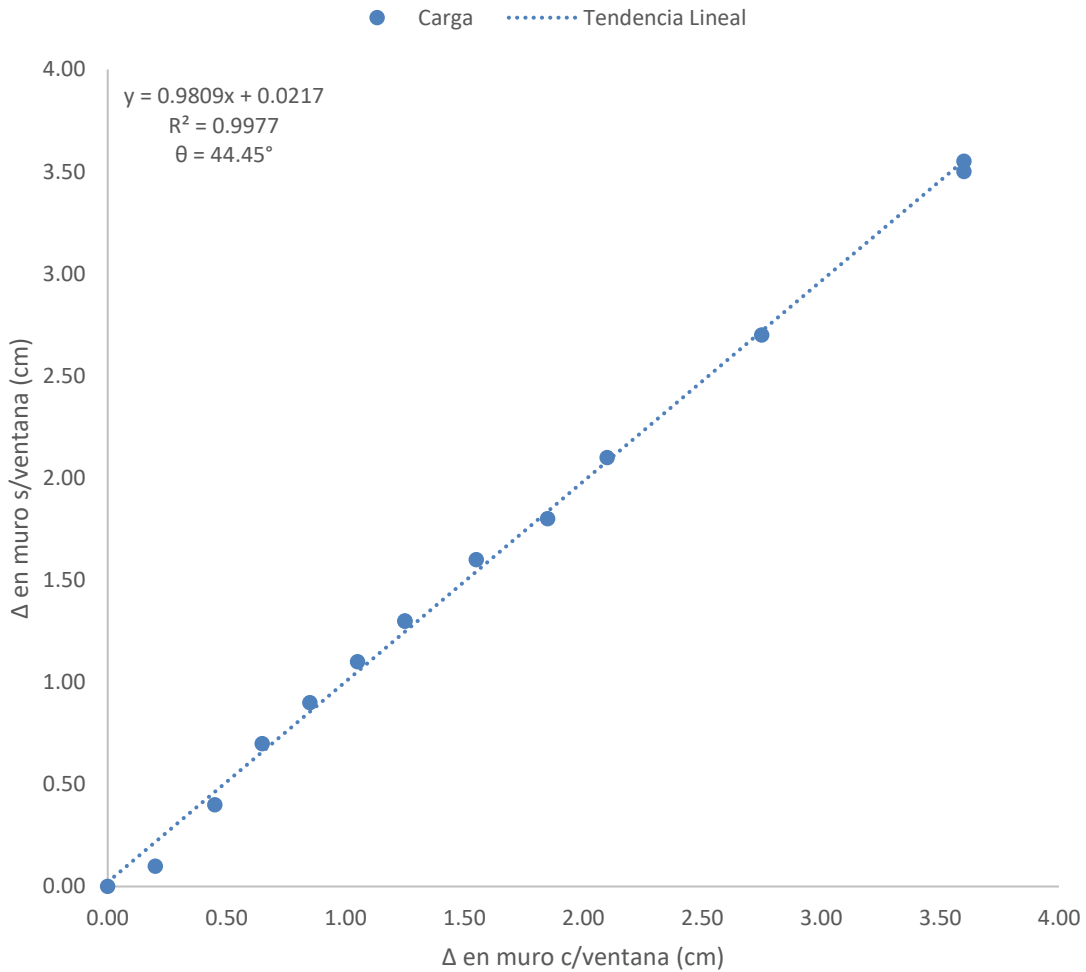
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 3. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en tercer ensayo de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo completo de carga-descarga**



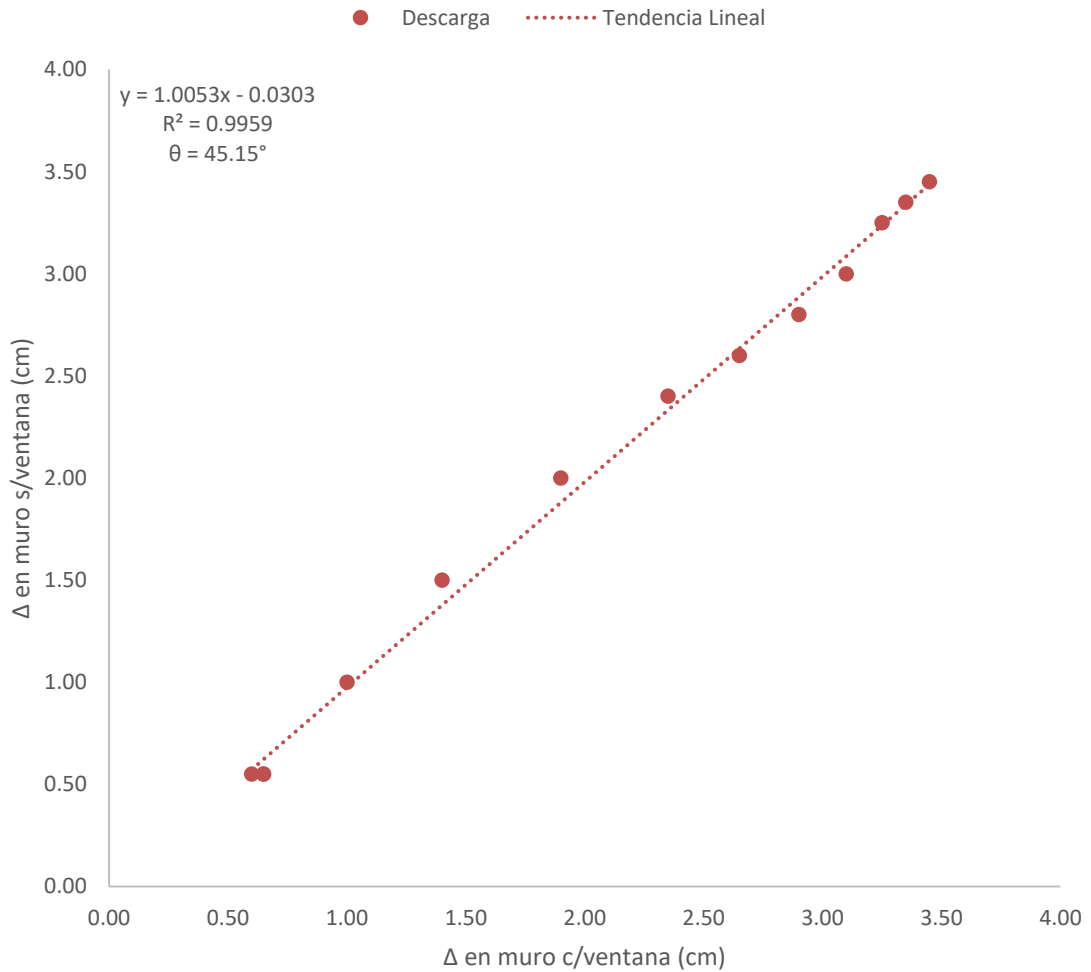
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 4. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en cuarto ensayo de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo de carga**



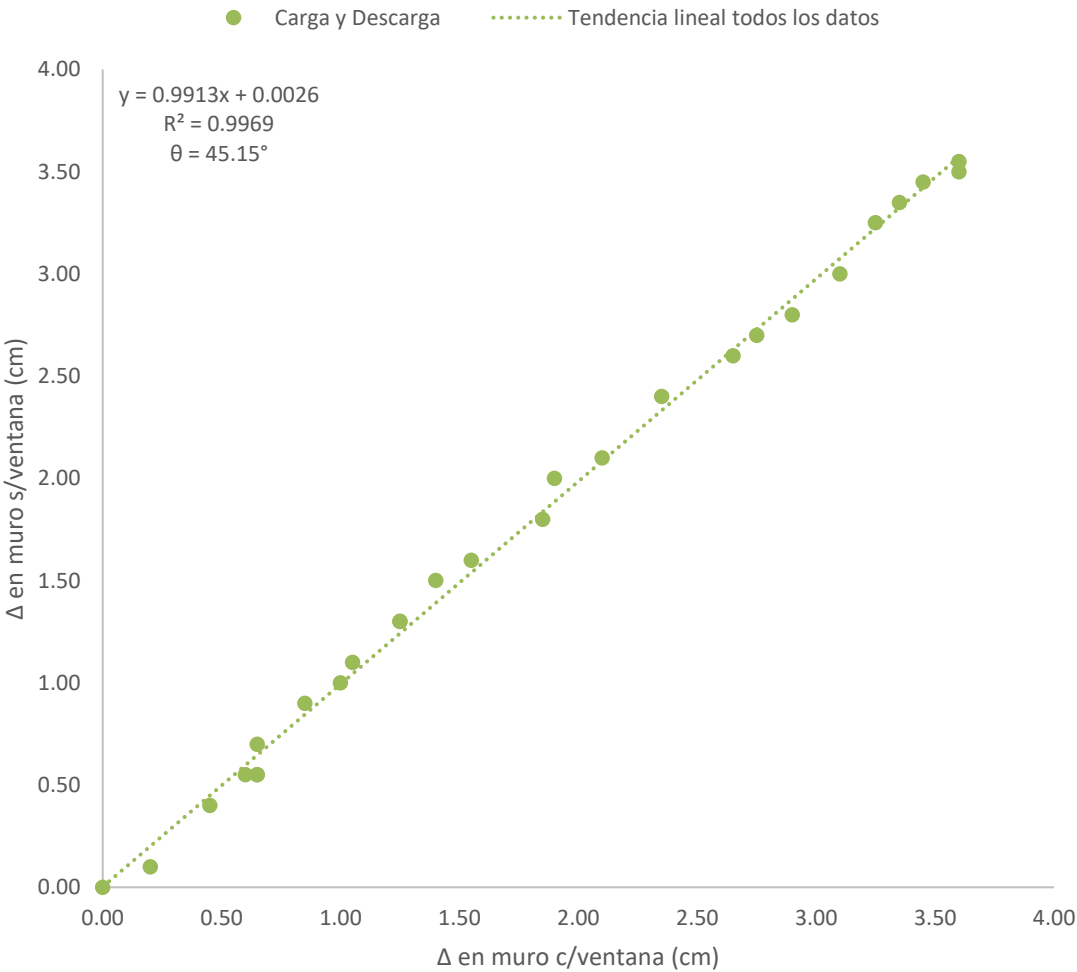
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 5. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en cuarto ensayo de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo de descarga**



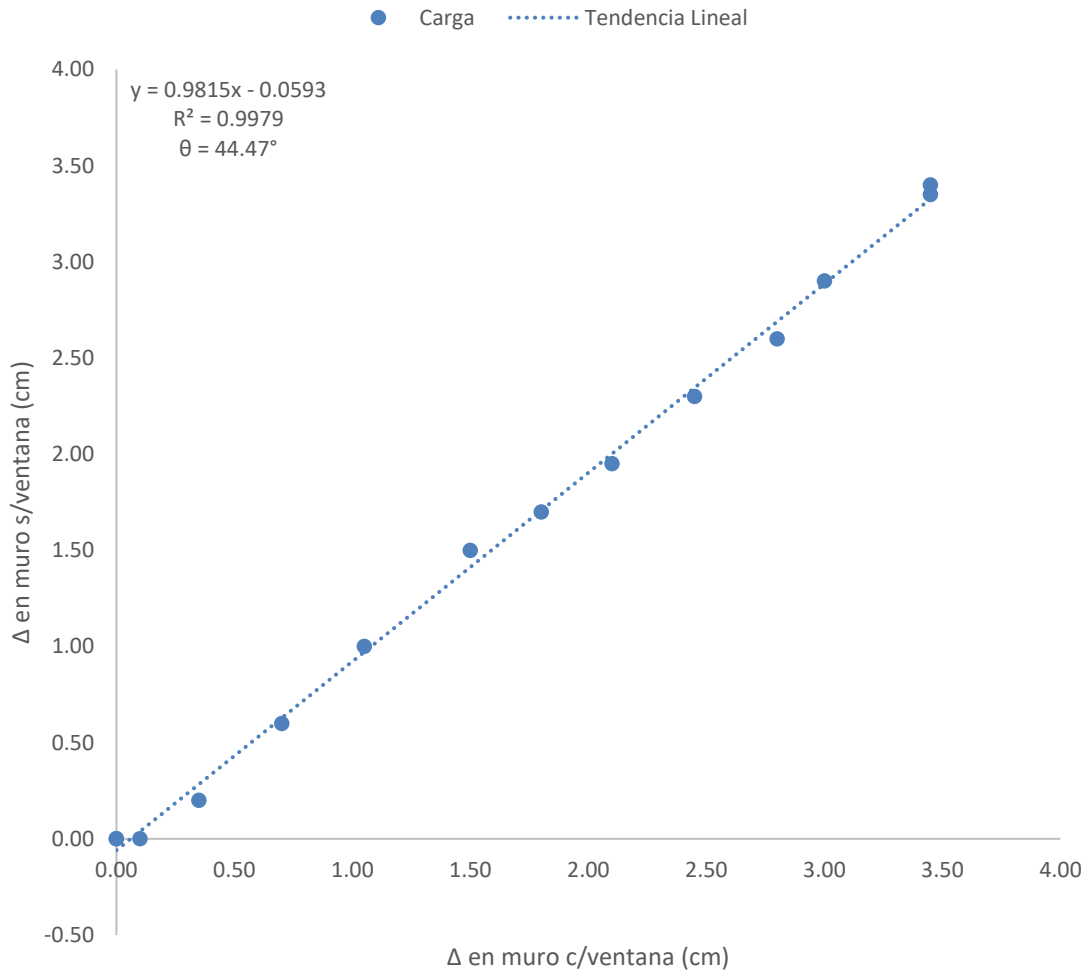
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 6. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en cuarto ensayo de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo completo de carga-descarga**



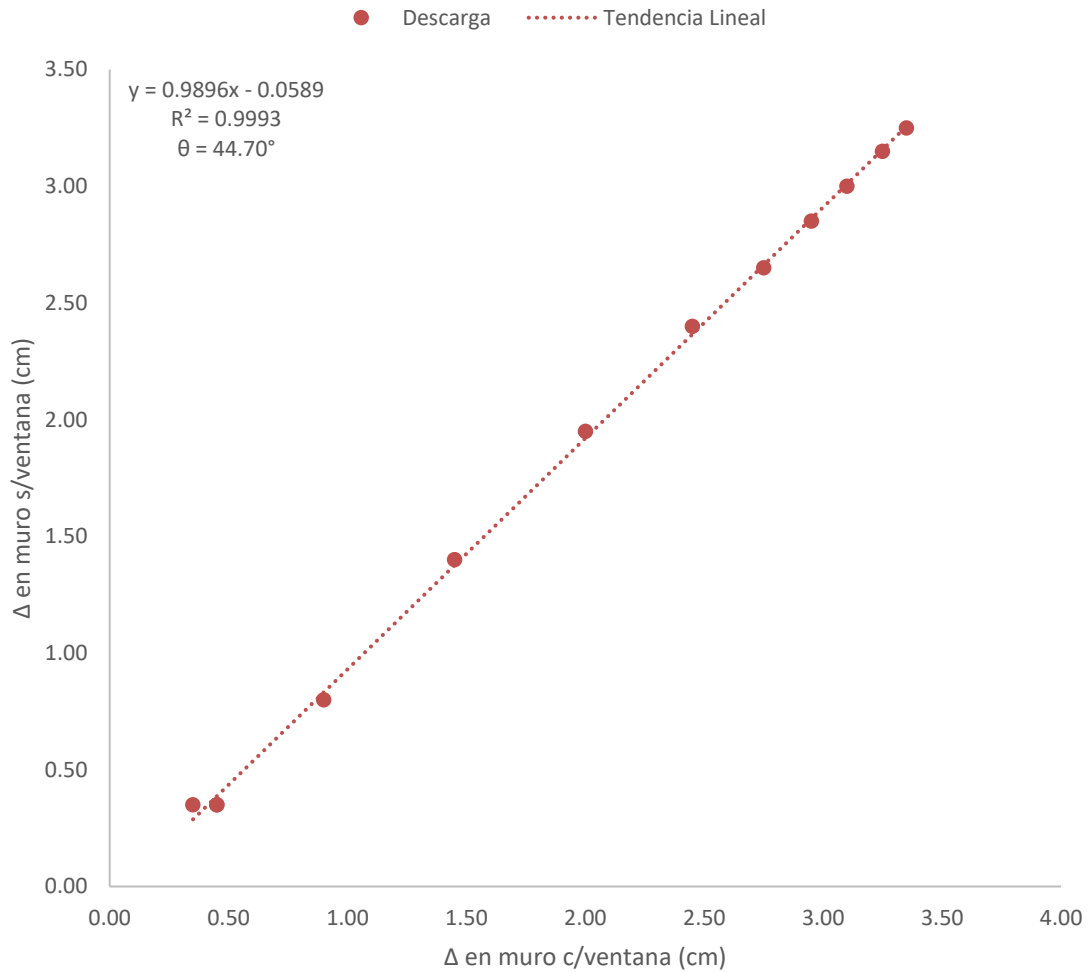
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 7. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en quinto ensayo (arriestrado) de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo de carga**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

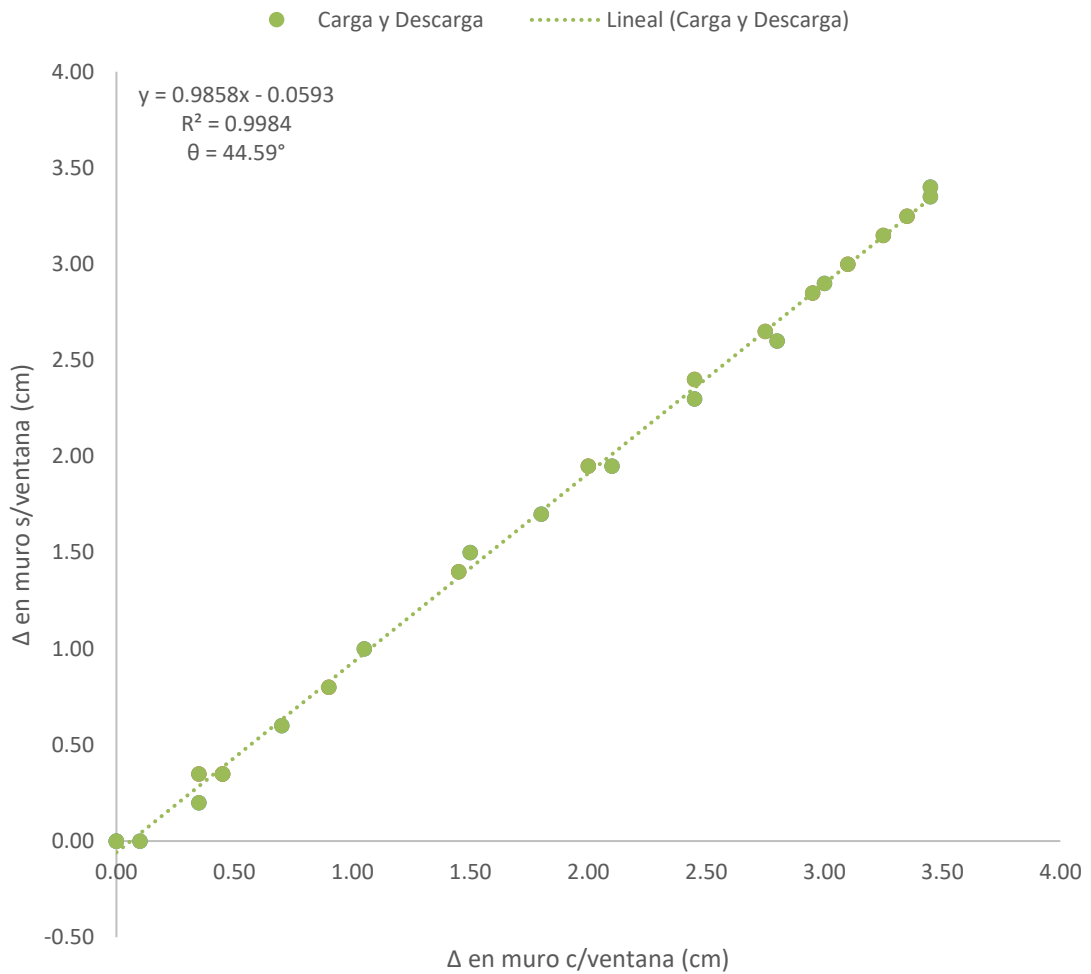
Apéndice 8. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en quinto ensayo (arriostrado) de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo de descarga**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

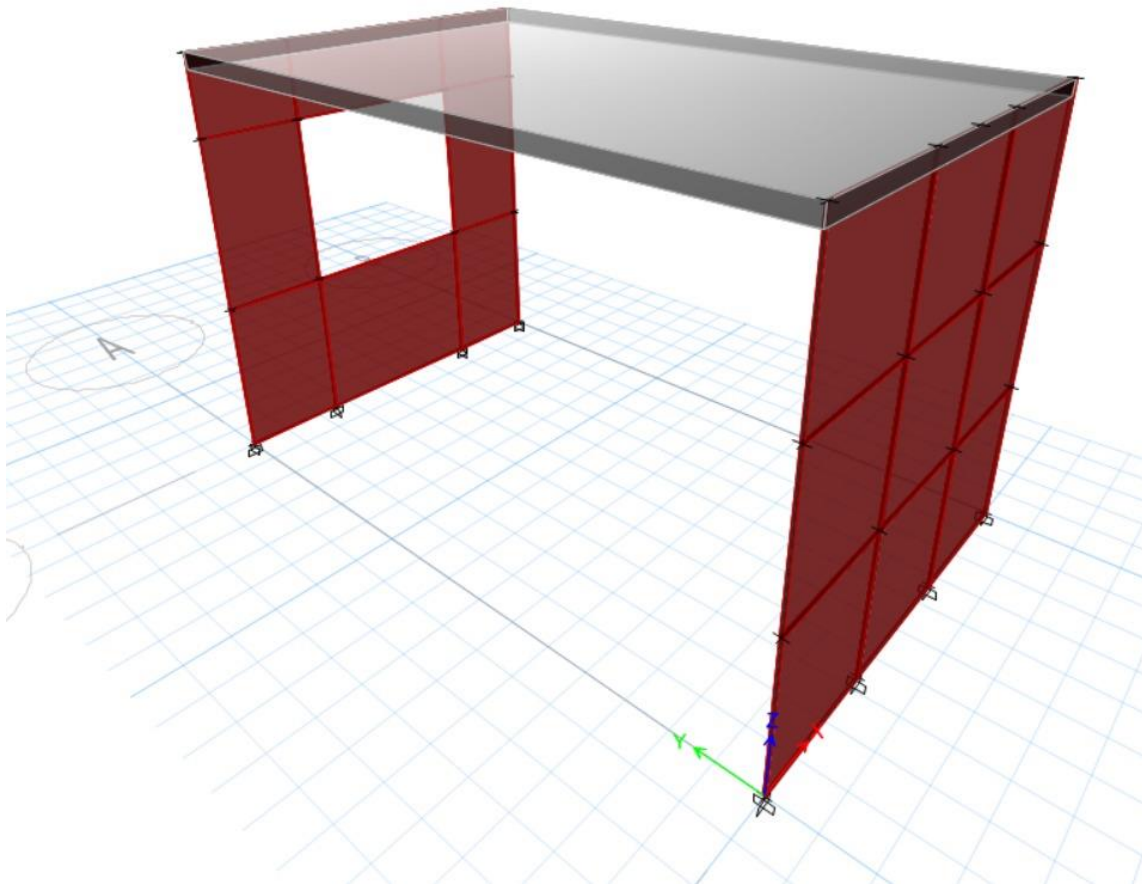


Apéndice 9. **Correlación lineal de deformaciones resultantes en quinto ensayo (arriostrado) de sistema con muros revestidos de poliestireno expandido en el ciclo completo de carga-descarga**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

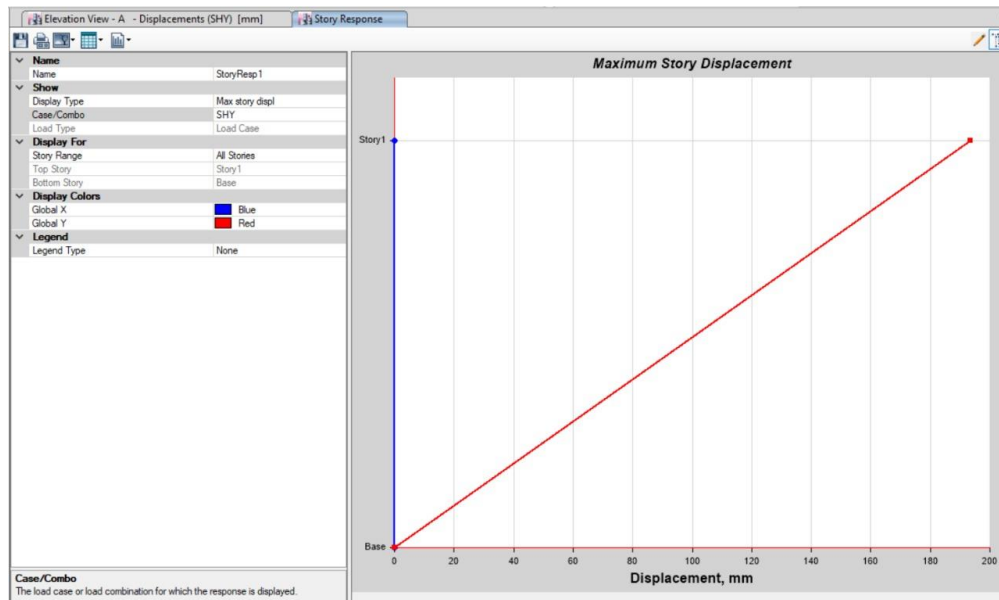
Apéndice 10. **Modelo 3D de deformación del sistema con muros revestidos con poliestireno expandido al actuar un sismo**



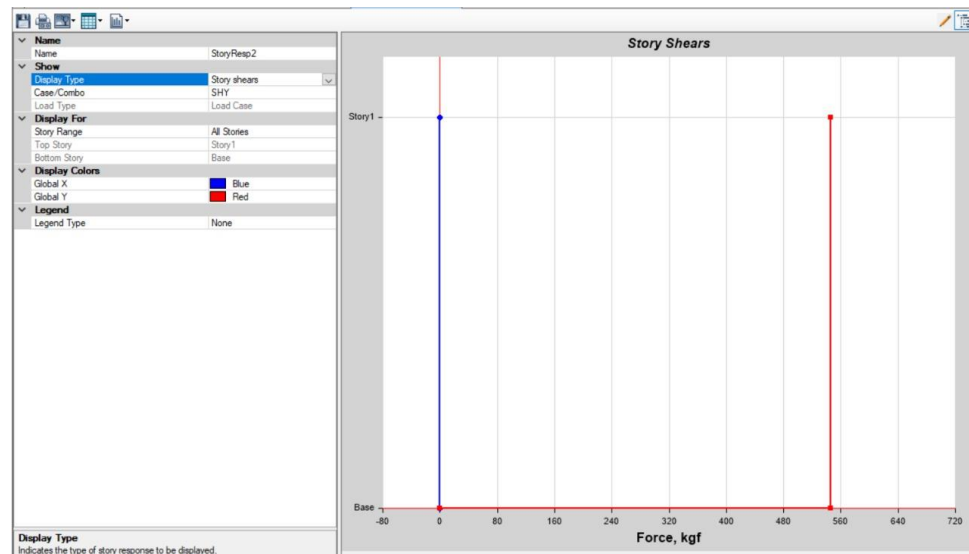
Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

## Apéndice 11. Función del modelo desplazado del sistema según acción del sismo

- Gráfica de desplazamiento del sistema

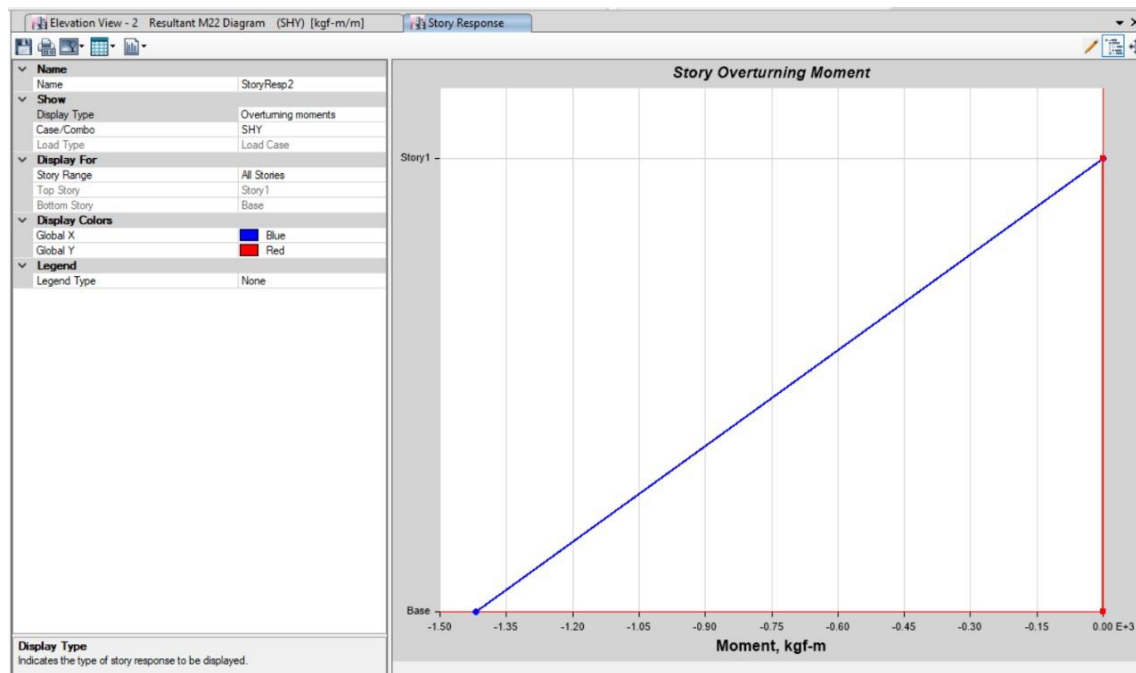


- Gráfica de cortes de piso en el sistema



Continuación apéndice 11.

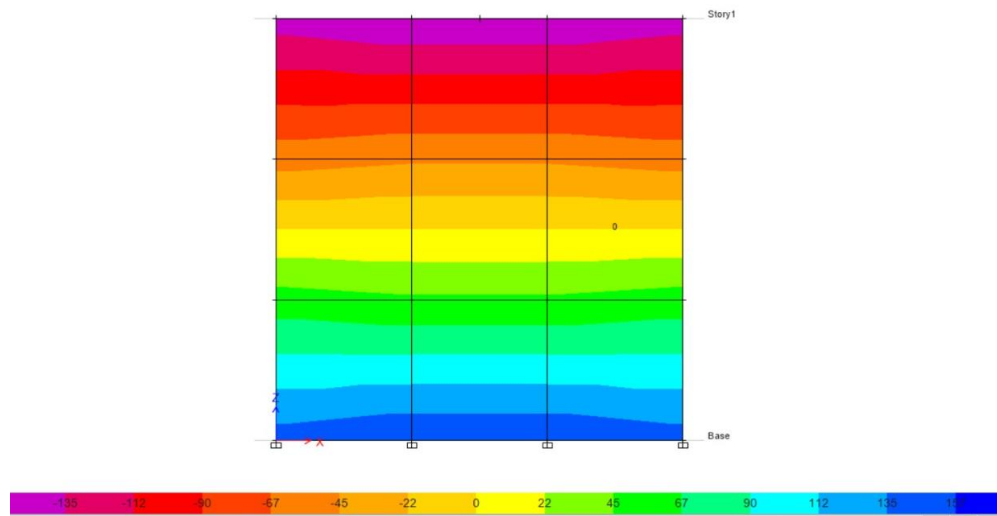
- Gráfica de momentos de volteo



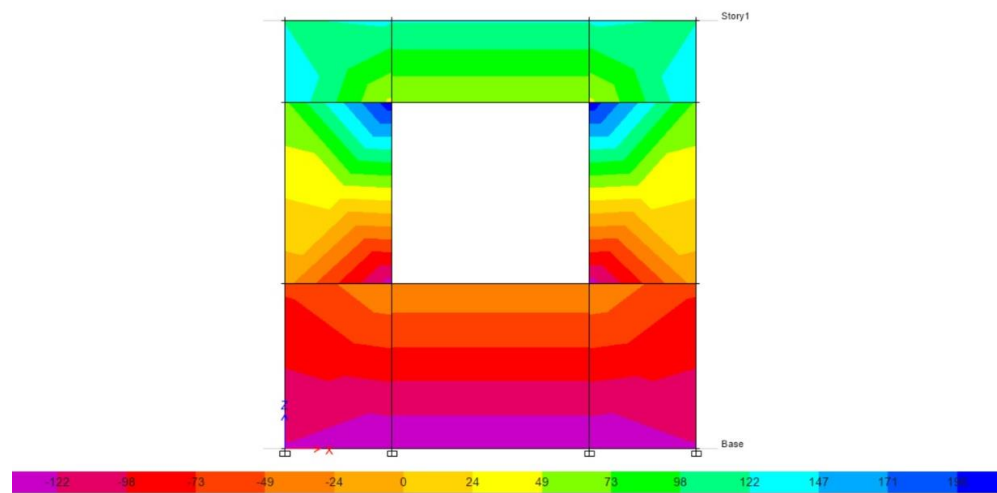
Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

Apéndice 12. **Diagrama de momentos finales en el sistema bajo carga por sismo**

- Momentos finales en el muro sólido B-D



- Momentos finales en el muro con abertura A-C



Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

Apéndice 13. **Proceso de colocación de placas de arriostramiento en el sistema con muros reforzados**

- Ajuste de placas rígidas en el sistema



Continuación apéndice 13.

- Perforación de losa para colocación de pernos para anclaje en placas biela



Continuación apéndice 13.

- Placa rígida total anclada a sistema



- Placa biela anclada al sistema



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.



Apéndice 14. **Efectos físicos en el nudo losa-solera del sistema de muros reforzados por aplicación de carga dinámica**

- Detalle de armado en el nudo losa-solera A después del ensayo



- Detalle de armado en el nudo losa-solera B después del ensayo



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 15. **Preparación de metodología de ensayo y colocación de placas en el sistema con muros revestidos con poliestireno expandido**

- Preparación de sistema de fuerza lateral



Continuación apéndice 15.

- Colocación de placas biela



- Colocación de placas rígidas totales



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.

Apéndice 16. **Efectos físicos en el sistema con muros revestidos de poliestireno expandido por aplicación de carga lateral**

- Deriva en el muro debida a carga lateral



Continuación apéndice 16.

- Levantamiento milimétrico debido a rigidización de nudos y aplicación de carga lateral en el sistema de muros revestidos con poliestireno expandido



Fuente: [Fotografía de Telma Cermeño]. (CII, USAC, Guatemala. 2021). Colección particular.  
Guatemala.

