



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

MODELACIÓN DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO DEL TIPO BANDERA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE BEAM-TRUSS MODEL DE OPENSEES

Memoria de Título presentada por

Esteban Orlando Torres Valdebenito

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Claudio Sepúlveda

Agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Modelación de muros de hormigón armado del tipo bandera mediante la utilización de beam-truss model de OpenSees

Nombre del candidato(a): Esteban Orlando Torres Valdebenito

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín; **Departamento:** Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Sepúlveda, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 31-07-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31-07-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia: a mi papá José Torres, a mi mamá Magdalena Valdebenito y a mi hermana Estrella Torres, quienes me han apoyado toda la vida y me han enseñado a ser una persona con valores y que se debe esforzar para conseguir las cosas.

Agradezco también a mis amigos de la Universidad, con quienes compartí seis años intensos llenos de aprendizaje, desafíos, frustración, pero también muchas risas y alegrías. Hago una mención especial a mi amigo Tommy Fernández, con quien trabajé durante toda la carrera. Empezamos como desconocidos y terminamos siendo más una familia.

Quiero también agradecer a mis amigos de estudio y carrete (más carrete): Manuel Inostroza, Fabián Villa, Ricardo Álvarez, Esteban Tapia y Constanza Corday. Gracias por los buenos momentos, por el apoyo, las conversaciones y por hacer esta etapa bastante entretenida.

Un agradecimiento especial a mi polola, Catalina Ulloa, por su apoyo incondicional, por estar siempre ahí, por animarme y siempre motivarme a ser mejor.

También quiero agradecer a mi profesor guía, Claudio Sepúlveda, por su constante disposición, por responder mis dudas, incluso los fines de semana, y por siempre querer ayudarme.

Finalmente, un último agradecimiento a las personas que me tope durante esta etapa y me dieron palabras de ánimo o que me hicieron feliz con algún gesto. Aunque quizás no lo sepan, fueron parte de este camino.

Muchas gracias a todos.



Índice

Introducción	1
1 Marco Teórico	2
1.1 Antecedentes de investigación.....	2
1.2 Muros de Hormigón Armado tipo Bandera	2
1.3 Normativa en Chile	2
1.4 Ensayos con cargas cíclicas.....	2
1.5 Análisis lineal	3
1.6 Análisis no-lineal	3
2 Objetivos	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivo Específicos	3
3 Criterios de Modelación	3
3.1 Recopilación de geometría de muestras experimentales	3
3.2 Materiales aplicados en los modelos.	4
3.2.1 Hormigón	4
3.2.2 Acero.....	5
3.3 Elementos aplicados en los modelos.....	6
3.3.1 Elementos viga-columna.....	6
3.3.2 Elemento Truss	6
3.4 Secciones aplicadas en los modelos.....	6
3.4.1 Secciones para elementos verticales y horizontales tipo viga-columna.....	6
3.4.2 Secciones para elementos tipo truss.....	7
4 Validación numérica en base a resultados experimentales	8
4.1 Modelación muros experimentales en STKO	8
4.1.1 Discretización geométrica, de elementos y de secciones.	8
4.1.2 Parámetros de hormigón y acero utilizados.....	11
4.1.3 Cargas aplicadas y apoyos.....	12
4.2 Comparación entre resultados experimentales y modelos numéricos	14
4.2.1 Pushover Cíclico	14
4.2.2 Deformaciones unitarias de los muros	19
5 Análisis muros a escala real.....	28
5.1 Geometría y disposición general de los elementos	28
5.1.1 Parámetros de hormigón y acero utilizados, cargas aplicadas y apoyos.	30
5.2 Resultados modelos numéricos.....	32
5.2.1 Pushover Cíclico	32
5.2.2 Deformaciones unitarias de los muros	34



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

6	Conclusiones.....	39
7	Referencias	40
8	Anexo	41
8.1	Ubicación y secciones de muros experimentales modelados.....	41
8.1.1	Muro 1.....	41
8.1.2	Muro 2.....	46
8.1.3	Muro 3.....	54
8.2	Ubicación y secciones de muros a escala real modelados	61
8.2.1	Muro 1.1	61
8.2.2	Muro 2.2.....	67
8.2.3	Muro 2.3.....	74



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

MODELACIÓN DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO DEL TIPO BANDERA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE BEAM-TRUSS MODEL DE OPENSEES

Esteban Torres V.¹, Claudio Sepúlveda²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Introducción

Chile es un país altamente sísmico, el cual está expuesto a terremotos de gran magnitud con relativa frecuencia. El último de ellos en el año 2010, localizado en la región del Maule, el cual alcanzó una magnitud de 8.8 Mw. Durante este evento sísmico, se observó que los muros de hormigón armado del tipo bandera fueron de los que más fallaron (Wallace et al., 2012), en edificios medianamente altos (entre 15 y 25 pisos), lo que resultó en daños significativos en las bases de estos elementos.

Los muros de tipo bandera se caracterizan por presentar una irregularidad vertical en su base, lo que resulta en dimensiones reducidas en los primeros pisos. Dicha irregularidad se genera debido a requerimientos arquitectónicos de los proyectos en Chile, orientados para dejar espacios a estacionamientos, fachadas o niveles subterráneos. Sin embargo, el diseño de estos muros aún no está normado en Chile. Esto se debe a que la normativa chilena vigente para edificios de hormigón armado se basa principalmente en la norma ACI 318. (2008) de EE. UU. Dicha norma no considera explícitamente geometrías con discontinuidad en la base del muro. Por consiguiente, el diseño de muros bandera queda totalmente a criterio del ingeniero civil a cargo o, en su defecto, a la propuesta en la oficina de cálculo. Por lo anterior, surge la necesidad de comprender en mejor medida el comportamiento de los muros de hormigón armado del tipo bandera, y establecer lineamientos para su modelación adecuada.

1 Marco Teórico

1.1 Antecedentes de investigación

En el ámbito internacional, los muros tipo bandera no son comunes; esta configuración es más bien una particularidad del contexto nacional, lo que resulta en una escasez de estudios sobre este tema fuera del país. Sin embargo, existen investigaciones sobre muros con aberturas localizadas. Por ejemplo, Morsy & Ibrahim (2019) exploran el comportamiento de estos muros utilizando un enfoque de elementos finitos, mientras que Wallace (1998) investiga el diseño de muros esbeltos con aberturas en los extremos de la base. En Chile, se han realizado estudios específicos sobre muros tipo bandera. Massone et al. (2017) identificaron que estos muros tienden a entrar en el rango no lineal ante deformaciones menores comparadas con muros en voladizo del mismo largo. Además, realizaron la única investigación experimental en colaboración con estudiantes de maestría en los laboratorios de la Universidad de Chile, donde ensayaron probetas con la geometría de los muros bandera. Los resultados indicaron que estos muros poseen una resistencia máxima similar, pero muestran mayor degradación de resistencia cíclica y de deformación, lo que provoca que fallen prematuramente en comparación con muros rectangulares (Massone et al., 2019; Díaz., 2016). Adicionalmente, se han llevado a cabo estudios en los que estos muros se modelan con elementos finitos y modelos puntal-tensor, permitiendo analizar distintas configuraciones y geometrías, lo que ha contribuido a un mejor entendimiento de su respuesta cíclica (Massone, Manríquez, et al., 2019). La investigación de Caballero & Gallo (2019) también reafirma que los muros tipo bandera tienen una menor capacidad de deformación en comparación con los muros sin discontinuidad. Si bien estos estudios previos han llevado a cabo sus investigaciones utilizando modelos de elementos finitos o puntal-tensor, la presente investigación explora el uso de la metodología beam-truss model como una alternativa para el análisis del comportamiento no lineal de muros tipo bandera bajo carga cíclica.

1.2 Muros de Hormigón Armado tipo Bandera

Los muros tipo bandera se caracterizan por presentar una discontinuidad en los primeros pisos debido a la reducción de su longitud, característica que les confiere la forma que les da su nombre. Cuya geometría responde principalmente a los requerimientos arquitectónicos que plantean hoy en día las ciudades de nuestro país. No obstante, esta configuración conlleva inconvenientes en cuanto a la degradación de resistencia y la capacidad de deformación que pueden alcanzar. Por ello, un diseño inadecuado puede resultar en fallas no deseadas (Wallace et al., 2012), tal como se observó luego del terremoto de 2010 en Chile.

1.3 Normativa en Chile

Actualmente no existe una normativa específica en nuestro país para el diseño de los muros bandera. Esto se debe a que la normativa estructural chilena se basa en códigos internacionales, principalmente el ACI 318. (2008). Esta configuración de muro no es común en dicho país y, por ende, no está normada en dicho código. Este vacío normativo subraya la importancia de profundizar en la comprensión de su comportamiento ante distintas sollicitaciones, lo cual es un paso fundamental para el eventual desarrollo de futuras directrices de diseño.

1.4 Ensayos con cargas cíclicas

Los ensayos con cargas cíclicas son aquellos en los que se impone un patrón determinado de desplazamiento cíclico a un elemento o sistema estructural, generalmente de forma creciente, para simular el comportamiento que podría tener el espécimen al ser sometido a cargas sísmicas. Estos ensayos son de suma importancia, ya que permiten conocer mejor la resistencia, degradación y ductilidad de las estructuras, permitiendo así calibrar modelos numéricos, como el realizado por Díaz (2016).

1.5 Análisis lineal

El análisis lineal en el campo de la Ingeniería Civil busca simplificar el análisis y el diseño de estructuras. Mediante el uso de factores de reducción de fuerzas, se puede utilizar un modelo lineal para determinar solicitaciones de diseño en sistemas no-lineales (Beer & Russell Johnston., 2013). Esta simplificación se basa en la suposición de que las solicitaciones en el sistema no-lineal se distribuirán de manera similar a como serían en el modelo lineal utilizado para el diseño.

1.6 Análisis no-lineal

Al utilizar análisis no-lineal, la complejidad del comportamiento de las estructuras y materiales más allá del rango elástico se modela de forma explícita. Esto genera que la respuesta simulada represente una aproximación más cercana al comportamiento real que tendría el sistema ante cargas externas. Sin embargo, este tipo de análisis requiere una mayor comprensión del comportamiento de estos sistemas estructurales y un mayor tiempo de cómputo comparado con un análisis lineal. No obstante, en los últimos años, cada vez se avanza más en la realización de metodologías para el desarrollo del análisis no lineal, como lo puede ser Beam-Truss Model (BTM) de OpenSees, el cual ya ha demostrado que puede modelar de manera correcta el comportamiento no lineal de las estructuras como muros y losas (Zhang et al., 2017; Álvarez et al. 2020; Godínez et al., 2024)

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la capacidad de la metodología Beam-Truss Model para representar el comportamiento sísmico de muros de hormigón armado del tipo bandera.

2.2 Objetivo Específicos

1. Validar Beam-Truss Model comparándolo con estudio experimental de muros bandera a escala reducida.
2. Analizar el comportamiento de muros tipo bandera con geometrías asociadas a proyectos reales.

3 Criterios de Modelación

3.1 Recopilación de geometría de muestras experimentales

A continuación, se presentan los datos recopilados de Massone et al. (2019) y Díaz (2016), correspondientes a las probetas experimentales ensayadas. Cabe destacar que se consideran únicamente los muros 1, 2 y 3, descartándose el muro 4 debido al tipo de falla que presentó durante su ensayo.

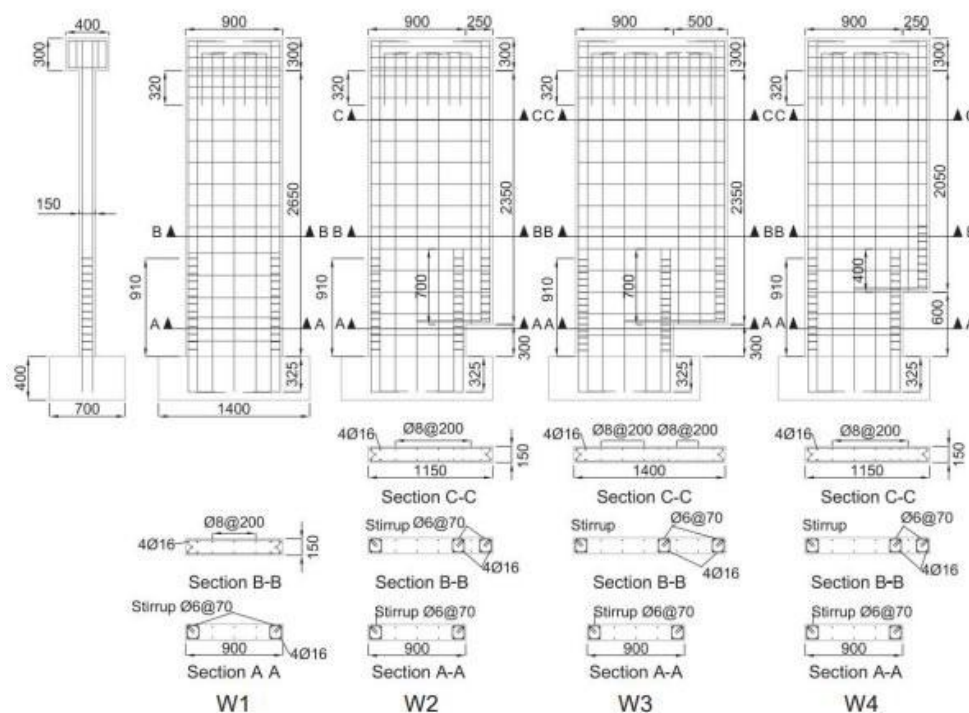


Figura 1. Geometría y distribución de acero de refuerzo para los muros ensayados

FUENTE. Massone et al. (2019)

3.2 Materiales aplicados en los modelos.

Los materiales utilizados para representar tanto el hormigón como el acero corresponden a modelos constitutivos uniaxiales, cuyas curvas esfuerzo-deformación se asemejan a las empleadas por Díaz (2016). Estos modelos constitutivos se encuentran implementados en STKO, una interfaz gráfica utilizada para la creación de modelos enfocados en análisis estructural que emplea OpenSees como motor de cálculo.

3.2.1 Hormigón

El comportamiento del hormigón, tanto confinado como no confinado, en los modelos se describe mediante el modelo constitutivo uniaxial Concrete02 de OpenSees. Los parámetros de entrada para este modelo se definen a continuación:

uniaxialMaterial Concrete02 \$matTag \$fpc \$epsc0 \$fpcu \$epsU \$lambda \$ft \$Ets

- matTag: Identificador del material
- fpc: Resistencia máxima a compresión del concreto
- epsc0: Deformación unitaria a compresión a resistencia máxima
- fpcu: Resistencia al aplastamiento
- epsU: Deformación unitaria al aplastamiento
- lambda: Relación entre la pendiente de descarga en la deformación de aplastamiento y la pendiente inicial
- ft: Resistencia a tracción del concreto
- Ets: Pendiente entre resistencia a tracción del hormigón y deformación última

Nota: Los parámetros asociados a la compresión se ingresan con valores negativos.

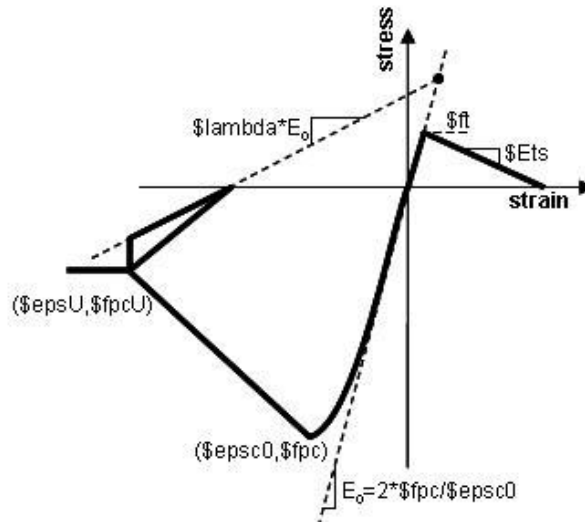


Figura 2. Concrete 02

3.2.2 Acero

El comportamiento del acero en los modelos se describe mediante el modelo constitutivo uniaxial SteelMPF de OpenSees. Los parámetros de entrada para este modelo son los siguientes:

uniaxialMaterial SteelMPF \$matTag \$fyp \$fyn \$E0 \$bp \$bn \$R0 \$cR1 \$cR2

- matTag: Identificador del material
- fyp: Resistencia de fluencia a tracción del acero
- fyn: Resistencia de fluencia a compresión
- E0: Modulo tangencial inicial
- bp: Factor de endurecimiento por deformación en tracción
- bn: Factor de endurecimiento por deformación en compresión
- R0: Parámetro inicial de curvatura R (Valor recomendado 5)
- cR1: Parámetro de degradación de la curvatura (Valor recomendado 0.925)
- cR2: Parámetro de degradación de la curvatura (Valor recomendado 0.15)

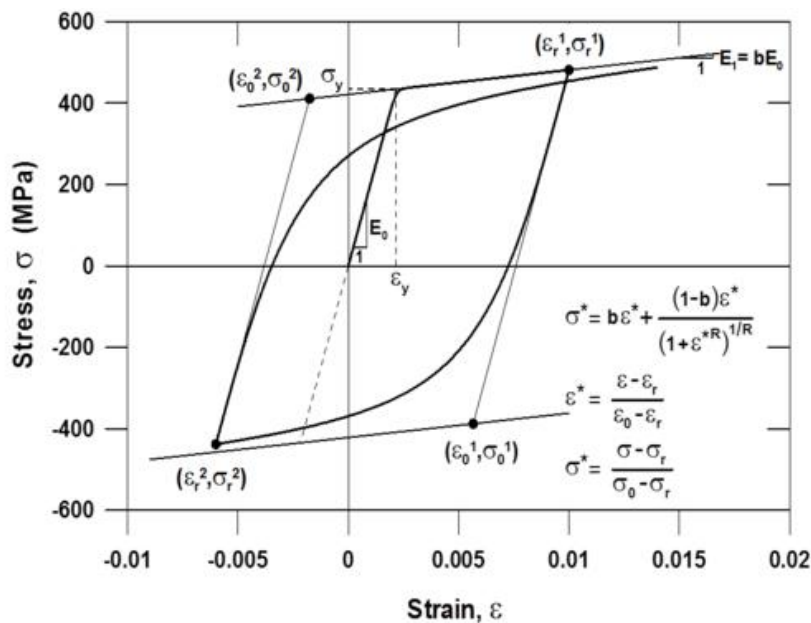


Figura 3. SteelMPF

3.3 Elementos aplicados en los modelos

Para llevar a cabo el análisis utilizando BTM, se aplican dos tipos de elementos fundamentales. El primero es el "Displacement-Based Beam-Column Element", el cual captura la respuesta axial y a flexión del muro, mediante el uso de una sección discretizada en fibras. El segundo corresponde al "Truss Element", empleado para simplificar el análisis del muro y para modelar la transferencia de fuerza cortante en su interior.

3.3.1 Elementos viga-columna

Los parámetros para definir un "Displacement-Based Beam-Column Element" en STKO son los siguientes:

- eleTag: Identificador del elemento
- iNode: Nodo inicial
- jNode: Nodo final
- numIntgrPts: Número de puntos de integración del elemento
- secTag: Identificador de la sección
- tranfTag: Método para cambiar desde las coordenadas locales a globales

3.3.2 Elemento Truss

Los parámetros para definir un "Truss Element" en STKO son los siguientes:

- eleTag: Identificador del elemento
- iNode: Nodo inicial
- jNode: Nodo final
- A: Área sección transversal
- matTag: Identificador del material

3.4 Secciones aplicadas en los modelos

3.4.1 Secciones para elementos verticales y horizontales tipo viga-columna

Las secciones utilizadas para representar los elementos viga-columna verticales son de tipo fibra, de acuerdo con las recomendaciones de Godínez et al. (2024). Para asegurar el correcto funcionamiento de los modelos y evitar problemas de convergencia, se incorporan "Dummy Fibers". Estas consisten en barras de refuerzo de 1 mm de diámetro, ubicadas en las secciones verticales del muro que no se encuentran en los bordes. Esto se debe a que la discretización adoptada para estas secciones solo considera rigidez fuera del plano, con el objetivo de no aportar rigidez adicional al modelo y evitar sobrestimar su resistencia.

Por otro lado, para los elementos horizontales, se aplica el mismo criterio de discretización de fibras que para los elementos que no se ubican en los bordes, con el fin de no aportar una resistencia adicional al muro. No obstante, estas secciones no incorporan los "Dummy Fibers", dado que el problema de inestabilidad numérica se resuelve al utilizarlos en los elementos verticales. A continuación, se ilustran ejemplos de una sección de borde y una sección dentro del muro con "Dummy Fibers" para elementos verticales, así como un ejemplo de sección para un elemento horizontal.

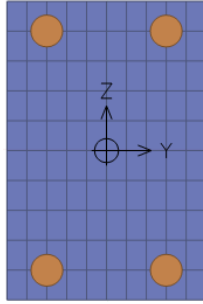


Figura 4. Sección vertical de borde

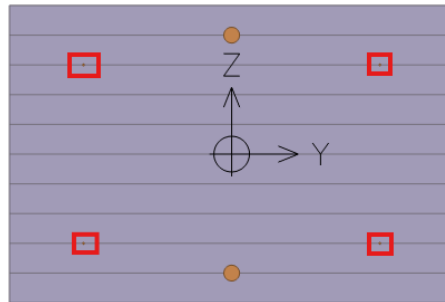


Figura 5. Sección vertical dentro del muro.

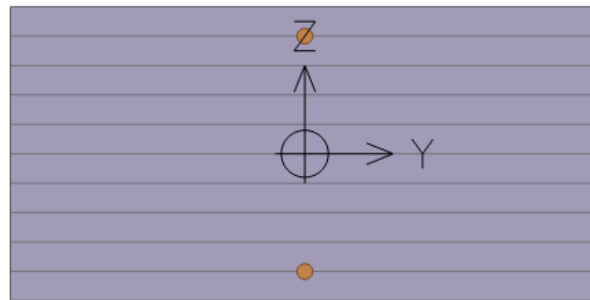


Figura 6. Sección horizontal

3.4.2 Secciones para elementos tipo truss

Las secciones truss o diagonales que se consideran son parte de la recomendación de Lu & Panagiotou (2014), quienes proponen la siguiente ecuación para calcular el ancho efectivo (b_{eff}) que deben poseer las secciones de los elementos truss:

$$b_{eff} = b * \cos(\theta_d) = a * \sin(\theta_d)$$

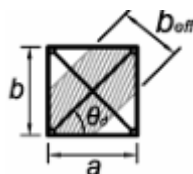


Figura 7. Elemento truss diagonal

Fuente. Adaptado de Lu & Panagiotou (2014)

Donde b_{eff} representa el ancho efectivo, calculado a partir de la distancia horizontal (a) o vertical (b) entre los nodos de un elemento. La sección en la diagonal se obtiene multiplicando este ancho efectivo por el ancho del muro.

4 Validación numérica en base a resultados experimentales

4.1 Modelación muros experimentales en STKO

4.1.1 Discretización geométrica, de elementos y de secciones.

En las siguientes figuras se muestra la discretización geométrica, de elementos y secciones tomada para modelar los muros experimentales utilizando la metodología beam-truss model.

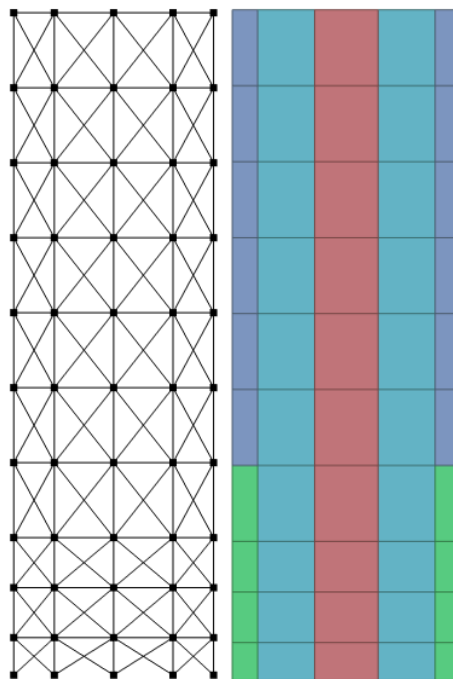


Figura 8. Discretización general y elementos verticales Muro 1

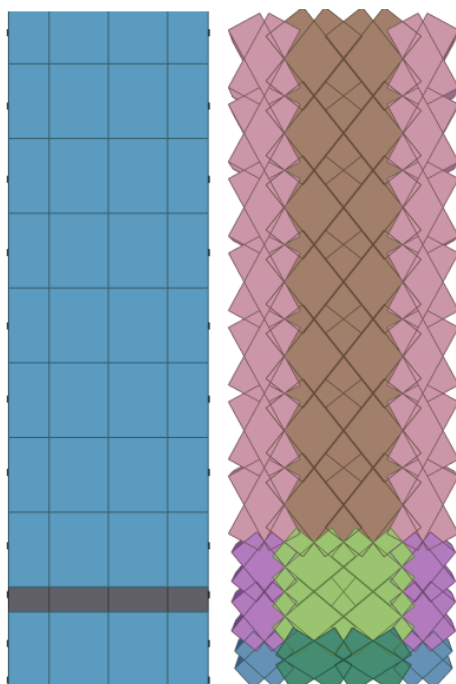


Figura 9. Discretización elementos horizontales y diagonales Muro 1

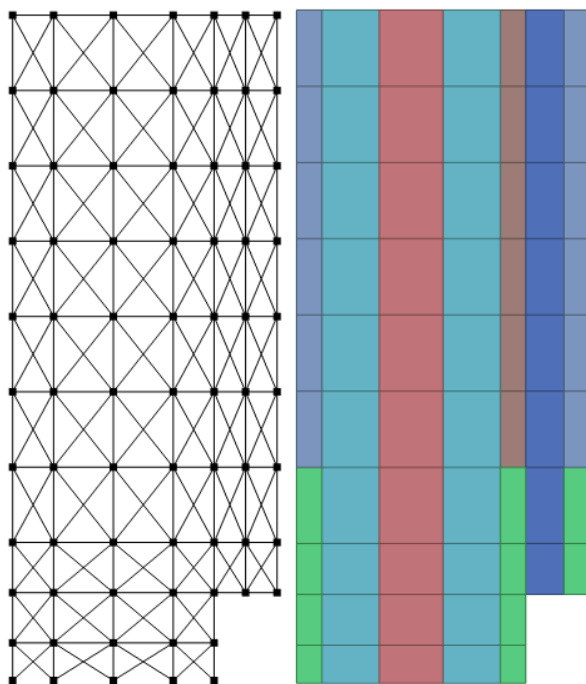


Figura 10. Discretización general y elementos verticales Muro 2

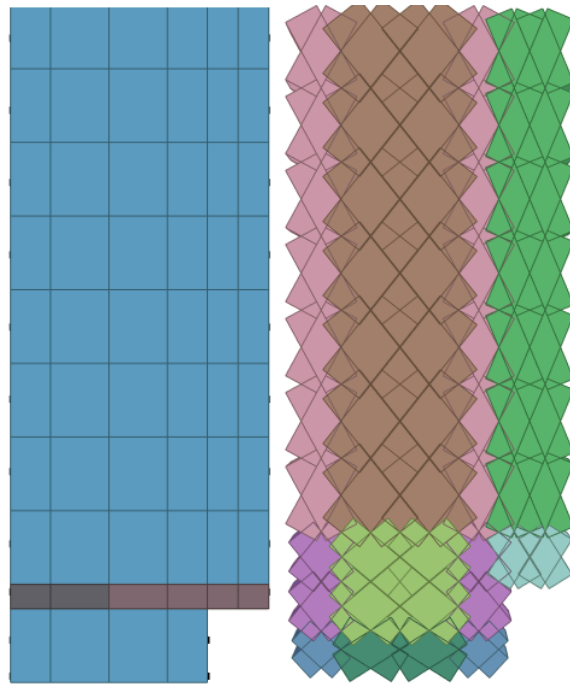


Figura 11. Discretización elementos horizontales y diagonales Muro 2

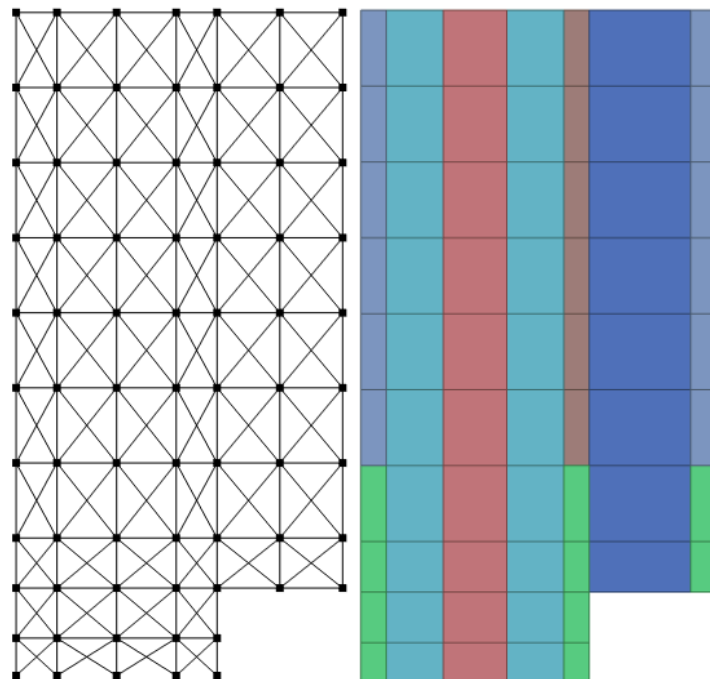


Figura 12. Discretización general y elementos verticales Muro 3

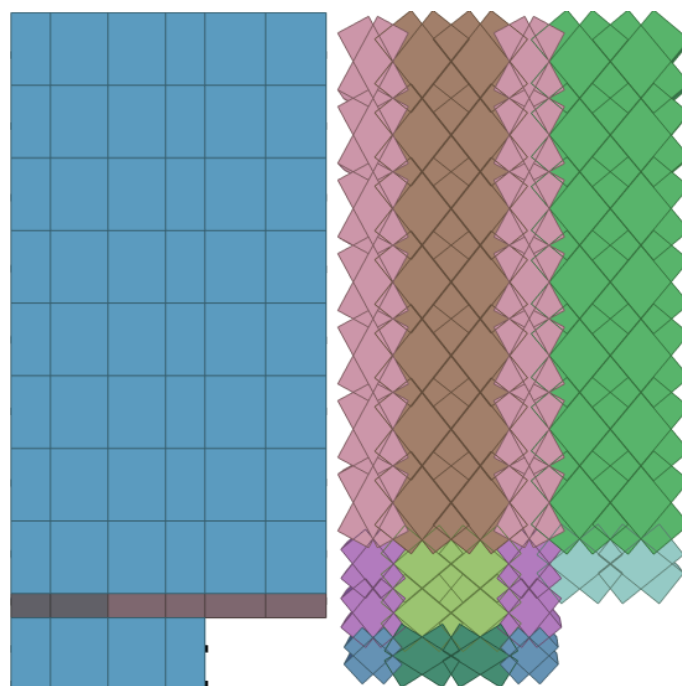


Figura 13. Discretización elementos horizontales y diagonales Muro 3

Como se muestra en las figuras anteriores, todos los muros presentan la misma distribución de elementos y secciones en la porción que corresponde a la configuración del muro 1, diferenciándose en las secciones donde se presenta la irregularidad tipo bandera. Por otro lado, cada color representa una sección distinta en los muros, las cuales se detallan en el Anexo 8.1 junto con sus respectivas ubicaciones. A su vez, es importante destacar que los elementos verticales de color verde son los únicos a los que se les asigna hormigón confinado, mientras que todos los demás elementos del muro (diagonales, verticales y horizontales) corresponden a hormigón no confinado. Finalmente, cabe señalar que todos los elementos horizontales y verticales son del tipo "Displacement-Based Beam-Column Element", y las diagonales corresponden a "Truss Element".

4.1.2 Parámetros de hormigón y acero utilizados.

En las siguientes tablas se presentan los parámetros de los modelos constitutivos empleados para los materiales de los muros.

Tabla 1. Parámetros hormigón no confinado (Concrete 02)

Variables	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Unidad de medida
fpc	-33	-38.3	-38.3	MPa
epsc0	-0.002	-0.002	-0.002	-
fpcu	-7.66	-7.66	-7.66	MPa
epsU	-0.012	-0.012	-0.012	-
lambda	0.15	0.15	0.15	-
ft	1.92	1.92	1.92	MPa
Ets	384	384	384	MPa

Tabla 2. Parámetros hormigón confiando (Concrete 02)

Variables	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Unidad de medida
fpc	-38.28	-44.05	-44.05	MPa
epsc0	-0.007	-0.007	-0.007	-
fpcu	-13.21	-13.21	-13.21	MPa
epsU	-0.06	-0.06	-0.06	-
lambda	0.15	0.15	0.15	-
ft	1.92	1.92	1.92	MPa
Ets	384	384	384	MPa

Tabla 3. Parámetros acero de refuerzo (SteelMPF)

Variables	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Unidad de medida
fyp	495.9	495.9	495.9	MPa
fyn	495.9	495.9	495.9	MPa
bp	0.01	0.01	0.01	-
bn	0.01	0.01	0.01	-
R0	20	20	20	-
cR1	0.925	0.925	0.925	-
cR2	0.15	0.15	0.15	-
E0	198800	198800	198800	MPa

De acuerdo con los valores expuestos en las tablas anteriores, el único parámetro que varía en los modelos es la resistencia a compresión máxima del Muro 1, tanto para su hormigón confinado como no confinado. Esta variación se realiza según lo indicado por Massone et al. (2019). A excepción de esta particularidad, todos los demás parámetros de los materiales se mantienen constantes para todos los muros.

4.1.3 Cargas aplicadas y apoyos.

Las cargas aplicadas a los modelos computacionales fueron obtenidas directamente de Massone et al. (2019). El protocolo de carga cíclica aplicado al muro se basa directamente en el utilizado durante el ensayo experimental de referencia, el cual sigue el protocolo establecido por el ACI T1.1-01. El objetivo de este protocolo es que el muro alcance niveles de deriva (drifts) objetivos crecientes cada tres ciclos, correspondientes a 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.6%, 0.9%, 1.35%, 2%, 3%, 4% y 6%, tanto positiva como negativamente. Cabe aclarar que en los ciclos de drift positivos, la sección del muro sin discontinuidad (en el caso de los muros bandera) es la que se tracciona, por el contrario, en los ciclos de drift negativos, la sección con discontinuidad de bandera es la que experimenta la tracción. Esto con el objetivo de que el muro incurra en el rango no lineal de su comportamiento hasta alcanzar el fallo. El protocolo se ilustra en la Figura 14.

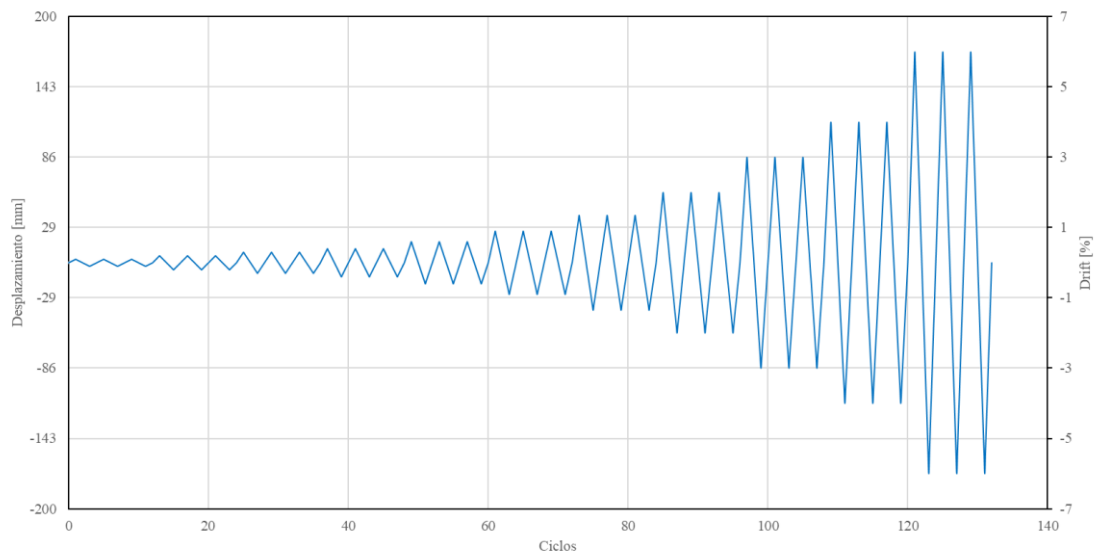


Figura 14. Protocolo de desplazamiento

Por otro lado, la carga axial aplicada a todos los muros se calculó como el $0.1 * f'_c * A_g$, siendo f'_c una resistencia a compresión de 25 MPa, y A_g es el área bruta calculada a partir de las dimensiones del muro rectangular (Muro 1). Con lo anterior, se obtuvo una carga axial aproximada de 36 tonf. La Figura 15 presenta los nodos de aplicación de las cargas unitarias laterales (asociadas al protocolo de carga) y los nodos donde se aplican las cargas axiales.

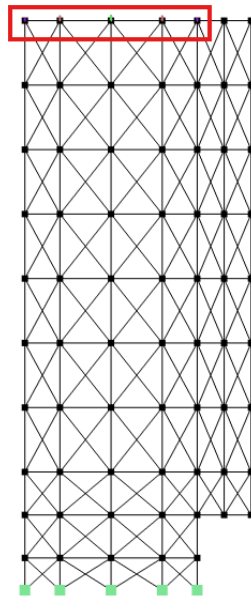


Figura 15. Nodos de aplicación de carga

Es importante destacar que las cargas se aplicaron en los mismos nodos para los tres muros modelados. Se debe considerar que la carga axial total se distribuye en todos los nodos de manera proporcional a la longitud de sus respectivas secciones. Esta distribución se muestra en la tabla 4, donde la carga central se aplica en el nodo central, la carga intermedia en ambos nodos intermedios y la carga extrema en ambos nodos extremos. Además, para todos los muros se consideran apoyos simples en la base, los cuales se visualizan de color verde en la Figura 15.

Tabla 4. Cargas axiales aplicadas

Carga central [kN]	Cargas intermedias [kN]	Cargas extremas [kN]
-101.442	-91.225	-40.544

4.2 Comparación entre resultados experimentales y modelos numéricos

4.2.1 Pushover Cíclico

Dado el protocolo de carga mencionado anteriormente, se les realiza un análisis cíclico a todos los muros de hormigón armado. Esto con el fin de obtener la curva de histéresis y compararla con los resultados experimentales de Massone et al. (2019). Las siguientes Figuras 16, 17 y 18 ilustran los resultados obtenidos de dicho análisis.

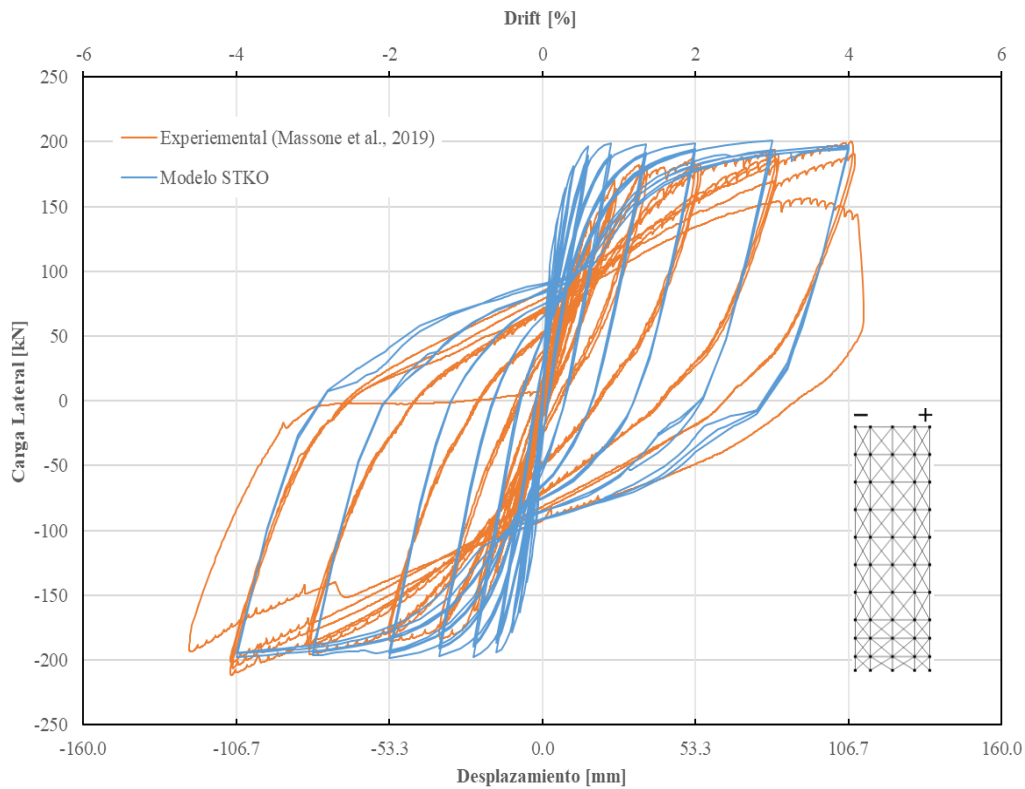


Figura 16. Pushover Cíclico Muro 1

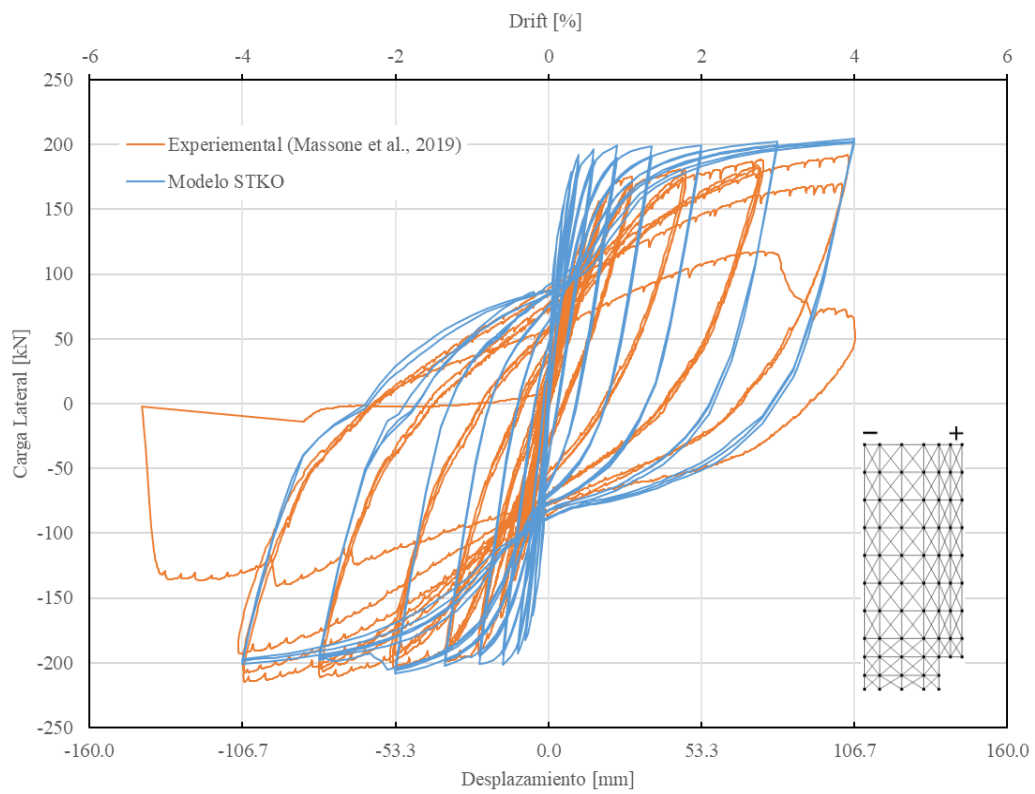


Figura 17. Pushover Cíclico Muro 2

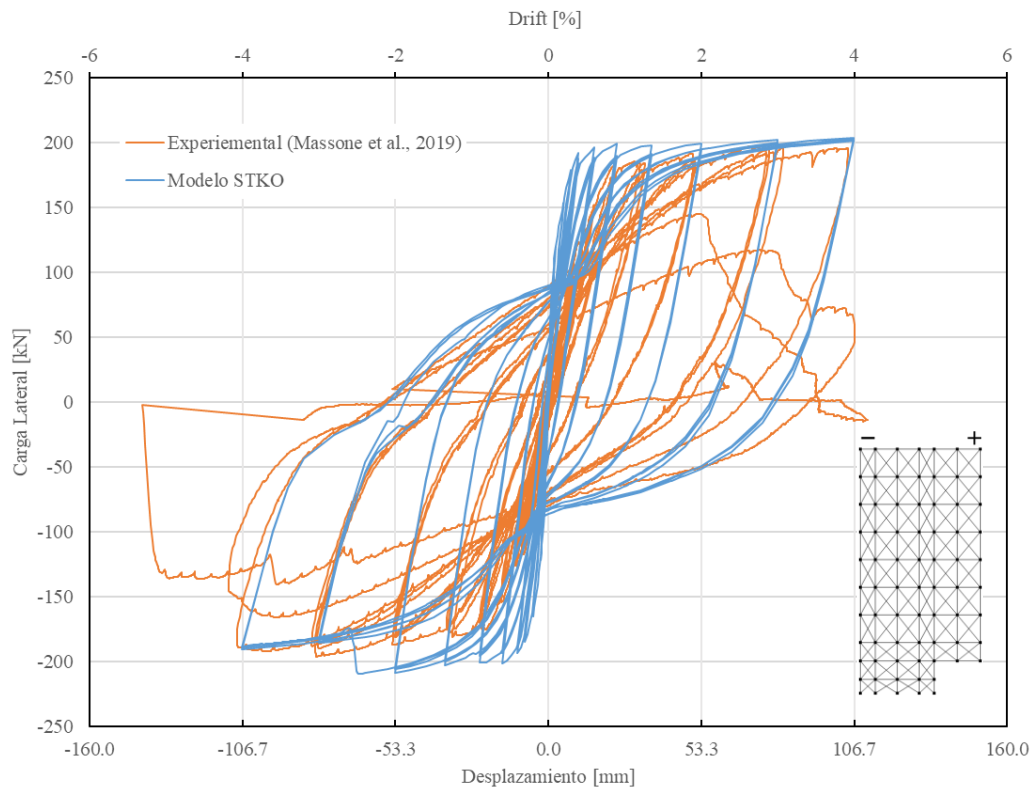


Figura 18. Pushover Cíclico Muro 3

Como se observa en los resultados, todos los modelos fueron capaces de capturar el comportamiento no lineal de los muros de hormigón armado. Alcanzando una carga lateral máxima de 200 kN y desplazamiento máximo en el tope de 106 mm para los 3 muros, hasta el nivel de drift objetivo del 4%. Además, se aprecia que tanto el muro 2 como el muro 3 presentan caídas en la resistencia lateral desde el drift del -2% al -3%, comportamiento que no se contempla en el muro 1 rectangular. Se observa también que los niveles de disipación de energía son similares, así como la ubicación del *pinching point*

Por otro lado, se observa que todos los muros modelados utilizando BTM poseen una rigidez inicial mayor que la de los resultados experimentales con los que se comparan, y su rigidez se degrada a una menor tasa. Sin embargo, esta diferencia es esperable debido a una suma de supuestos que podrían no ser tan acertados. Estos supuestos se describen en los siguientes puntos:

- El modelo asume base completamente empotrada, aun cuando en los ensayos, la base utilizada tiene cierta flexibilidad o incluso cierto levantamiento en un extremo si es que no está suficientemente bien anclada a la fundación de laboratorio.
- El modelo asume que existe adherencia perfecta entre el acero y el hormigón. Sin embargo, es sabido que este supuesto dista de ser adecuado cuando existen cambios de sección, como el encontrado en la unión muro-fundación. En cuyo caso, las barras embebidas en la fundación pueden tener cierto deslizamiento (*bond slip effect*).
- Además, en estas condiciones las deformaciones unitarias del refuerzo suelen penetrar dentro del largo embebido en la zapata (*strain penetrattion*), lo que aumenta aun más la diferencia con la suposición de refuerzo perfectamente adherido.

Todas estas deformaciones relativas en la base generan un giro de cuerpo rígido que aumenta la flexibilidad aparente del muro. Con el fin de intentar flexibilizar el modelo de forma equivalente, se buscó reducir la rigidez del sistema a través de la aplicación de un factor de reducción de área de 0.3 para los elementos Truss, propuesto por Ojeda & Sepúlveda (2020). Los resultados de esta modificación se presentan en las Figuras 19, 20 y 21.

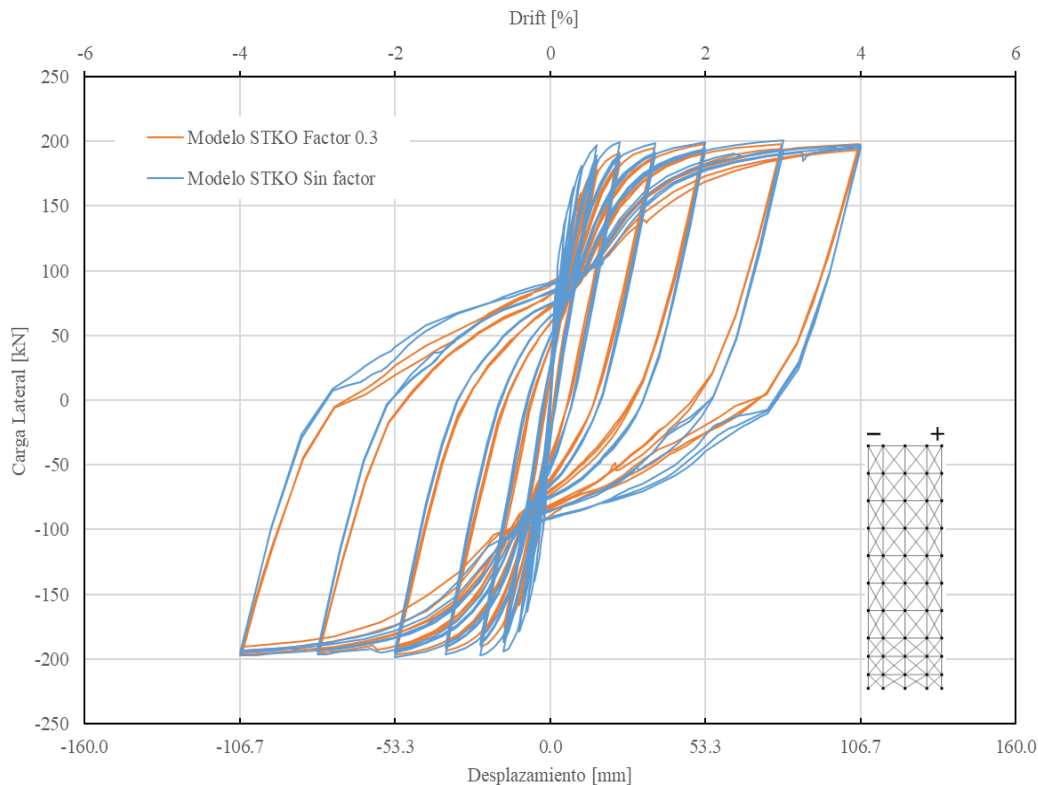


Figura 19. Comparación factor 0.3 Muro 1

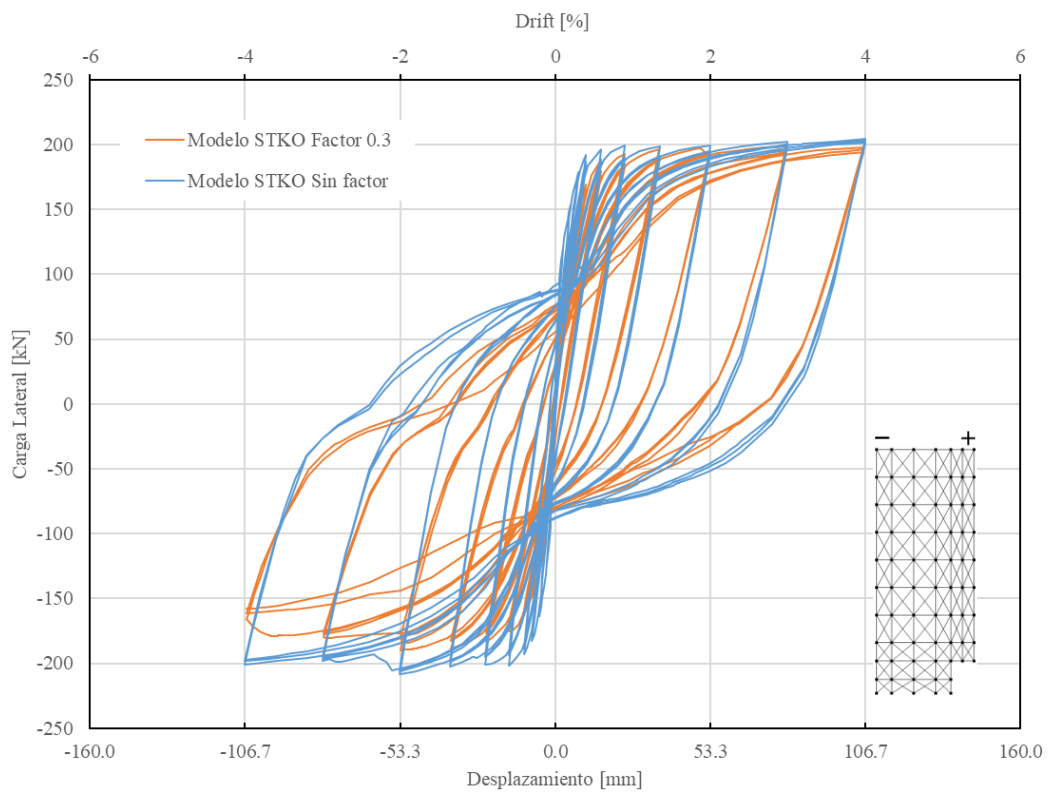


Figura 20. Comparación factor 0.3 Muro 2

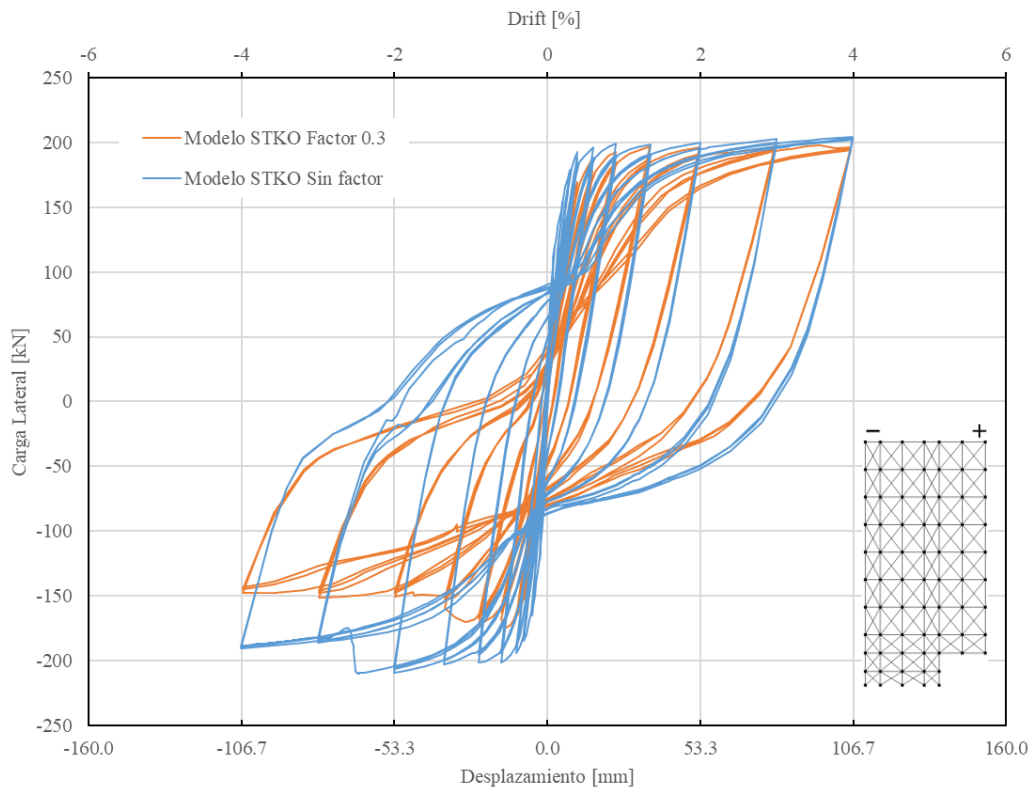


Figura 21. Comparación factor 0.3 Muro 3

Dado los resultados presentados en las Figuras 19, 20 y 21, se comprueba que la rigidez, resistencia, el efecto pinching o, en general, el comportamiento de los muros sí está asociado al área de las secciones de los elementos diagonales. Sin embargo, la rigidez inicial no presenta un cambio notable que justifique adoptar este factor como una regla general. Además, en los muros 2 y 3, la pérdida de rigidez y resistencia es notoria en los ciclos de drift negativos (Sección de la bandera traccionada), siendo este comportamiento inconsistente con los datos experimentales de los muros. Por esta razón, los análisis subsiguientes se realizaron sin la aplicación de dicho factor.

Nota: Este factor sí podría ser considerado para muros rectangulares, ya que, como se muestra en la Figura 22, los comportamientos numéricos y experimentales sí coinciden en mayor medida.

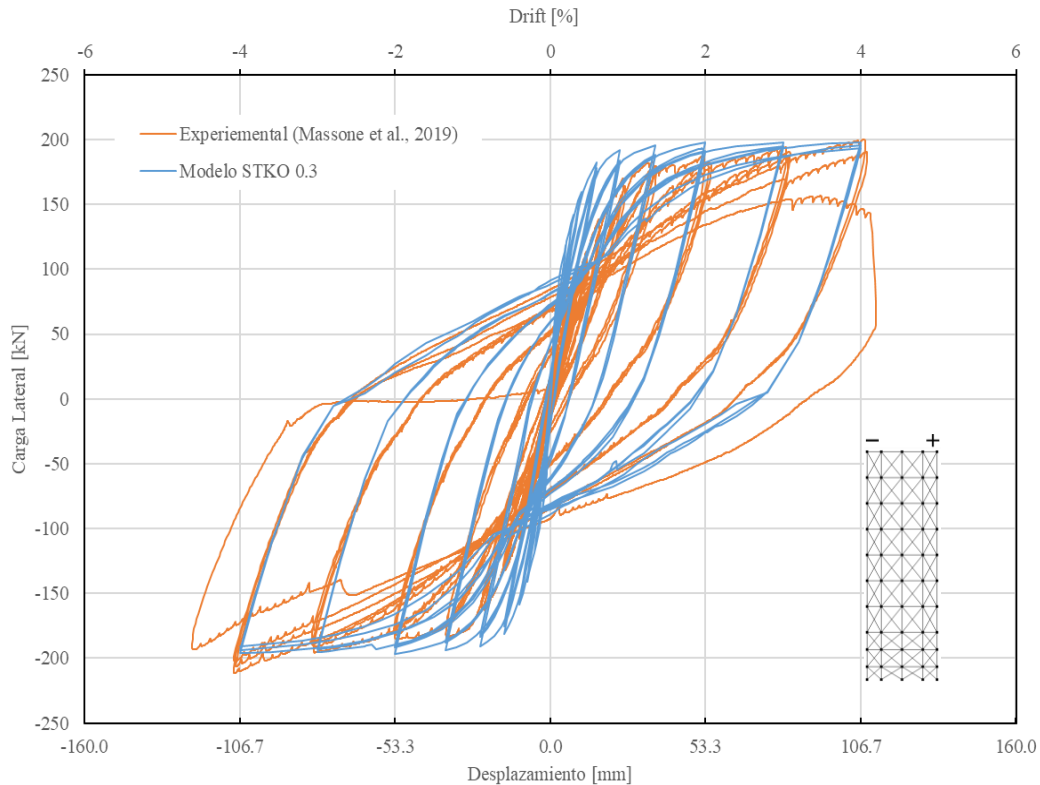


Figura 22. Pushover Cíclico Muro 1 (Factor 0.3)

Finalizando se presenta una comparación de la curva de histéresis de los tres muros analizados utilizando BTM en la Figura 23.

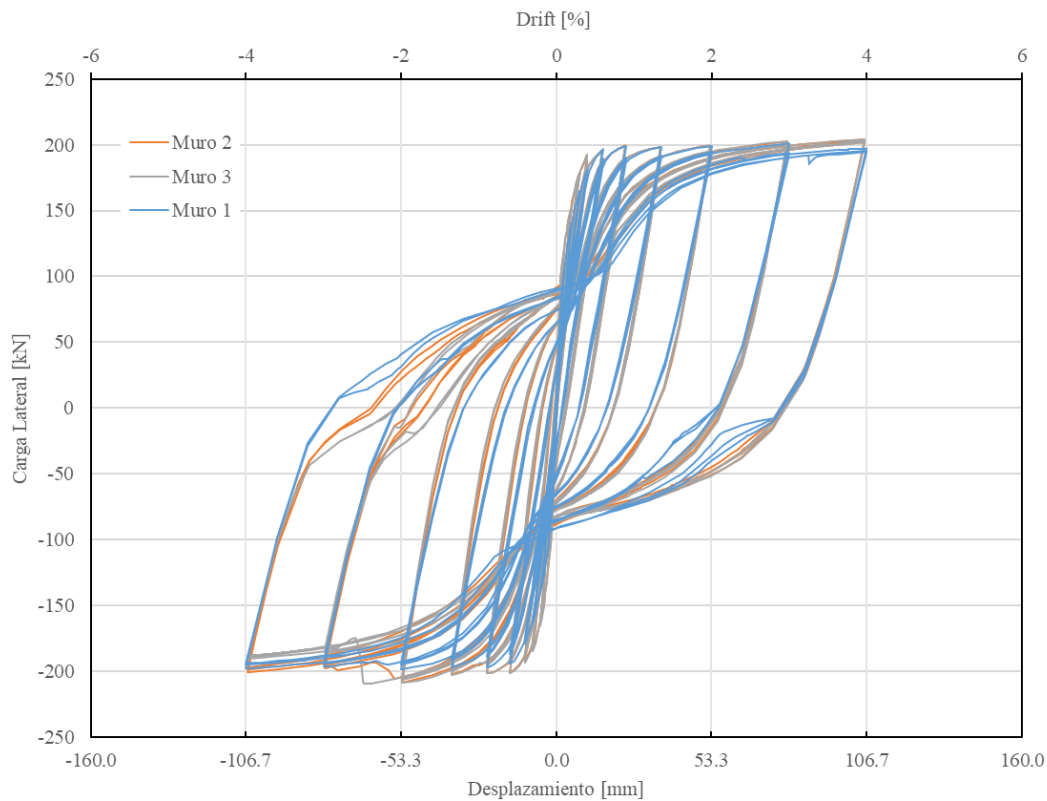


Figura 23. Pushover Cíclico Muro 1, 2 y 3 (BTM).

Lo principal a destacar de los resultados de la Figura 23 es la observación de cómo los muros bandera pierden rigidez y resistencia en los ciclos del 3% y 4%, siendo el Muro 3 el que presenta una mayor degradación. Esto es clave para comprender el impacto de la bandera en los muros, destacándose que, a mayor discontinuidad, mayor puede ser la pérdida de resistencia y rigidez del muro.

Además, lo anterior es crucial debido a que la metodología beam-truss model no fue capaz de capturar la pérdida de resistencia y rigidez tal como ocurrió experimentalmente. Esto está directamente relacionado con las simplificaciones inherentes del modelo y, posiblemente, a las propiedades de los materiales constitutivos que lo componen, ya que, el acero no es capaz de simular el pandeo de las barras de refuerzo. Debido a lo anterior, el análisis solo se realiza hasta los ciclos de drift del 4%, a pesar de que los modelos numéricos eran capaces de alcanzar niveles de drift más altos. Este comportamiento fue similar al observado en los modelos de ensayos experimentales realizados por Díaz (2016), quien utilizó una metodología FEM y realizó modelaciones tanto sin considerar el pandeo y considerándolo.

4.2.2 Deformaciones unitarias de los muros

En esta sección, se analizan los resultados de las deformaciones unitarias a lo largo y alto del muro. Estos resultados serán comparados con los datos experimentales previamente expuestos para los mismos muros ensayados.

La primera instancia de comparación consistirá en observar las deformaciones unitarias obtenidas mediante fotogrametría, contrastándolas con los datos derivados de los modelos numéricos. Esta comparación se realiza a niveles de drift del 2% y 3%, tanto en sus ciclos positivos como negativos. Las Figuras 24, 25 y 26 corresponden a los resultados de la fotogrametría, y las Figuras desde la 27 hasta la 32 a los resultados numéricos.

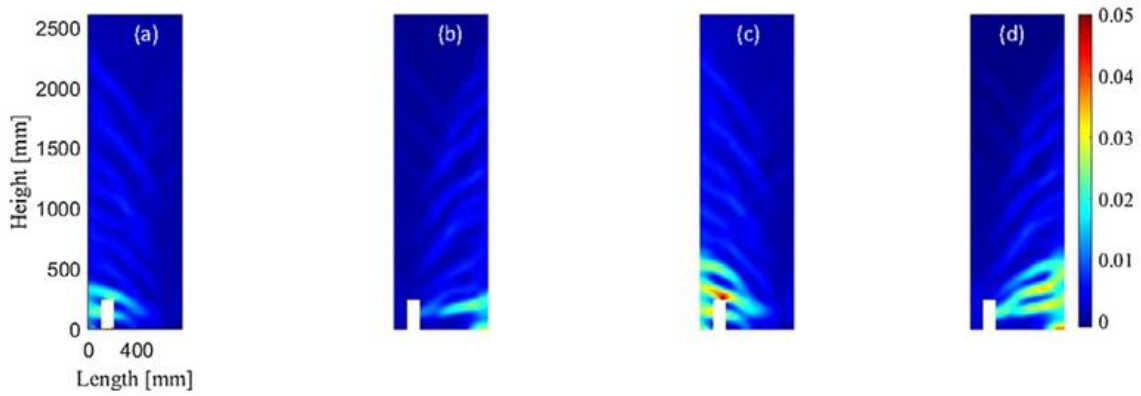


Figura 24. Strain principales para Muro 1 por fotogrametría – (a y b) 2% drift; (c y d) 3% drift

Fuente. (Massone et al., 2019)

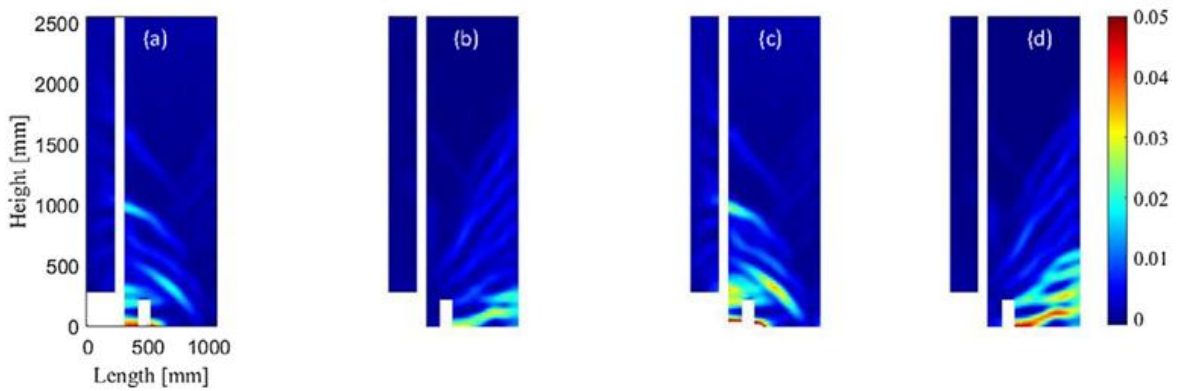


Figura 25. Strain principales para Muro 2 por fotogrametría – (a y b) 2% drift; (c y d) 3% drift

Fuente. (Massone et al., 2019)

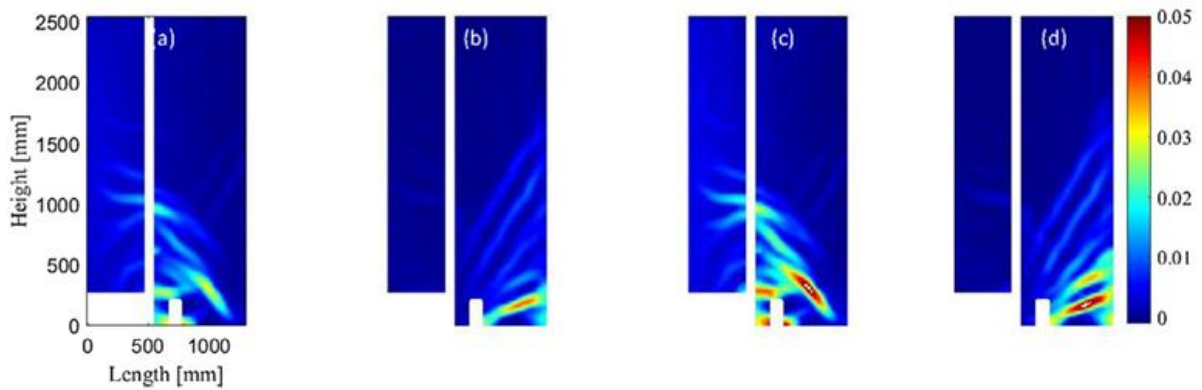


Figura 26. Strain principales para Muro 3 por fotogrametría – (a y b) 2% drift; (c y d) 3% drift

Fuente. (Massone et al., 2019)

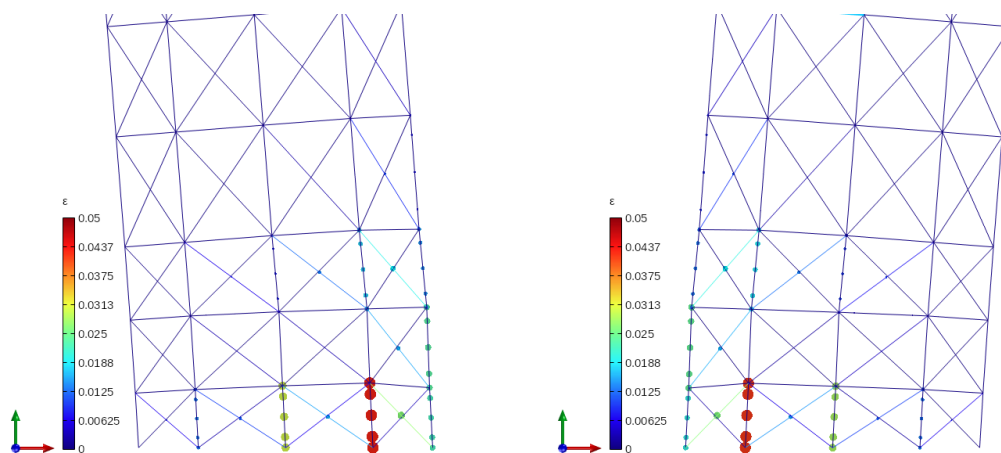


Figura 27. Drift negativo y positivo al 2% Muro 1

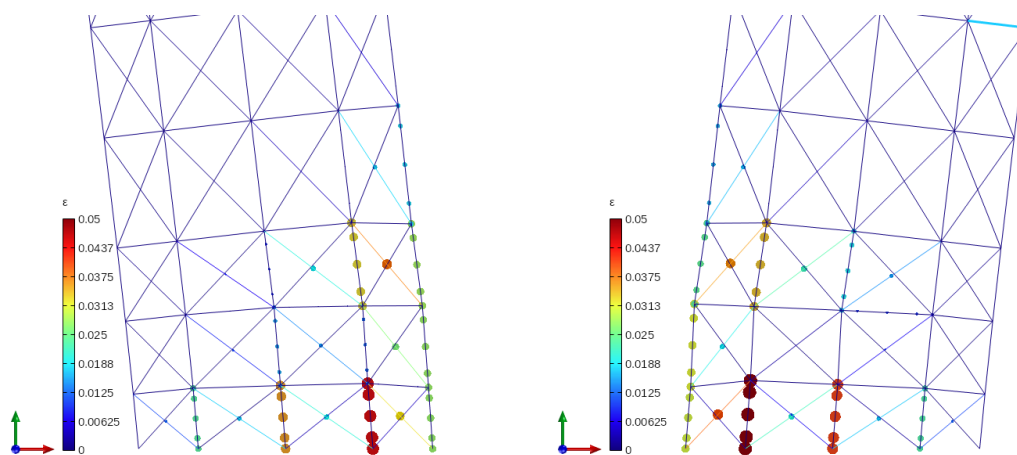


Figura 28. Drift negativo y positivo al 3% Muro 1

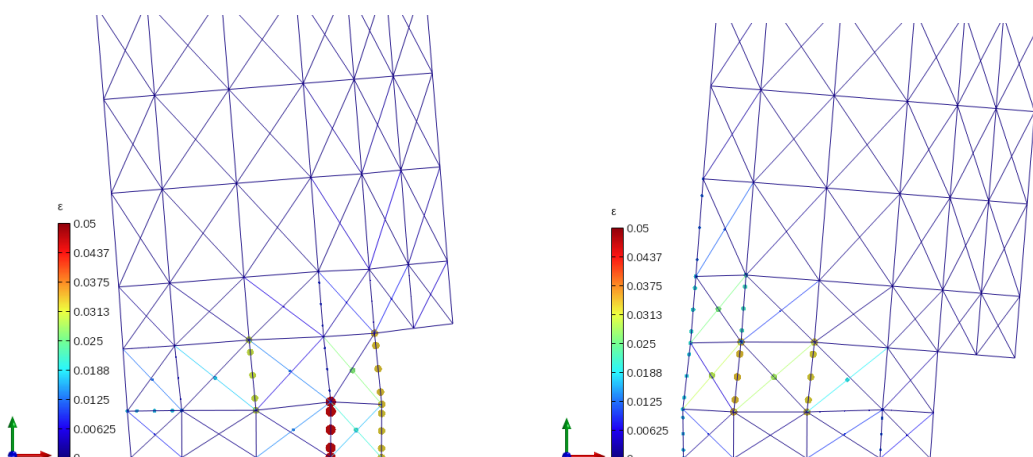


Figura 29. Drift negativo y positivo al 2% Muro 2

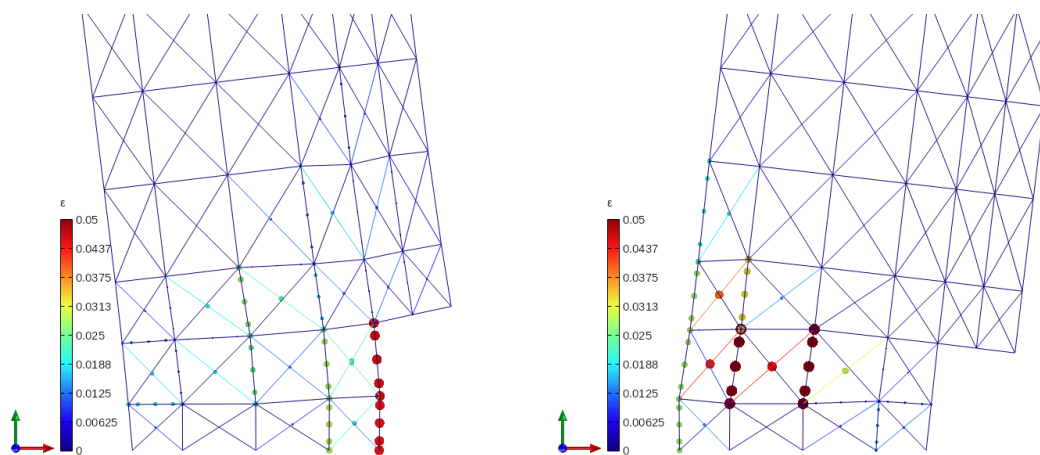


Figura 30. Drift negativo y positivo al 3% Muro 2

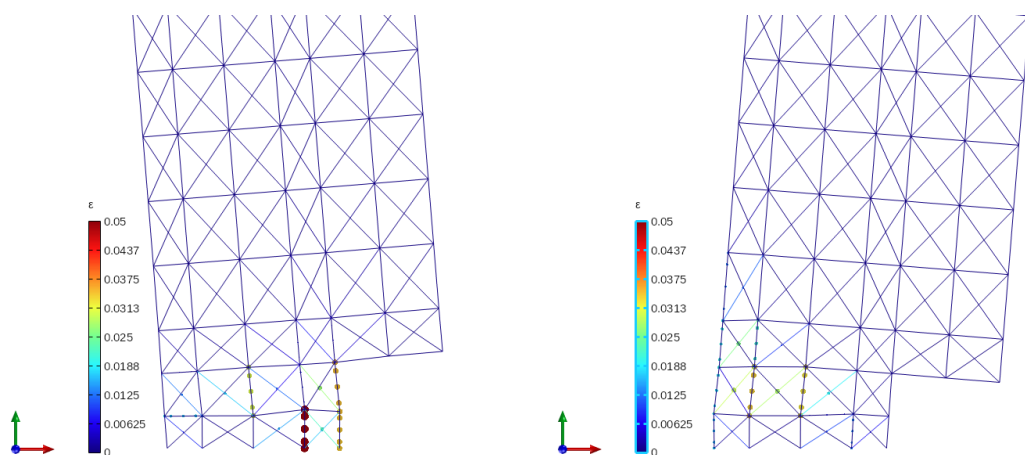


Figura 31. Drift negativo y positivo al 2% Muro 3

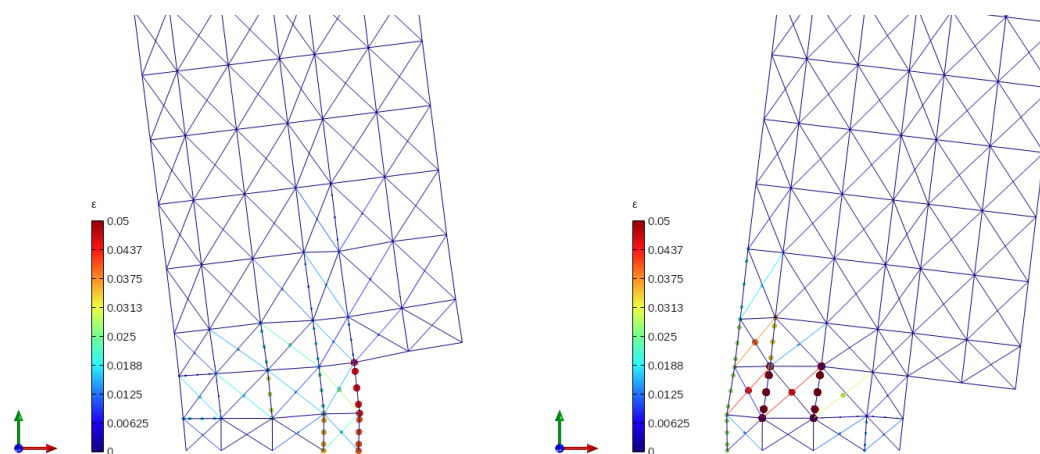


Figura 32. Drift negativo y positivo al 3% Muro 3

Al comparar los datos experimentales y numéricos, se observa inicialmente que BTM es capaz de replicar las concentraciones de deformaciones unitarias en las mismas ubicaciones que los datos experimentales. Se muestra en mayor detalle en la Figura 33.

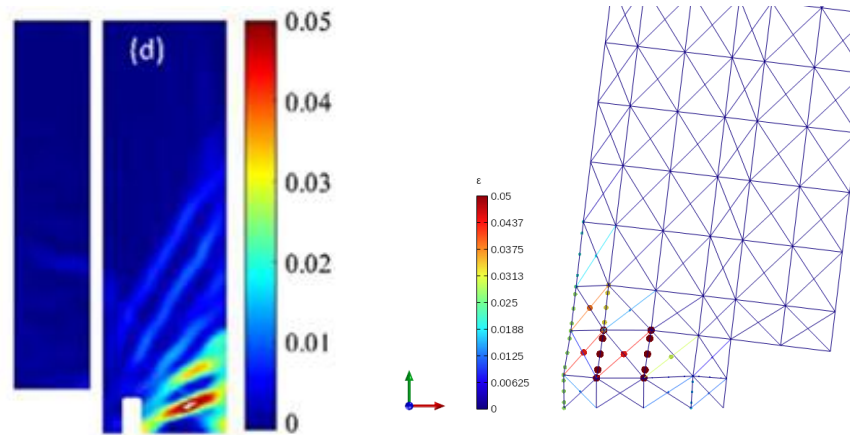


Figura 33. Comparación deformaciones unitarias drift 3% positivo Muro 3

Sin embargo, estas mediciones en los modelos numéricos discrepan levemente de los valores experimentales en ambos niveles de drift, tanto en los ciclos positivo y negativo. Este comportamiento se ve reflejado como una tendencia más adelante, al comparar las deformaciones unitarias a lo largo de la altura del muro, específicamente en los elementos de borde y en las deformaciones a lo largo del muro a distintas alturas de los muros. Para la comparación en la altura, se toma como referencia el Muro 1, y se analizan las deformaciones en los elementos de borde de los muros en distintos niveles de drift.

A continuación, las siguientes Figuras (34 a 36) se comparan las deformaciones unitarias en la altura de los muros entre los resultados experimentales y modelos numéricos.

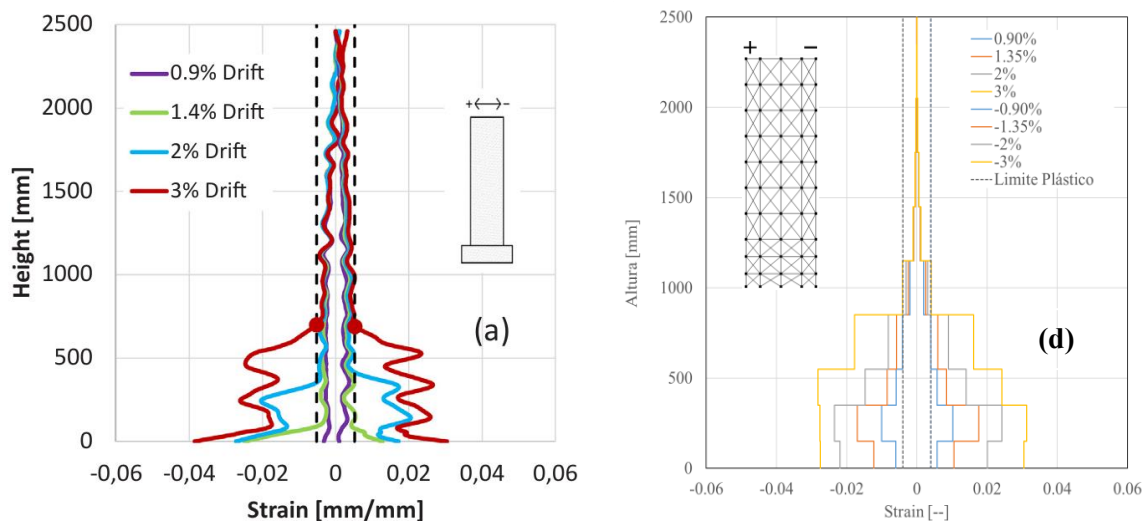


Figura 34. Deformaciones unitarias verticales en los extremos de los muros - (a) Muro 1 Experimental – (d) Muro 1 Modelo

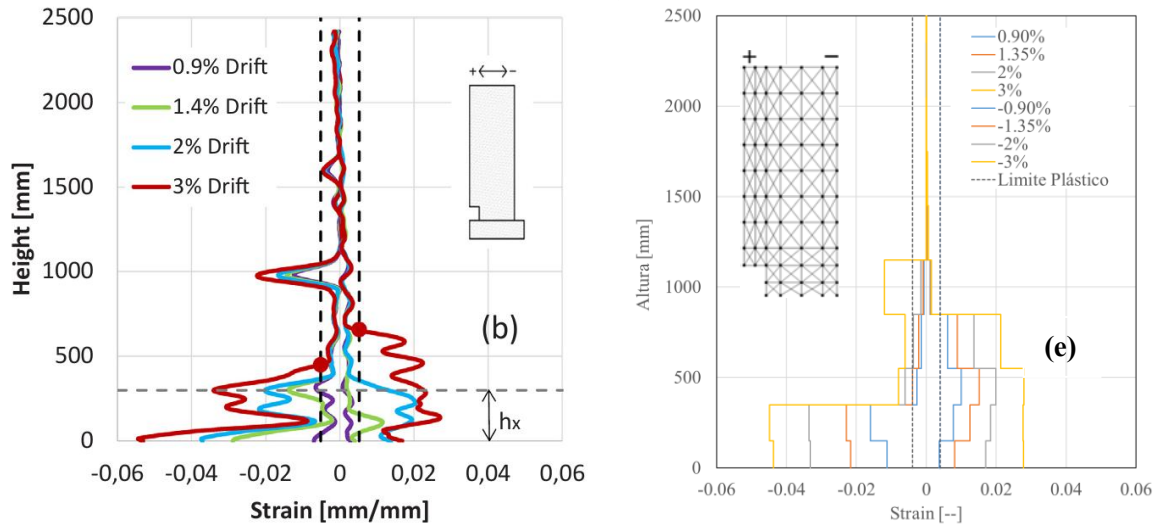


Figura 35. Deformaciones unitarias verticales en los extremos de los muros - (b) Muro 2 Experimental – (e) Muro 2 Modelo

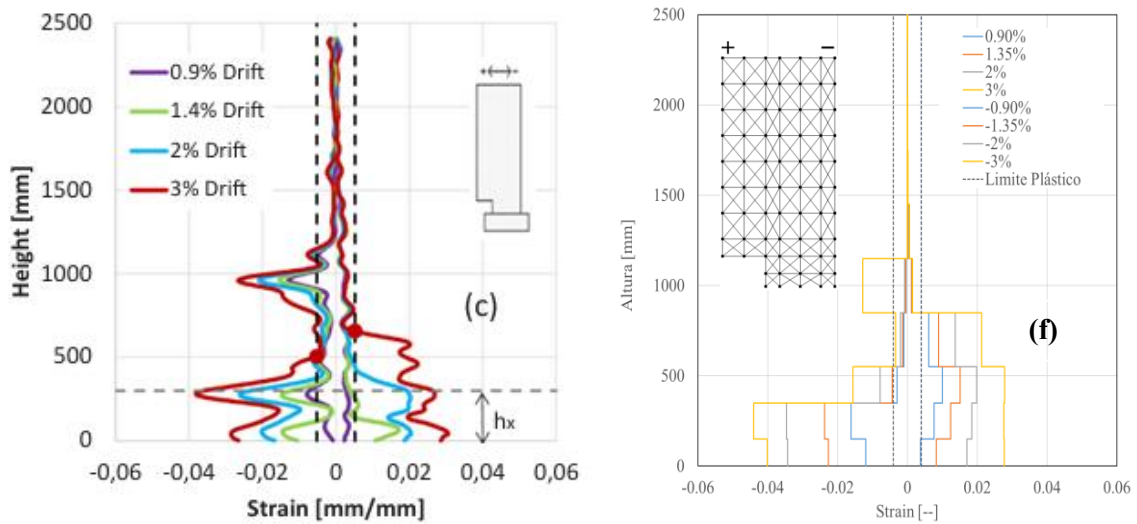


Figura 36. Deformaciones unitarias verticales en los extremos de los muros - (c) Muro 3 Experimental – (f) Muro 3 Modelo

A primera vista, los resultados tanto experimentales como numéricos coinciden en la distribución de las deformaciones unitarias a lo largo de la altura del muro. Si bien el modelo numérico presenta ciertas diferencias en la precisión numérica, atribuibles a la discretización utilizada y a las simplificaciones del modelo que se mencionan anteriormente, su desempeño es considerable dado la complejidad de simular fenómenos de respuesta local. El largo de los elementos verticales no permite que los resultados coincidan de manera idéntica con los datos experimentales en cada punto, debido a la gran “resolución” de elementos numéricos que se requeriría para esto. No obstante, el modelo demuestra su capacidad para capturar aspectos fundamentales del comportamiento. Por ejemplo, en el muro 1 (Figura 34) demuestra la capacidad de simular un comportamiento casi simétrico en los drift negativos y positivos, tal como ocurre experimentalmente. Por otro lado, el modelo es capaz de proyectar las concentraciones de deformaciones unitarias en la sección de la bandera para los muros 2 y 3 (Figuras 35 y 36) cuando estas secciones se traccionan. Asimismo, modela la concentración de deformaciones que ocurre a una altura aproximada de 1000 mm, a un nivel de drift del 3%, punto donde termina el confinamiento del muro.

Otro punto importante es que Massone et al. (2019), establece un límite plástico aproximado de 0.004 de deformación unitaria a tracción, lo que permite estimar la altura de plastificación del muro. Estos resultados también coinciden aproximadamente entre los datos experimentales y numéricos. Por ejemplo, para los muros rectangulares, la longitud de plastificación coincide en ambos extremos del muro aproximadamente a unos 800 mm de altura. En contraste, para los muros con discontinuidad, la longitud de plastificación es menor en la zona de la bandera, siendo a una altura aproximada de 500 mm, en comparación con el otro extremo sin cambio de altura donde se concentra a una altura de 800 mm nuevamente. Lo anterior indica claramente la concentración de esfuerzos en la zona discontinua.

A continuación, se presenta la comparación entre el perfil de deformaciones unitarias en la base de los muros. Esta se realiza entre los resultados numéricos de Diaz (2016), quien modeló los mismos muros experimentales mediante una metodología FEM, y los resultados numéricos obtenidos con BTM. Esta comparación se ilustra las Figuras 37 a la 41.

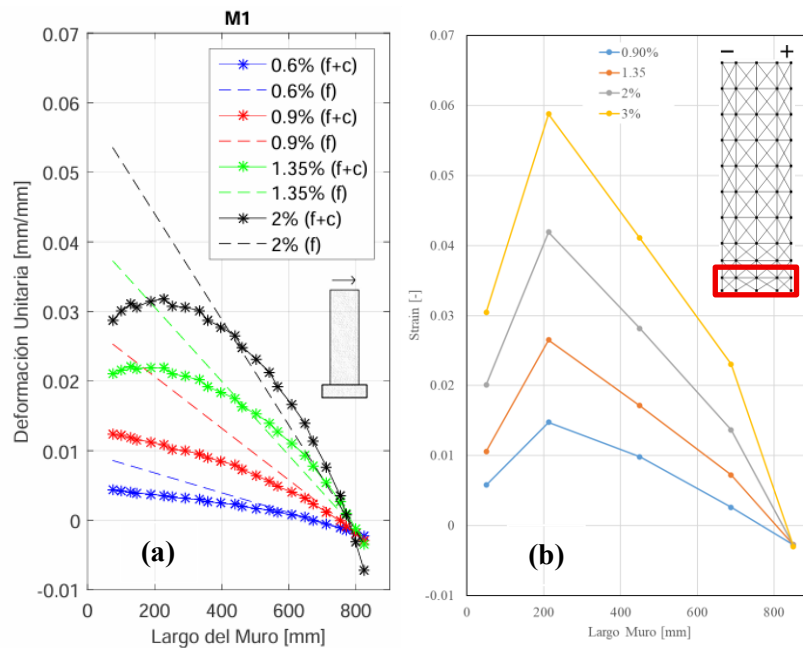


Figura 37. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 1 Drift positivos – (a) Muro 1 FEM Diaz (2016) – (b) Muro 1 BTM

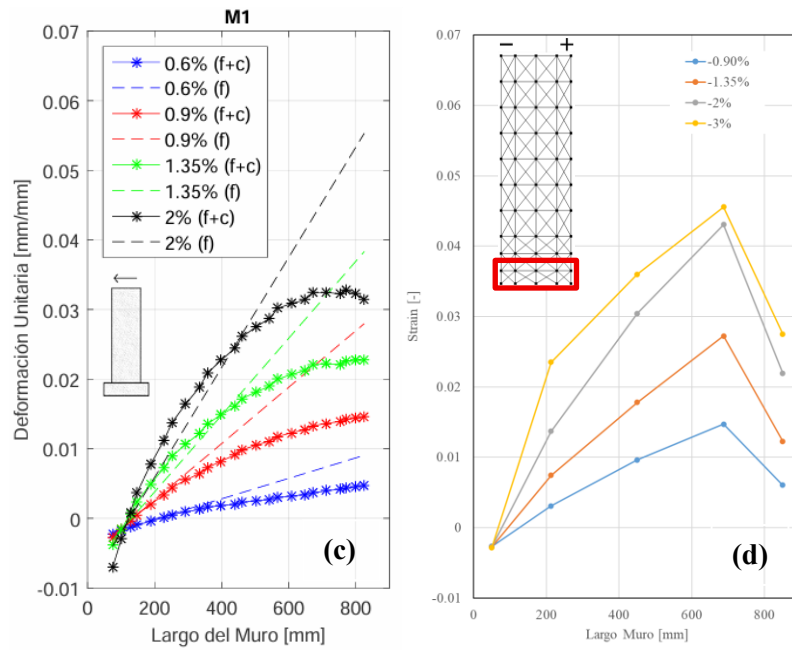


Figura 38. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 1 Drift negativos – (c) Muro 1 FEM Diaz (2016) – (d) Muro 1 BTM

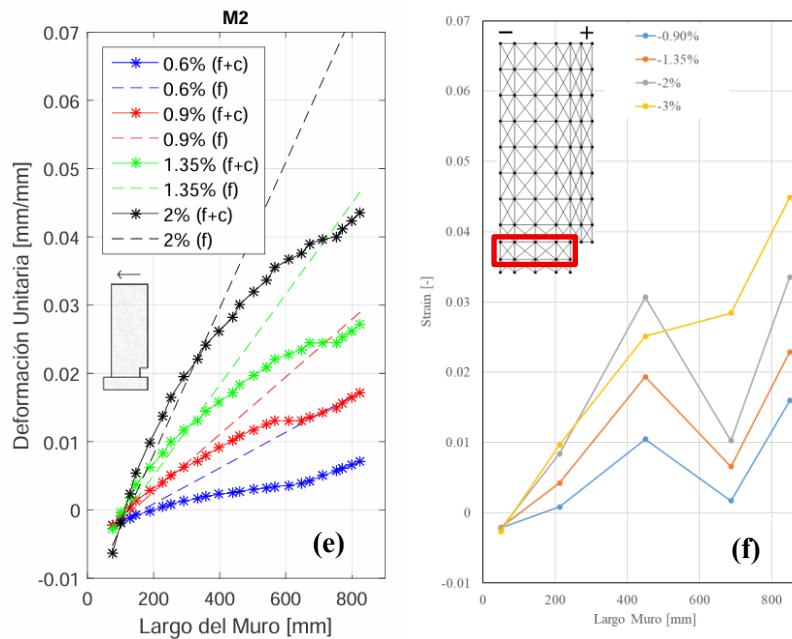


Figura 39. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 2 Drift negativos – (e) Muro 2 FEM Diaz (2016) – (f) Muro 2 BTM

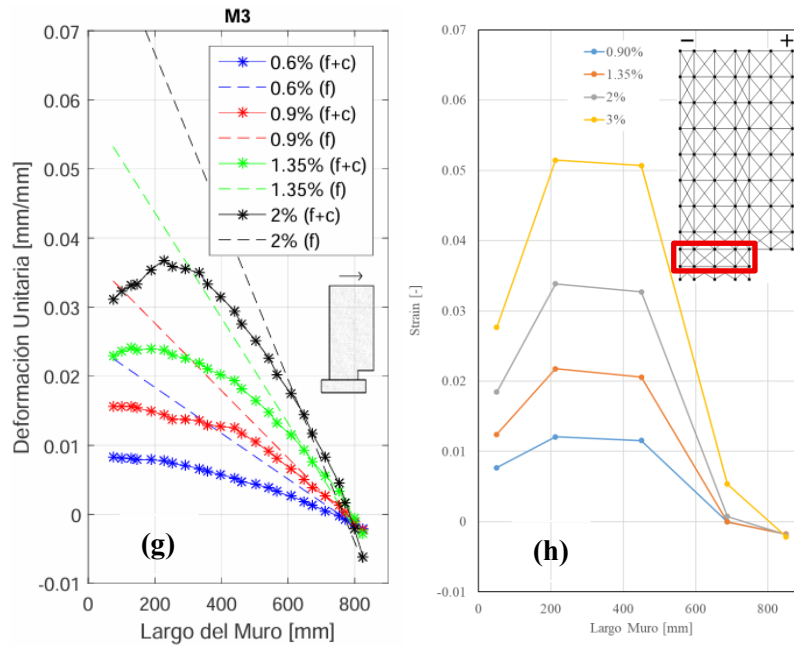


Figura 40. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 3 Drift positivas – (g) Muro 3 FEM Diaz (2016) – (h) Muro 3 BTM

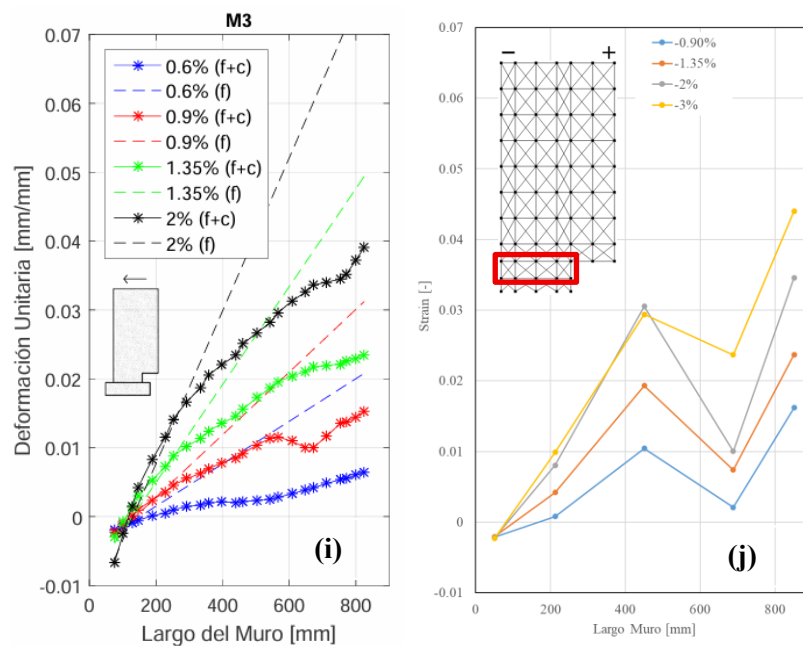


Figura 41. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 3 Drift negativas – (i) Muro 3 FEM Diaz (2016) – (j) Muro 3 BTM

Nota: La comparación entre los resultados numéricos del muro 2 en el sentido positivo no se pudo realizar debido a la falta de los datos.

El primer punto que analizar, con base en los resultados, es que las deformaciones unitarias del muro rectangular se obtuvieron de los primeros elementos verticales de la base a lo largo del muro, mientras que para los muros bandera se utilizan los segundos elementos verticales a lo largo de los muros. Esto se realiza debido a que, utilizando la metodología beam-truss model, se detectó que las concentraciones de deformación unitaria en los muros bandera se ubicaron en dichos elementos, específicamente a una

altura desde los 150 mm hasta los 350 mm (Ver Figuras 27 a 32). No obstante, los resultados obtenidos con la metodología beam-truss model logran captar un perfil de deformaciones similar al de la metodología FEM. Otro punto a destacar es que la simplificación de asumir caras planas permanecen planas se vuelve cada vez menos compatible a medida que se avanza en los drift de análisis.

Además, cabe mencionar que los muros rectangulares mantienen cierta simetría en los análisis de drift negativos y positivos. En contraste, los muros bandera no poseen esta simetría, mostrando perfiles claramente distintos según la dirección de análisis. Esto concuerda con la distribución de las deformaciones unitarias a lo largo de la altura que se analizaron anteriormente, donde los muros rectangulares presentan resultados mucho más simétricos al no tener la discontinuidad de la bandera.

Finalmente, dados todos los resultados expuestos anteriormente, desde las curvas de histéresis hasta las deformaciones unitarias, se valida la metodología beam-truss model para la realización de análisis en muros del tipo bandera. Esto, no obstante, teniendo en consideración las limitantes de la metodología que fueron expuestas.

5 Análisis muros a escala real.

5.1 Geometría y disposición general de los elementos

Dada la validación de BTM, se procede a realizar el mismo análisis anterior, esta vez aplicado a muros más altos y esbeltos. Se analizan nuevamente tres muros, designados como Muro 1.1, Muro 2.2 y Muro 3.3. El Muro 1.1, siendo el muro guía, consiste en un muro rectangular de 27 metros de alto, 3 metros de largo y 30 centímetros de espesor. Todos los muros se refuerzan de la misma manera. Para el refuerzo de borde, se considera una cuantía aproximada del 4%, aplicada al 10% de largo original del muro en ambos extremos, siguiendo lo establecido por Díaz (2016). Por otro lado, para el refuerzo distribuido, tanto vertical como horizontal, se siguen las recomendaciones de Moehle (2015), quien plantea una cuantía mínima del 0.25%. Dadas estas pautas los muros quedan con un refuerzo de borde de 8Ø25 y un refuerzo distribuido de Ø10@20 en cada cara del muro tanto vertical y horizontalmente. A su vez, para el largo de confinamiento, se toma en consideración aproximadamente dos pisos de alto.

Tomando como base el Muro 1.1, los Muros 2.2 y Muro 3.3 se extendieron un 25% y 50% respectivamente a una altura de 2.7 metros. Esto se realizó con la finalidad de repetir la metodología de análisis y comparación de resultados utilizada para los muros experimentales expuestos anteriormente. A continuación, en las Figuras de la 42 a 44 se presentan los muros mencionados.

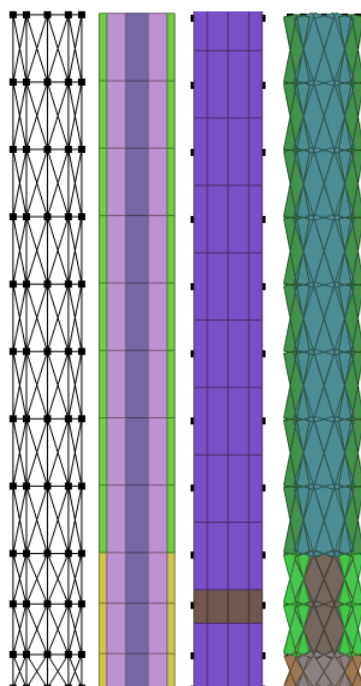


Figura 42. Discretización general, elementos verticales, horizontales y diagonales Muro 1.1

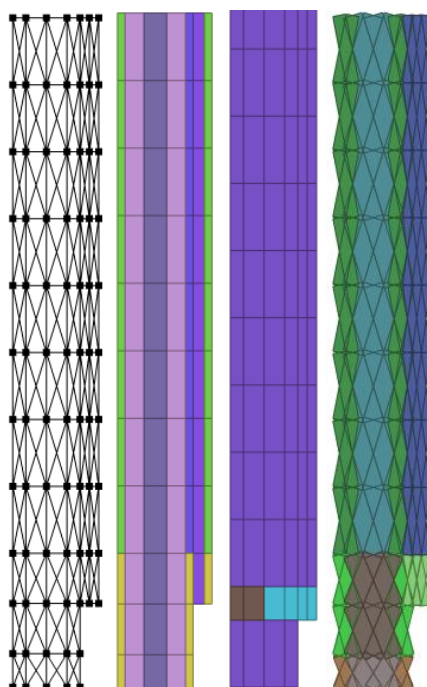


Figura 43. Discretización general, elementos verticales, horizontales y diagonales Muro 2.2

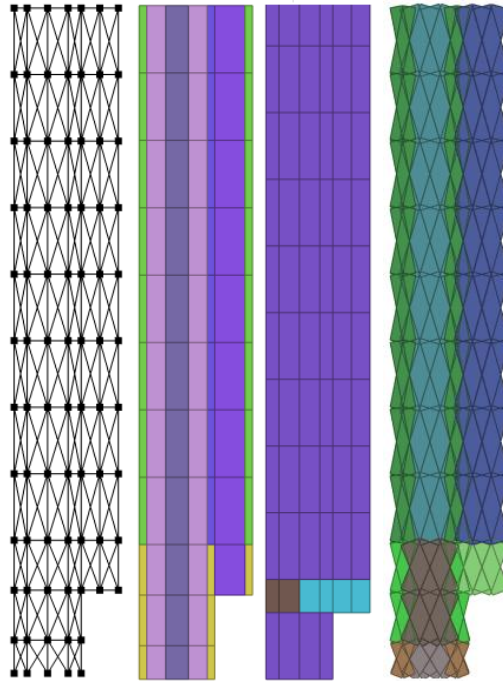


Figura 44. Discretización general, elementos verticales, horizontales y diagonales Muro 3.3

Nota: El detalle de las secciones y su respectiva ubicación dentro de los muros se encuentra en el anexo 8.2

5.1.1 Parámetros de hormigón y acero utilizados, cargas aplicadas y apoyos.

Para este análisis, se utilizan los mismos valores de los materiales de concrete 02 y SteelMPF de los muros 2 y 3, expuestos en las Tablas 1, 2 y 3, en los modelos numéricos de los muros 1.1, 2.2 y 3.3.

Por otro lado, se mantienen tanto el protocolo de carga lateral como la forma de calcular la carga axial de los muros. Para el protocolo de carga lateral se extiende el análisis hasta el drift objetivo del 6%, como se muestra en la Figura 45.

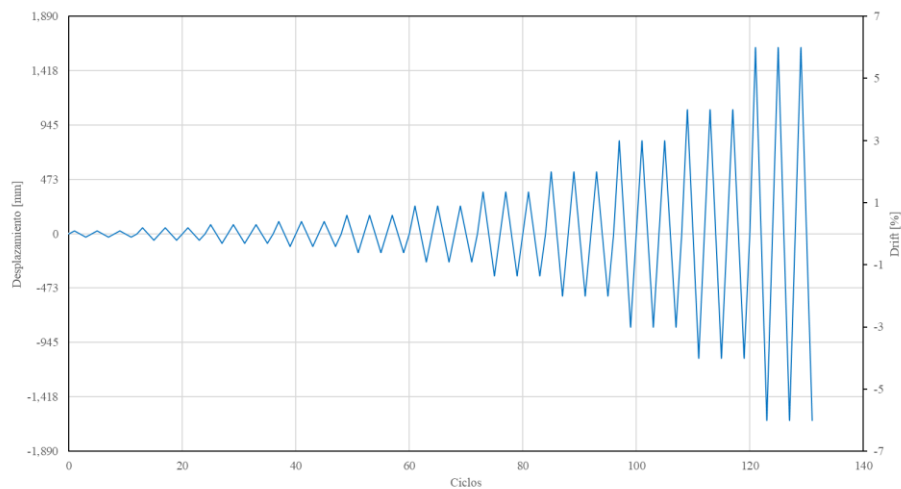


Figura 45. Protocolo de carga muros más altos

Sin embargo, se introducen cambios en la forma en que se aplican las cargas. La carga lateral en este análisis se aplica de forma triangular creciente en los nodos de la estructura. La carga axial se distribuye a un mayor número de nodos de la estructura. Esto se aprecia de mejor manera en las Figuras 46, así como la magnitud de las fuerzas aplicadas en las Tablas 5 y 6. Por último, se mantienen los apoyos simples en todos los muros modelados.

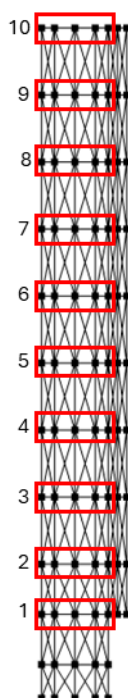


Figura 46. Ubicación cargas laterales y cargas axiales muros más altos

Tabla 5. Cargas laterales aplicadas en la altura de los muros

Nodo	Carga lateral [N]
1	0.125
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9
10	1

Tabla 6. Cargas axiales aplicadas en los nodos

Carga central [kN]	Cargas intermedias [kN]	Cargas extremas [kN]
-102.600	-85.500	-34.200

5.2 Resultados modelos numéricos

5.2.1 Pushover Cíclico

Las siguientes Figuras presentan el comportamiento cíclico obtenido para los muros más altos modelados.

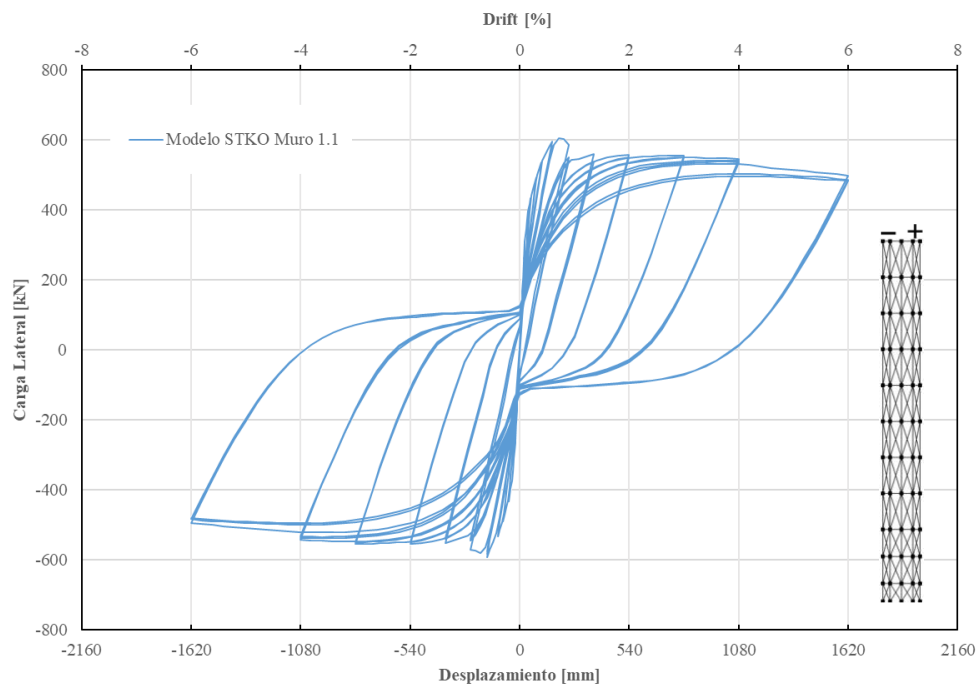


Figura 47. Pushover cíclico Muro 1.1

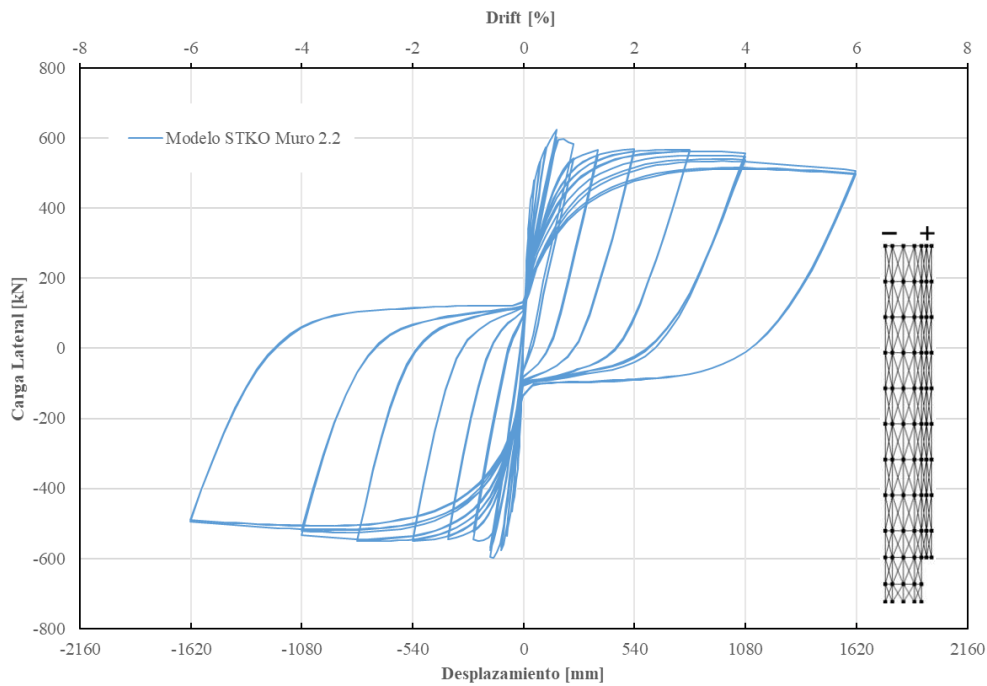


Figura 48. Pushover cíclico Muro 2.2

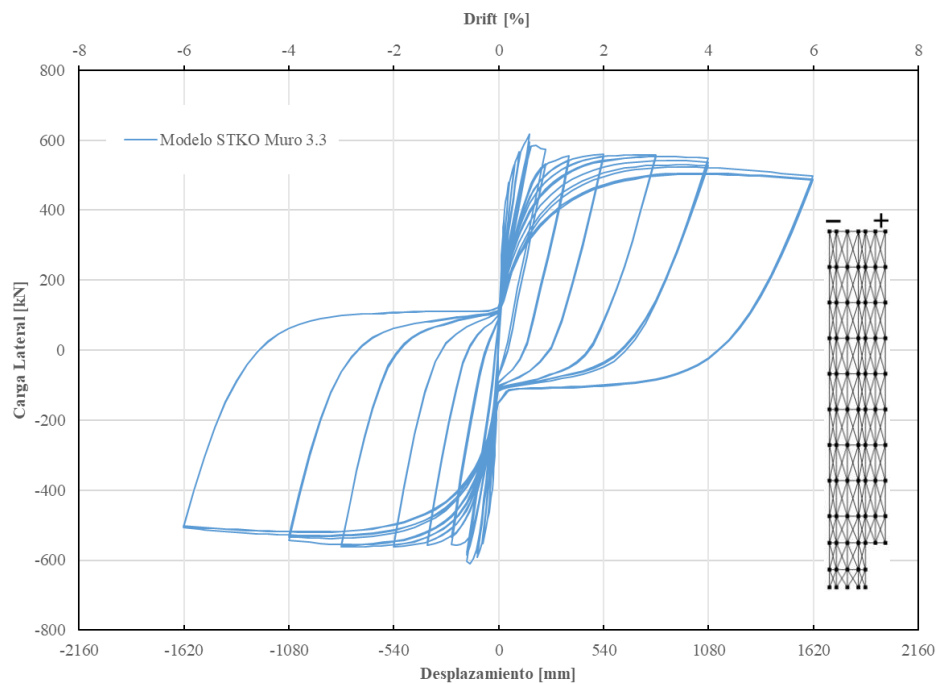


Figura 49. Pushover cíclico Muro 3.3

En una primera instancia, se puede afirmar que los tres muros resisten la misma carga lateral, aproximadamente 600 kN, en ambos sentidos de análisis al inicio del ensayo. Posteriormente, la resistencia de los tres muros decae hasta aproximadamente 450 kN. Además, todos los muros presentan un comportamiento dúctil y con una buena disipación de energía. Sin embargo, al no observarse diferencias significativas en el comportamiento, se procede a superponer las curvas de histéresis de los tres muros. Lo anterior se presenta en la Figura 50.

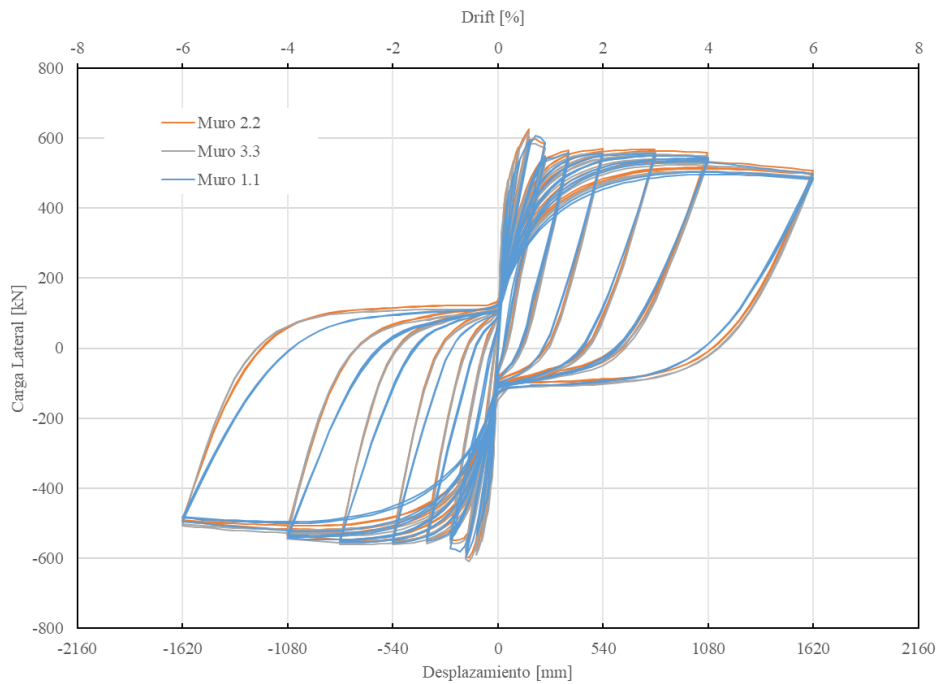


Figura 50. Pushover cíclico muros 1.1, 2.2 y 3.3

Al analizar la Figura anterior, podemos observar como el comportamiento en los ciclos de drift positivos es prácticamente idéntico en los tres muros. Las diferencias más notables se aprecian en el sentido opuesto de análisis, específicamente cuando la discontinuidad en los muros bandera se está traccionando. En este caso, las curvas de histéresis distan entre sí, aunque los muros bandera presentan un comportamiento similar entre ellos. La principal diferencia radica en como la curva se aplanan en los ciclos de drift más altos al acercarse a un desplazamiento nulo. Lo anterior indicaría que los muros bandera pierden rigidez más abruptamente que los muros rectangulares, lo que conlleva a que, al mismo nivel de carga lateral, se produzcan deformaciones mayores en los muros bandera. Este comportamiento ya se observó en los modelos experimentales.

5.2.2 Deformaciones unitarias de los muros

En la presente sección se muestran los principales resultados de las deformaciones unitarias en los tres muros. En primera instancia, se exponen las concentraciones de las deformaciones unitarias en todos los muros para sus niveles de drift del 4% y 6%, tanto el sentido positivo como negativo.

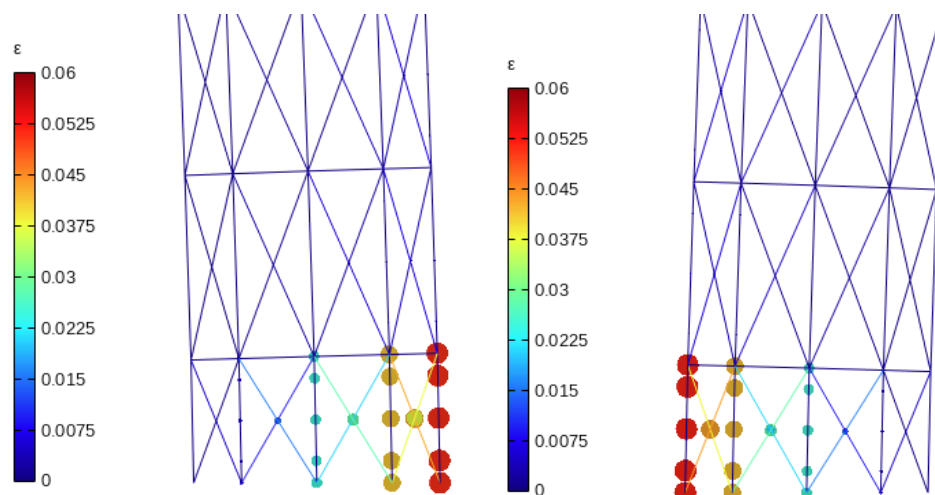


Figura 51. Drift negativo y positivo al 4% Muro 1.1

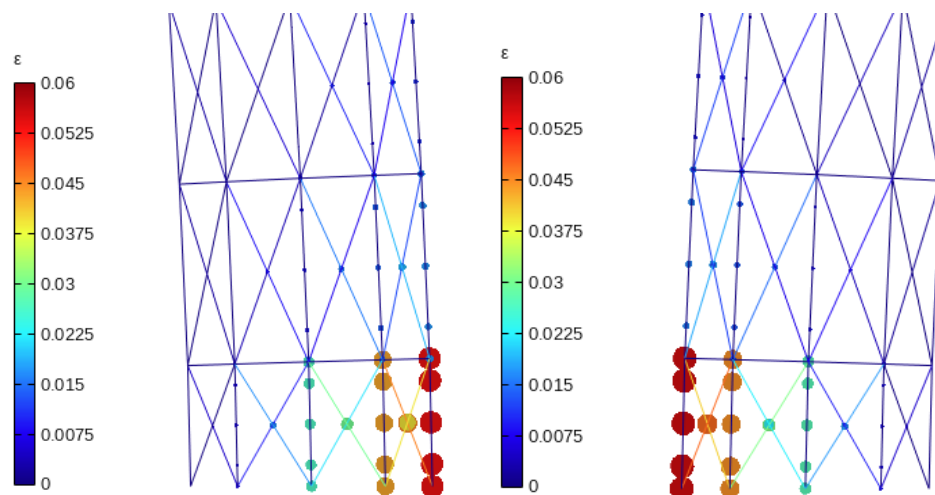


Figura 52. Drift negativo y positivo al 6% Muro 1.1

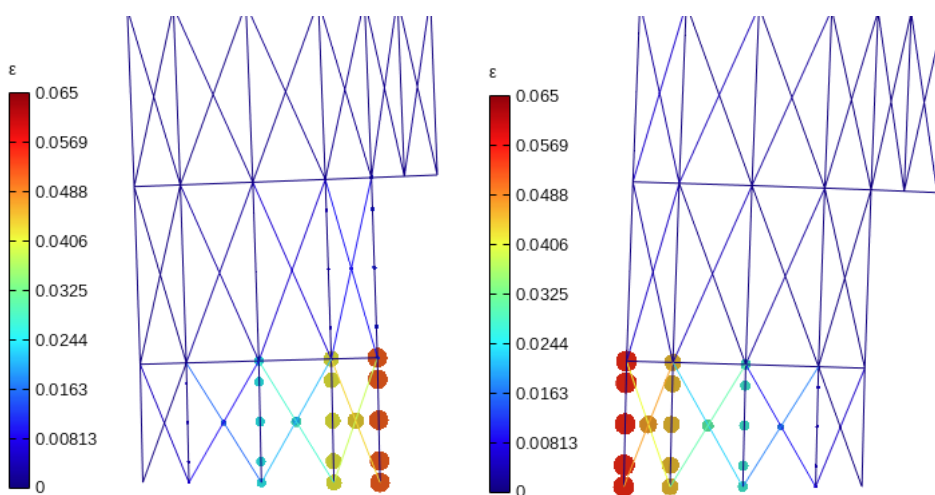


Figura 53. Drift negativo y positivo al 4% Muro 2.2

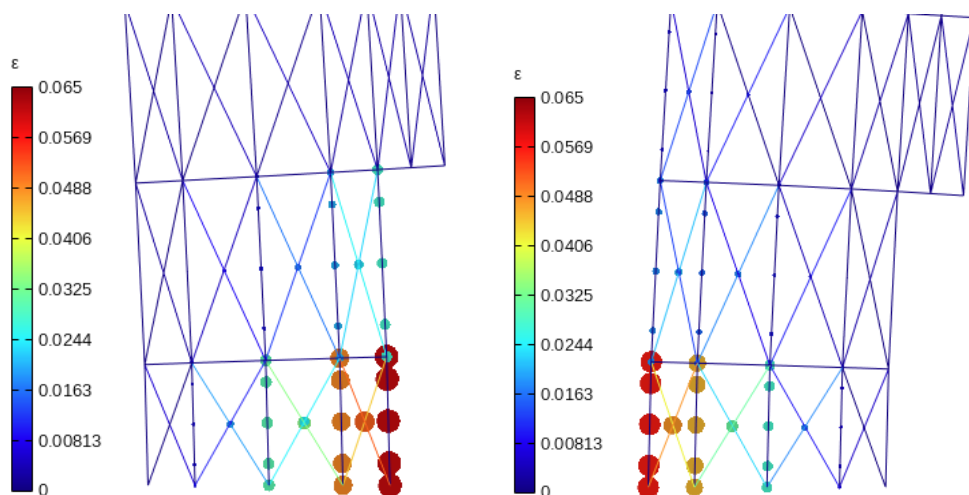


Figura 54. Drift negativo y positivo al 6% Muro 2.2

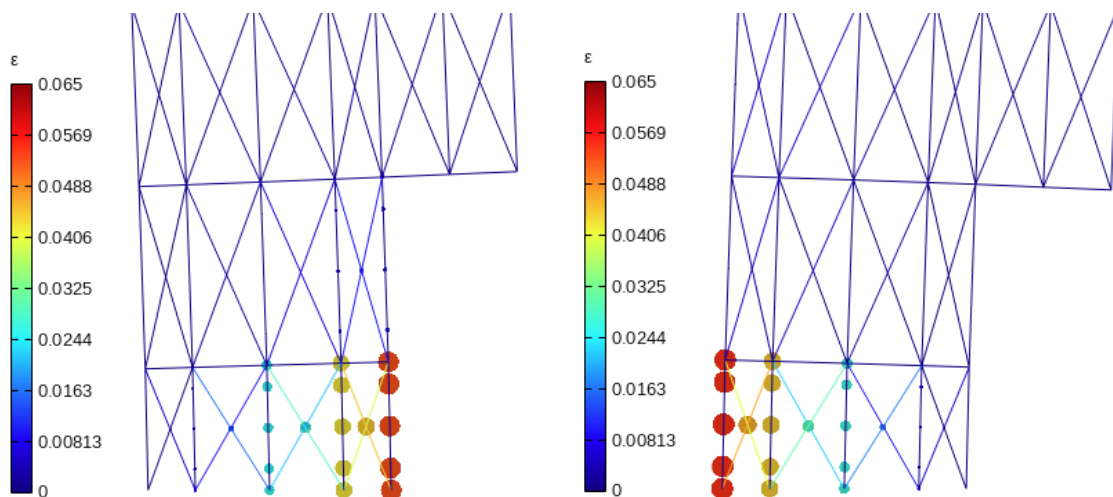


Figura 55. Drift negativo y positivo al 4% Muro 3.3

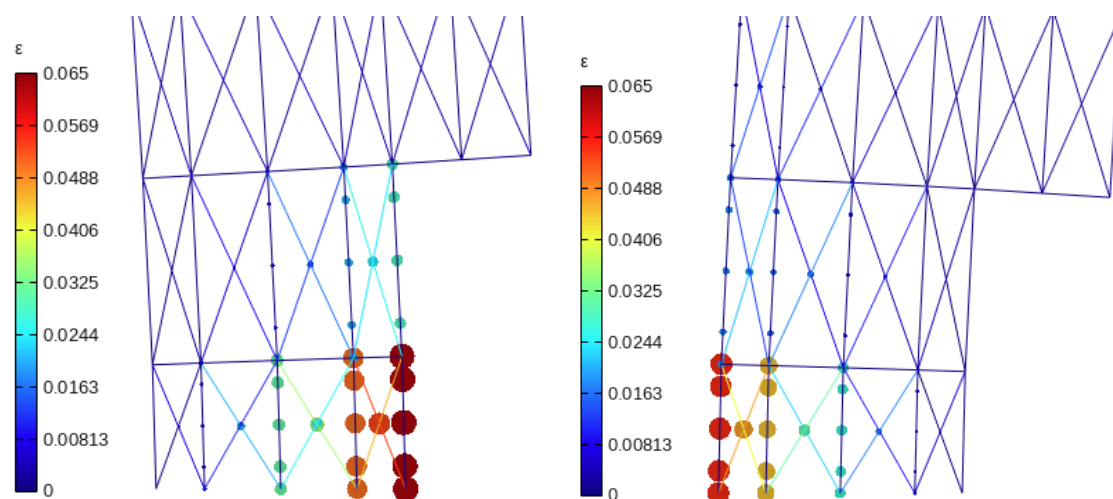


Figura 56. Drift negativo y positivo al 6% Muro 3.3

Lo principal que se puede extraer de las Figuras 51 a 56 es que en los muros bandera las deformaciones unitarias continúan concentrándose en la sección discontinua cuando esta se tracciona. Además, se observa que los valores son ligeramente mayores en los muros bandera, siendo el Muro 3.3 el que experimenta las mayores deformaciones. Esto es concordante con lo sucedido en el análisis de los muros experimentales. Por otro lado, se procede a comparar las deformaciones unitarias a en la altura de los muros en la Figura 57.

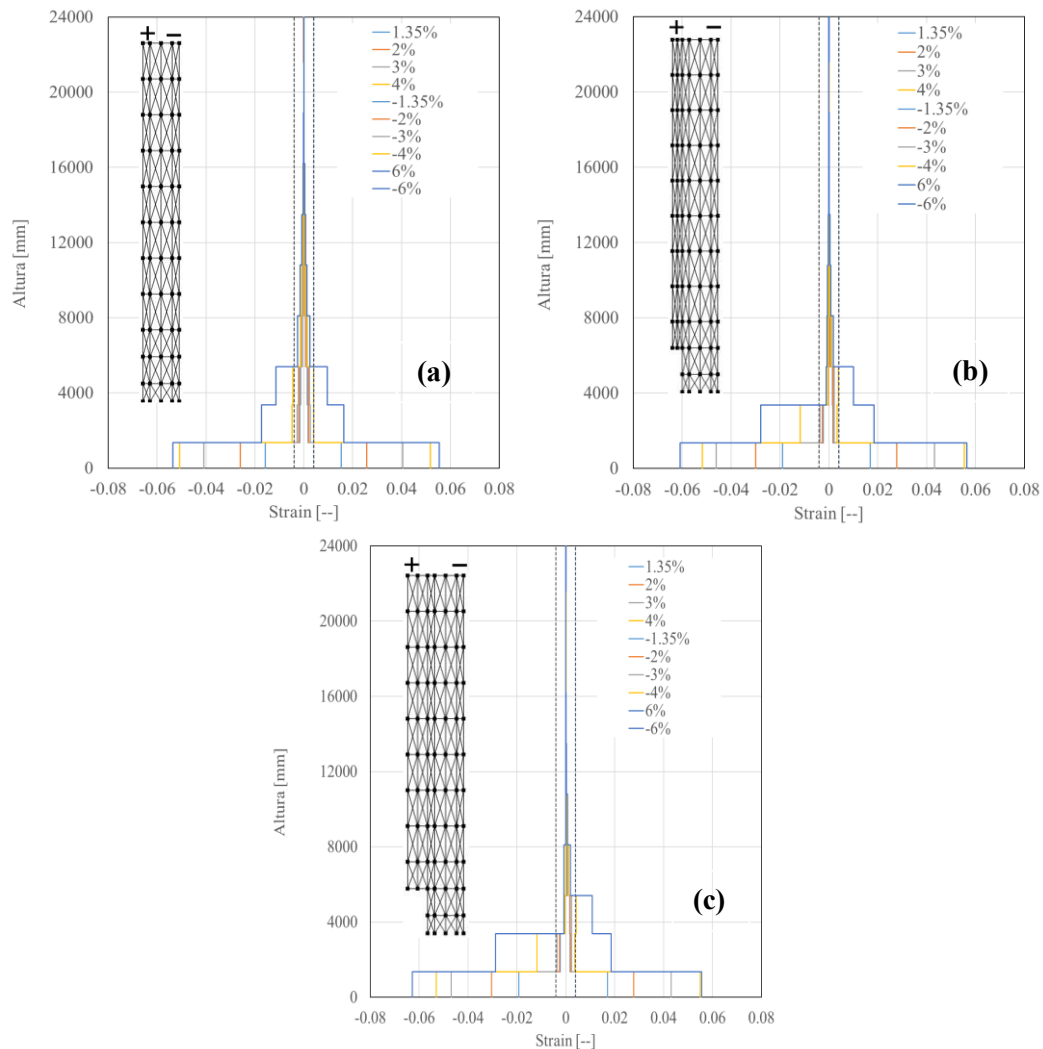


Figura 57. Deformaciones unitarias verticales en los extremos de los muros - (a) Muro 1.1 – (b) Muro 2.2 – (c) Muro 3.3

Dada la comparativa en la Figura 57, se puede reafirmar que los muros bandera concentran las deformaciones unitarias en la discontinuidad y que el comportamiento de los muros rectangulares es bastante simétrico bajo cargas cíclicas, distribuyendo mejor los esfuerzos en la altura del muro. Por otro lado, se aprecia que el Muro 3.3 tiene deformaciones unitarias levemente mayores que el Muro 2.2, lo que indica, nuevamente una mayor pérdida de rigidez. Finalmente, se hace una comparativa entre los perfiles de deformación en ambos sentidos de análisis en la base de los muros en la Figura 58 y 59.

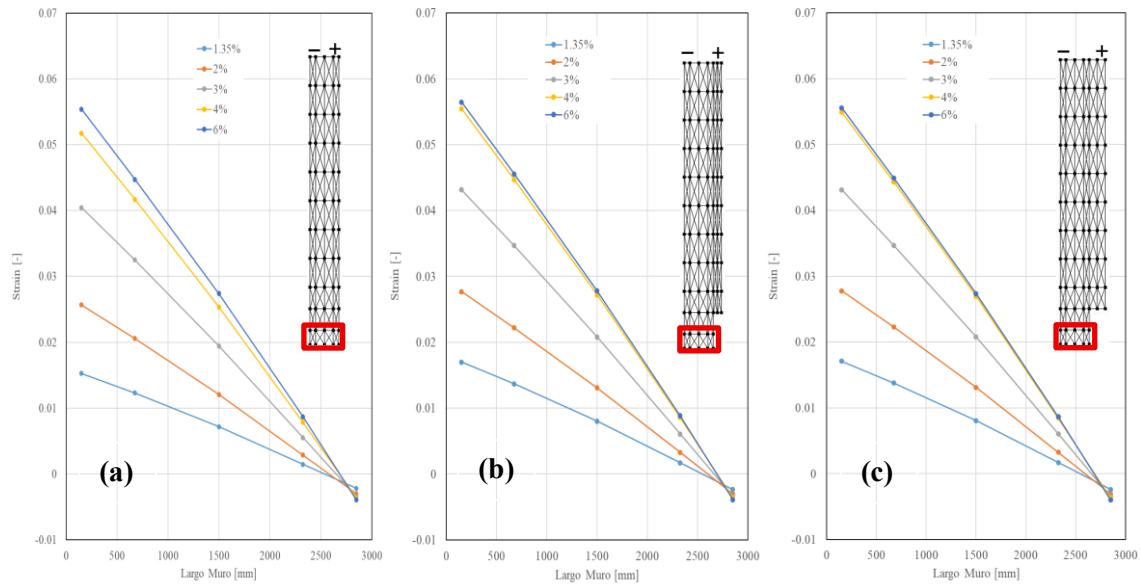


Figura 58. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 3 Drift positivos – (a) Muro 1.1 – (b) Muro 2.2 – (c) Muro 3.3

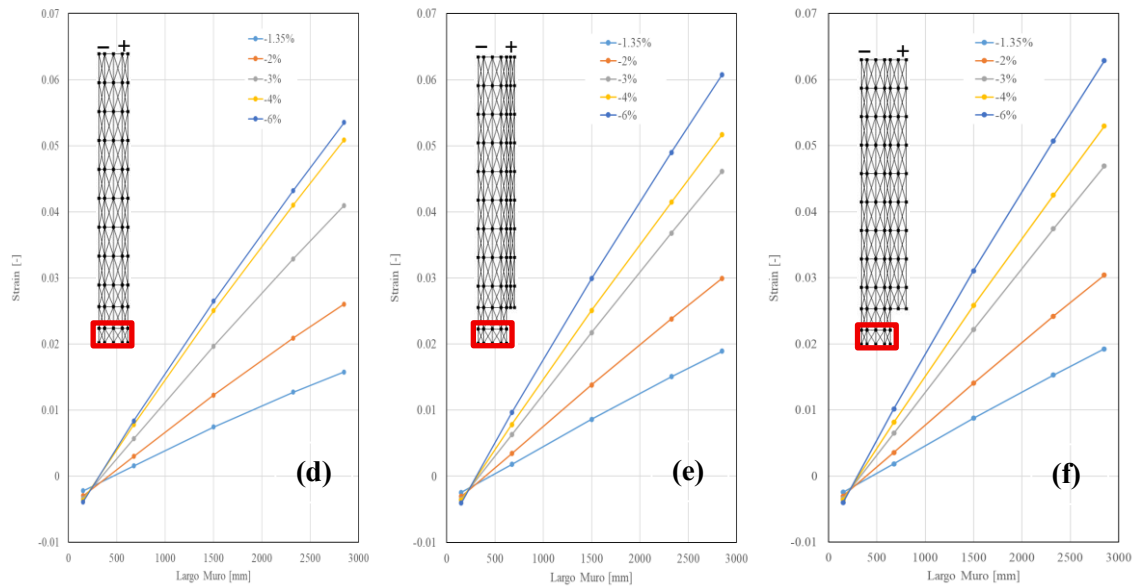


Figura 59. Perfil de deformaciones unitarias en la base del Muro 3 Drift negativos – (d) Muro 1.1 – (e) Muro 2.2 – (f) Muro 3.3

Con base en los resultados de las Figuras 58 y 59, se aprecia nuevamente que las deformaciones unitarias de los muros bandera son mayores que las del muro rectangular. Sin embargo, el cambio más notorio con respecto a los resultados experimentales es que estos muros más altos presentan un perfil de deformaciones prácticamente lineal en cada nivel de drift de análisis. Lo anterior contrasta con los resultados obtenidos de los modelos de los muros experimentales. Esto puede deberse a la mayor esbeltez de los muros analizados en comparación con los experimentales, lo que implica que, al ser más esbeltos, su comportamiento queda mucho más definido por la flexo-compresión. Esto sugiere que la suposición de que caras planas permanecen planas no sea totalmente descartable o que no esta tan alejada de la realidad para muros más esbeltos.

6 Conclusiones

La presente memoria tuvo como objetivo general evaluar la capacidad de la metodología beam-truss model para representar el comportamiento cíclico de muros de hormigón armado del tipo bandera. Para lograr este objetivo, se validó un modelo numérico en STKO, el cual utiliza OpenSees como motor de cálculo, con resultados de ensayos experimentales de muros a escala reducida y, posteriormente, se aplicó la metodología a muros de mayor altura con geometrías mas realistas. A partir de estos resultados se extraen las siguientes conclusiones.

Beam-truss model demostró ser capaz de capturar adecuadamente el comportamiento no lineal general de los muros bandera sometidos a carga cíclica. Los modelos lograron replicar la resistencia lateral máxima de 200 kN y las formas de las curvas de histéresis obtenidas por Massone et al. (2019). Además, el modelo BTM pudo simular la caída de resistencia en los ciclos de drift negativos para los muros con discontinuidad.

Se observó una discrepancia donde los modelos numéricos presentaron una rigidez inicial mayor y una menor degradación de esta en comparación con los datos experimentales. Esta sobreestimación se atribuye a la superposición de elementos de la metodología BTM y las simplificaciones inherentes de los modelos computacionales. Si bien se exploró un factor de reducción de área del 0.3 para los elementos truss, se concluyó que no era adecuado para los muros bandera, ya que provocaba una pérdida de resistencia, rigidez y un cambio notorio en la curva de histéresis que era inconsistente con los datos experimentales.

La metodología fue exitosa en predecir la ubicación de las concentraciones de deformaciones unitarias, identificando correctamente la zona de la discontinuidad como el área más demandada. Además, se comprobó que la posible altura de plastificación en la sección de la bandera es menor a comparación del extremo continuo, lo que evidencia las concentraciones de esfuerzos en dicha zona.

El análisis de muros más altos y esbeltos reveló un comportamiento dominado en mayor medida por la flexo-compresión. A diferencia de los muros experimentales (menos esbeltos), los perfiles de deformación en la base de los muros más altos fueron prácticamente lineales para cada nivel de drift. Esto sugiere que la hipótesis de caras planas permanecen planas es una aproximación más razonable para muros más esbeltos que para muros más bajos.

Tanto en los modelos de muros experimentales como en los muros más altos, se confirmó que la discontinuidad tipo bandera genera un comportamiento asimétrico. La mayor degradación de rigidez ocurre cuando la sección discontinua está sometida a tracción. Además, se constató que, a mayor discontinuidad, mayor es la degradación de rigidez y mayores son las deformaciones unitarias concentradas.

Finalmente se concluye que el beam-truss model es una herramienta útil para el análisis no lineal de muros bandera, permitiendo comprender su comportamiento tanto cíclico como su concentración de deformaciones unitarias. Sin embargo, se deben reconocer sus limitaciones, como la sobreestimación de la rigidez inicial y la incapacidad para simular el pandeo de las barras de acero de refuerzo.

7 Referencias

- ACI 318-08. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- Beer, F. P., & Russell Johnston, E. (2013). Mecánica de materiales, 6ta Edición.
- Caballero, M., & Gallo, P. Q. (2019). Análisis Sísmico de Muros de Hormigón Armado con Irregularidad Vertical. <https://www.researchgate.net/publication/361749912>
- Díaz, S. (2016). Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera. UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL.
- Godínez, S. E., Álvarez, R., & Restrepo, J. I. (2024). Nonlinear dynamic seismic analysis of a high-rise concrete core wall building with podiums using the beam-truss model. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-02064-y>
- Lu, Y., & Panagiotou, M. (2014). Three-Dimensional Cyclic Beam-Truss Model for Nonplanar Reinforced Concrete Walls. *Journal of Structural Engineering*, 140(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000852](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000852)
- Massone, L. M., Díaz, S., Manríquez, I., Rojas, F., & Herrera, R. (2019). Experimental cyclic response of RC walls with setback discontinuities. *Engineering Structures*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.054>
- Massone, L. M., Manríquez, I., Díaz, S., Rojas, F., & Herrera, R. (2019). Understanding the cyclic response of RC walls with setback discontinuities through a finite element model and a strut-and-tie model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(12). <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00579-3>
- Massone, L. M., Rojas, F. R., & Ahumada, M. G. (2017). Analytical study of the response of reinforced concrete walls with discontinuities of flag wall type. *Structural Concrete*, 18(6), 962–973. <https://doi.org/10.1002/suco.201600107>
- Moehle J. (2015). Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings.
- Morsy, A., & Ibrahim, Y. (2019). Parametric Study for Performance of R.C. Wall with Opening using Analytical F.E. Model. *Athens Journal of Technology & Engineering*, 6(1), 31–62. <https://doi.org/10.30958/ajte.6-1-3>
- Ojeda Raimundo, & Sepúlveda Claudio. (2020). Modelación bidimensional de elementos de hormigón armado a través de elementos uniaxiales no lineales y su comparación con resultados experimentales.
- Wallace, J. W. (1998). Design of slender reinforced concrete walls with openings. In *ACI Structural Journal* (Vol. 95, Issue 4). <https://www.researchgate.net/publication/291999811>
- Wallace, J. W., Massone, L. M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C., & Moehle, J. (2012). Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1). <https://doi.org/10.1193/1.4000047>
- Zhang, P., Conte, J., Restrepo, J., & Ou, J. (2017). DETAILED NONLINEAR MODELING, PUSHOVER AND TIME HISTORY ANALYSIS OF ALTO RIO BUILDING USING BEAM-TRUSS MODEL.

8 Anexo

8.1 Ubicación y secciones de muros experimentales modelados

8.1.1 Muro 1

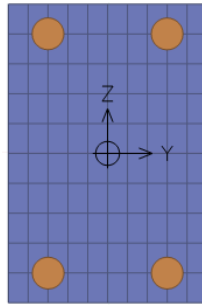


Figura 60. Sec_HA1 (Confinado) 0.15x0.1 metros 4Ø16

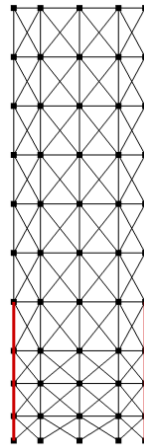


Figura 61. Ubicación Sec_HA1 (Confinado)

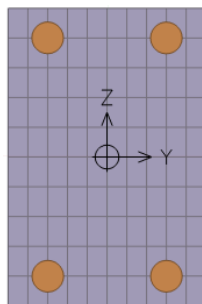


Figura 62. Sec_HA1 (No confinado) 0.15x0.1 metros 4Ø16

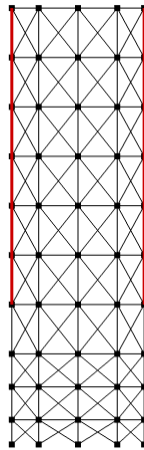


Figura 63. Ubicación Sec_HA1 (No confinado)

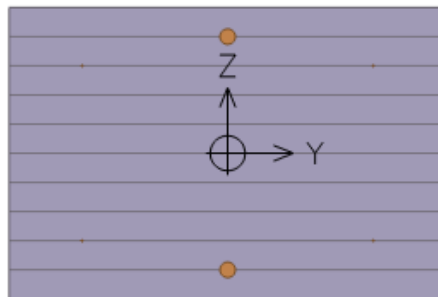


Figura 64. Sec_HA2 0.15x0.225 metros 2Ø8

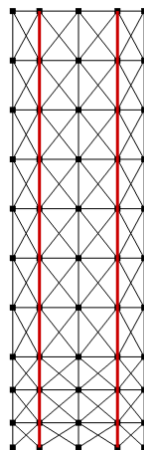


Figura 65. Ubicación Sec_HA2

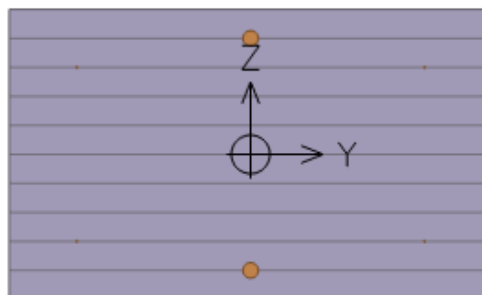


Figura 66. Sec_HA3 0.15x0.25 metros 2Ø8

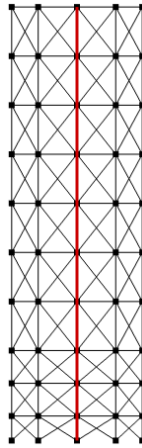


Figura 67. Ubicación Sec_HA3

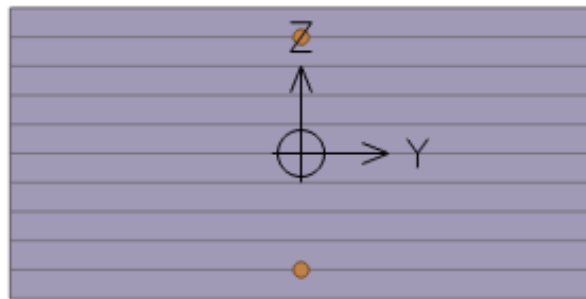


Figura 68. Sec_HA5 0.15x0.3 metros 2Ø8

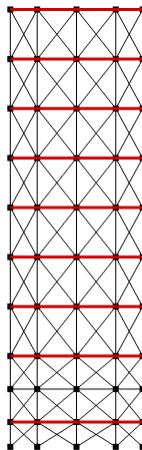


Figura 69. Ubicación Sec_HA5

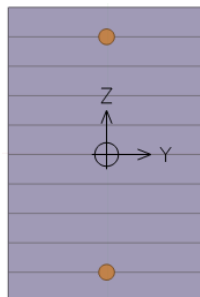


Figura 70. Sec_HA6.2 0.15x0.1 metros 2Ø8

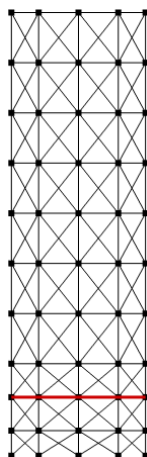


Figura 71. Ubicación Sec_HA6.2

A continuación, se presenta una tabla con los b_{eff} calculados para el Muro 1.

Tabla 7. Secciones diagonales Muro 1

Sección	B_{eff} [m]	Espesor [m]
A1	0.11	0.15
A2	0.143	0.15
A3	0.13	0.15
A4	0.13	0.15
A5	0.19	0.15
A6	0.15	0.15

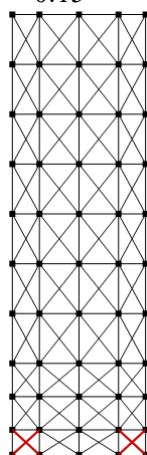


Figura 72. Ubicación secciones A1

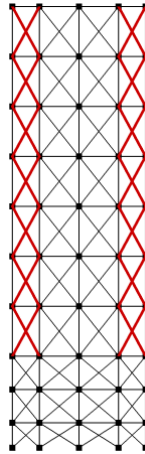


Figura 73. Ubicación secciones A2

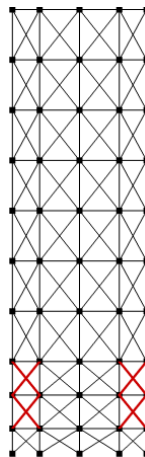


Figura 74. Ubicación secciones A3

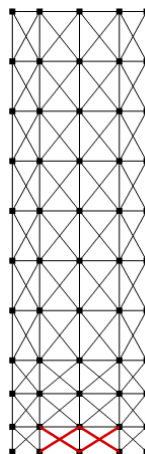


Figura 75. Ubicación secciones A4

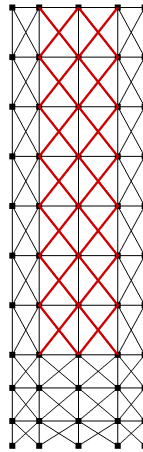


Figura 76. Ubicación secciones A5

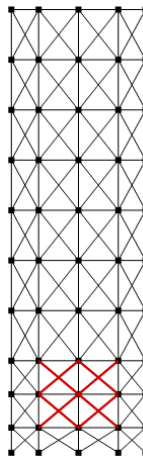


Figura 77. Ubicación secciones A6

8.1.2 Muro 2

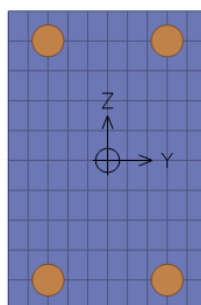


Figura 78. Sec_HA1 (Confinado) 0.15x0.1 metros 4Ø16

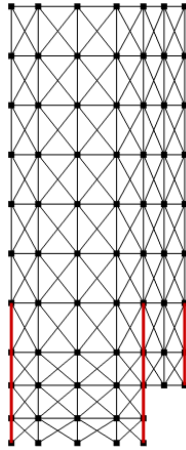


Figura 79. Ubicación Sec_HA1 (Confinado)

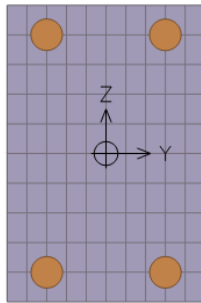


Figura 80. Sec_HA1 (No confinado) 0.15x0.1 metros 4Ø16

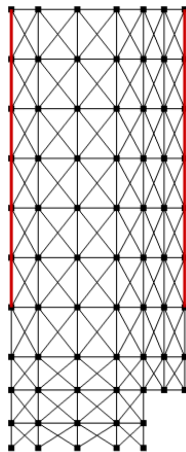


Figura 81. Ubicación Sec_HA1 (No confinado)

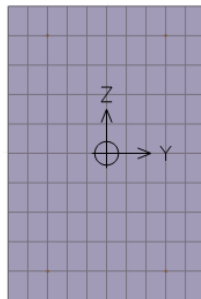


Figura 82. Sec_HA1_1 0.15x0.1 metros 4Ø1 (Dummy Fibers)

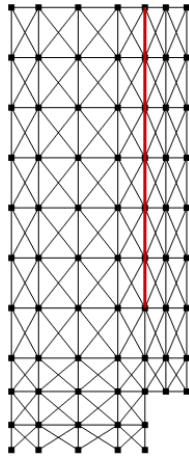


Figura 83. Ubicación Sec_HA1_1

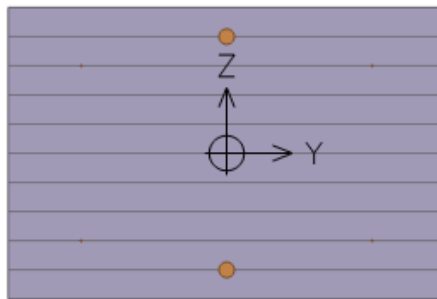


Figura 84. Sec_HA2 0.15x0.225 metros 2Ø8

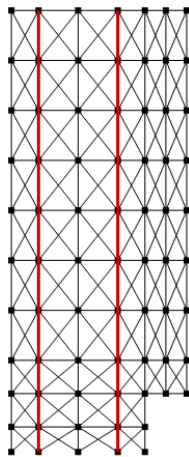


Figura 85. Ubicación Sec_HA2

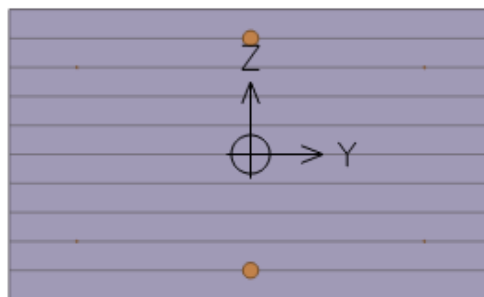


Figura 86. Sec_HA3 0.15x0.25 metros 2Ø8

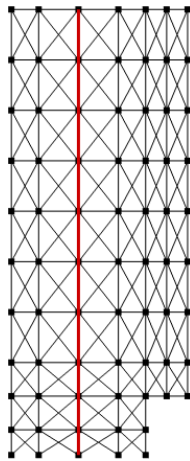


Figura 87. Ubicación Sec_HA3

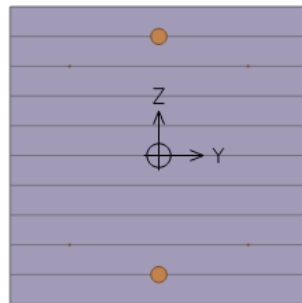


Figura 88. Sec_HA4 0.15x0.15 metros 2Ø8

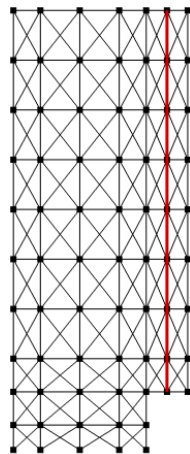


Figura 89. Ubicación Sec_HA4

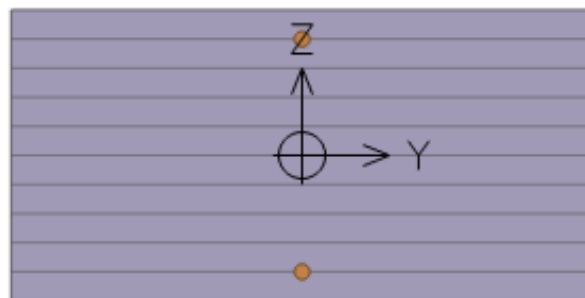


Figura 90. Sec_HA5 0.15x0.3 metros 2Ø8

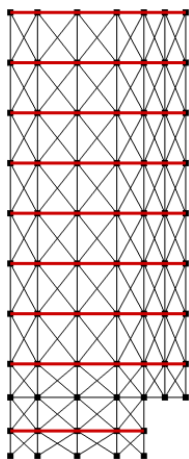


Figura 91. Ubicación Sec_HA5

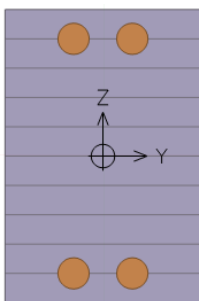


Figura 92. Sec_HA6.1 0.15x0.1 metros 4Ø16

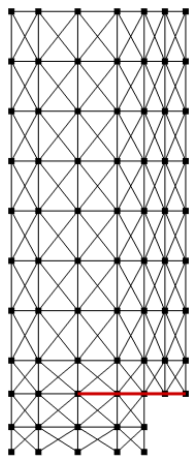


Figura 93. Ubicación Sec_HA6.1

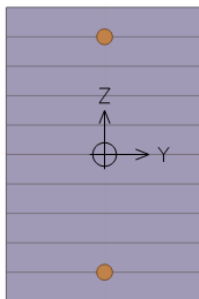


Figura 94. Sec_HA6.2 0.15x0.1 metros 2Ø8

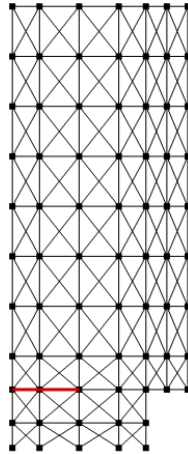


Figura 95. Ubicación Sec_HA6.2

A continuación, se presenta una tabla con los b_{eff} calculados para el Muro 2.

Tabla 8. Secciones diagonales Muro 2

Sección	B_{eff} [m]	Espesor [m]
A1	0.11	0.15
A2	0.143	0.15
A3	0.13	0.15
A4	0.13	0.15
A5	0.19	0.15
A6	0.15	0.15
A7	0.11	0.15
A8	0.115	0.15

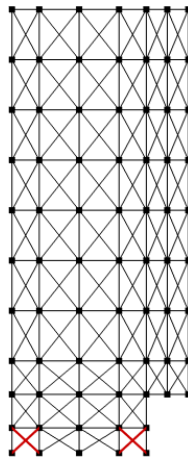


Figura 96. Ubicación secciones A1

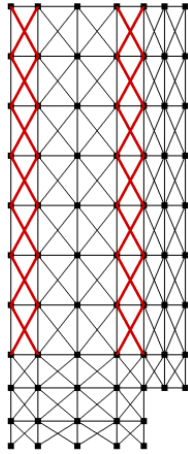


Figura 97. Ubicación secciones A2

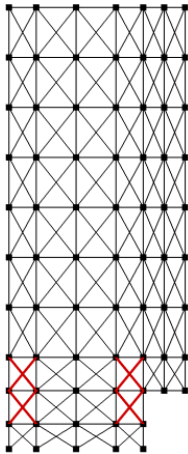


Figura 98. Ubicación secciones A3

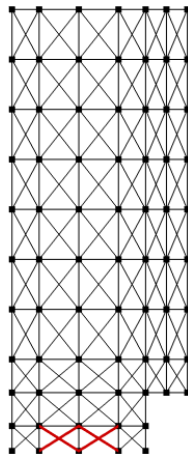


Figura 99. Ubicación secciones A4

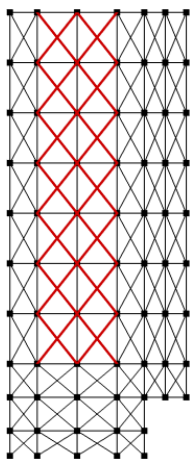


Figura 100. Ubicación secciones A5

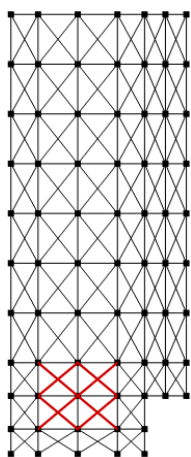


Figura 101. Ubicación secciones A6

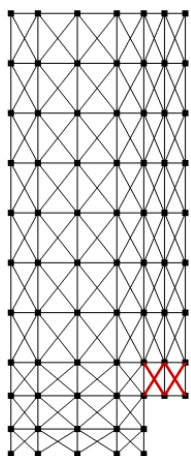


Figura 102. Ubicación secciones A7

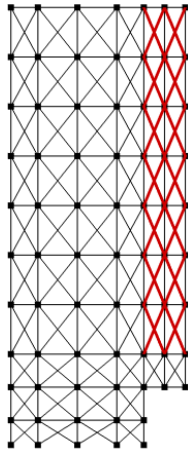


Figura 103. Ubicación secciones A8

8.1.3 Muro 3

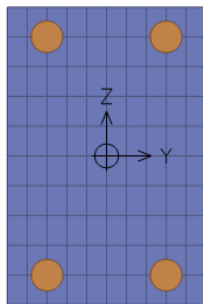


Figura 104. Sec_HA1 (Confinado) 0.15x0.1 metros 4Ø16

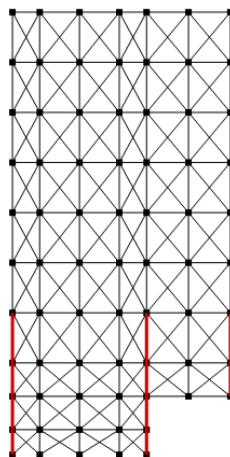


Figura 105. Ubicación Sec_HA1 (Confinado)

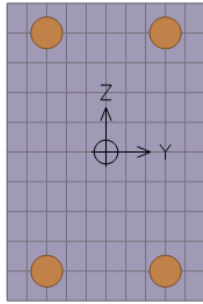


Figura 106. Sec_HA1 (No confinado) 0.15x0.1 metros 4Ø16

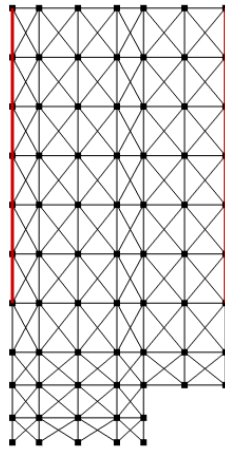


Figura 107. Ubicación Sec_HA1 (No confinado)

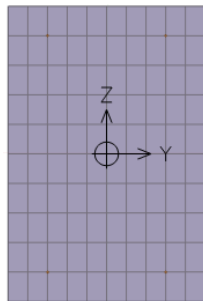


Figura 108. Sec_HA1_1 0.15x0.1 metros 4Ø1 (Dummy Fibers)

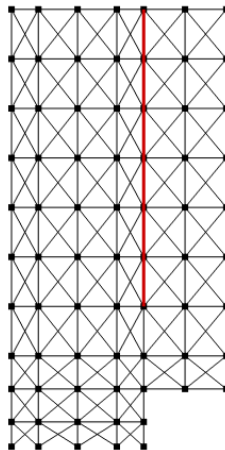


Figura 109. Ubicación Sec_HA1_1

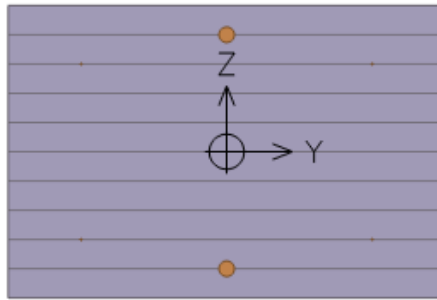


Figura 110. Sec_HA2 0.15x0.225 metros 2Ø8

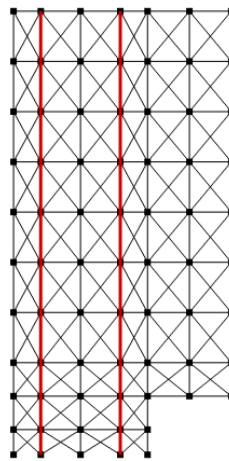


Figura 111. Ubicación Sec_HA2

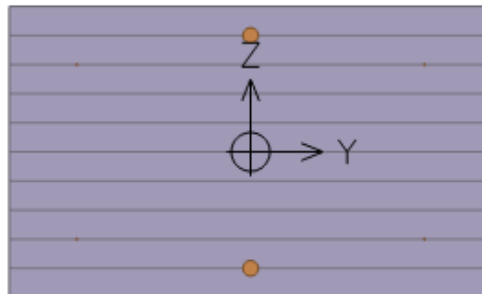


Figura 112. Sec_HA3 0.15x0.25 metros 2Ø8

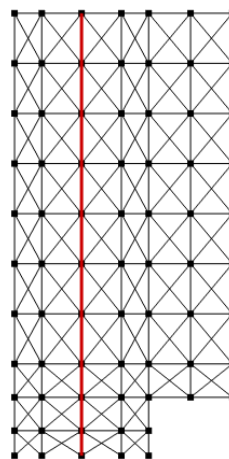


Figura 113. Ubicación Sec_HA3

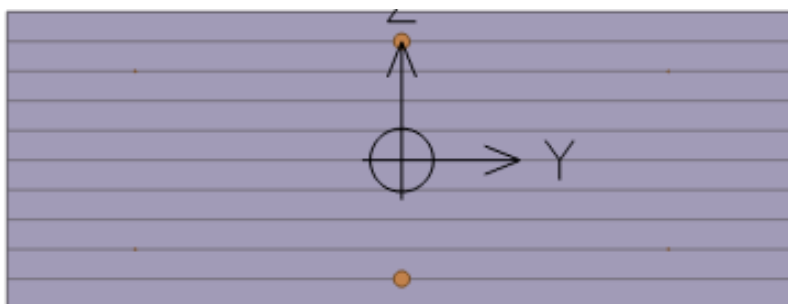


Figura 114. Sec_HA4 0.15x0.4 metros 2Ø8

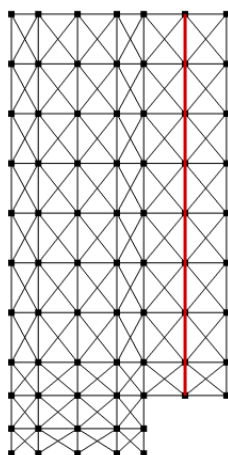


Figura 115. Ubicación Sec_HA4

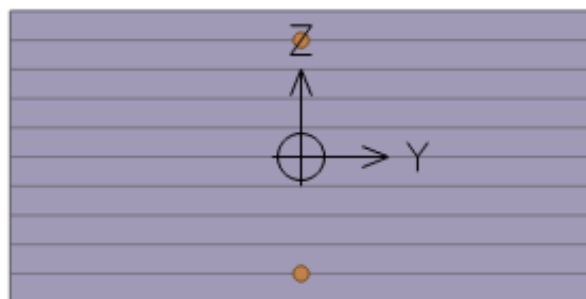


Figura 116. Sec_HA5 0.15x0.3 metros 2Ø8

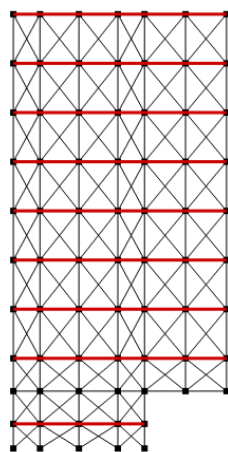


Figura 117. Ubicación Sec_HA5

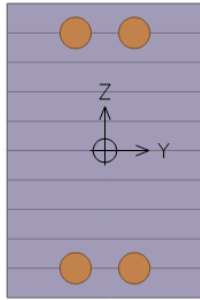


Figura 118. Sec_HA6.1 0.15x0.1 metros 4Ø16

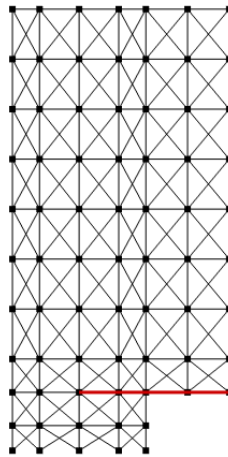


Figura 119. Ubicación Sec_HA6.1

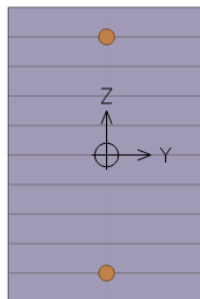


Figura 120. Sec_HA6.2 0.15x0.1 metros 2Ø8

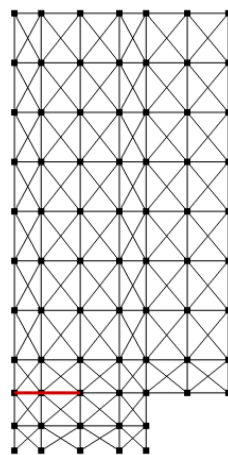


Figura 121. Ubicación Sec_HA6.2

A continuación, se presenta una tabla con los b_{eff} calculados para el Muro 3.

Tabla 9. Secciones diagonales Muro 3

Sección	B_{eff} [m]	Espesor [m]
A1	0.11	0.15
A2	0.143	0.15
A3	0.13	0.15
A4	0.13	0.15
A5	0.19	0.15
A6	0.15	0.15
A7	0.16	0.15
A8	0.19	0.15

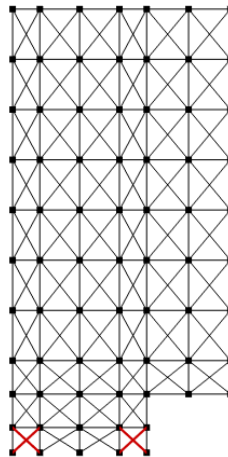


Figura 122. Ubicación secciones A1

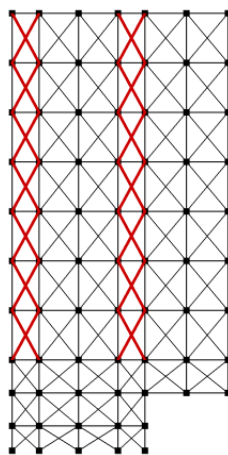


Figura 123. Ubicación secciones A2

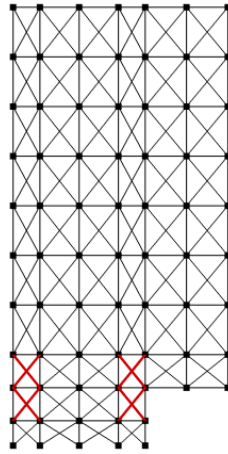


Figura 124. Ubicación secciones A3

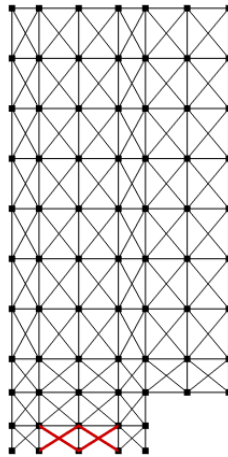


Figura 125. Ubicación secciones A4

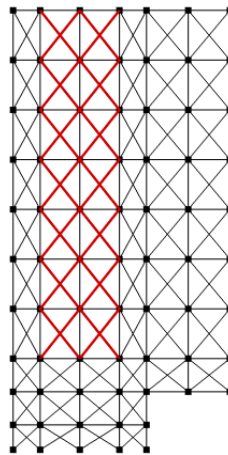


Figura 126. Ubicación secciones A5

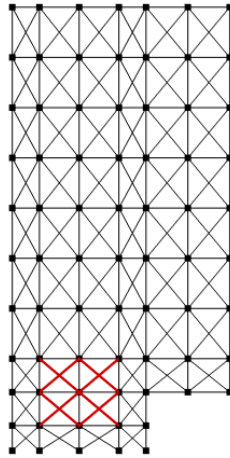


Figura 127. Ubicación secciones A6

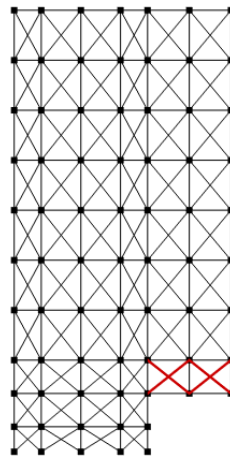


Figura 128. Ubicación secciones A7

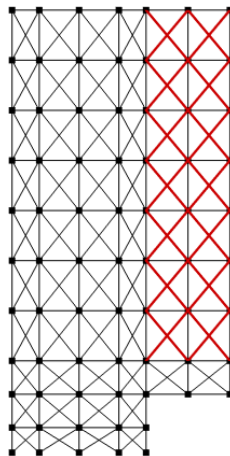


Figura 129. Ubicación secciones A8

8.2 Ubicación y secciones de muros a escala real modelados

8.2.1 Muro 1.1

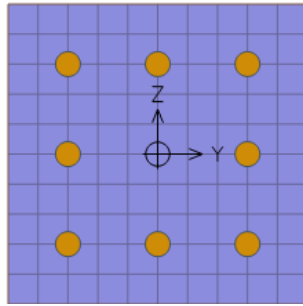


Figura 130. Sec_HA1 (Confinado) 0.3x0.3 metros 8Ø25

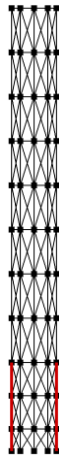


Figura 131. Ubicación Sec_HA1 (Confinado)

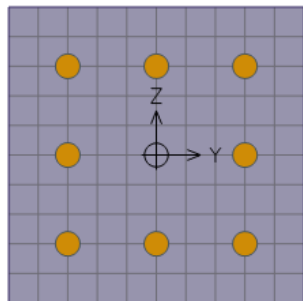


Figura 132. Sec_HA1 (No confinado) 0.3x0.3 metros 8Ø25

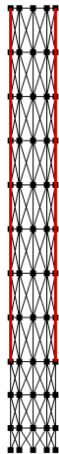


Figura 133. Ubicación Sec_HA1 (No confinado)

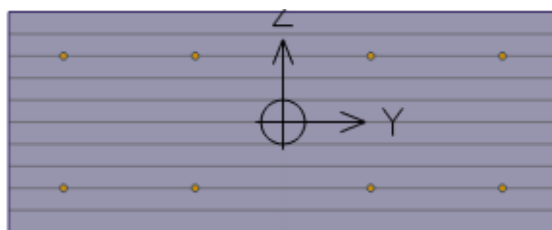


Figura 134. Sec_HA2 0.3x0.75 metros 8Ø10

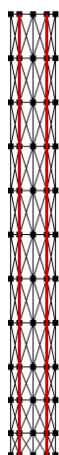


Figura 135. Ubicación Sec_HA2

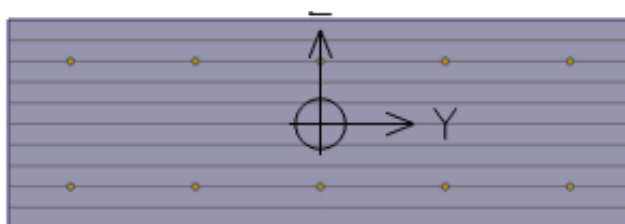


Figura 136. Sec_HA3 0.3x0.9 metros 10Ø10

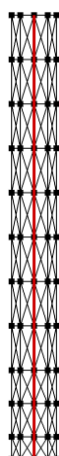


Figura 137. Ubicación Sec_HA3

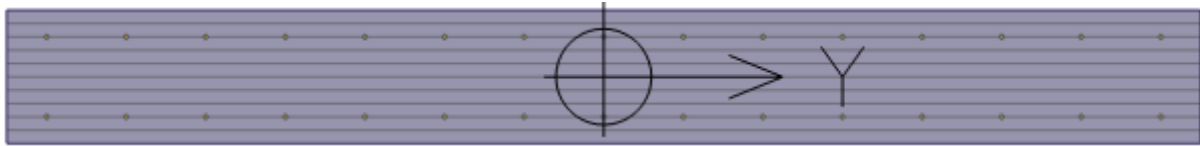


Figura 138. Sec_HA5 0.3x2.7 metros 30Ø10



Figura 139. Ubicación Sec_HA5

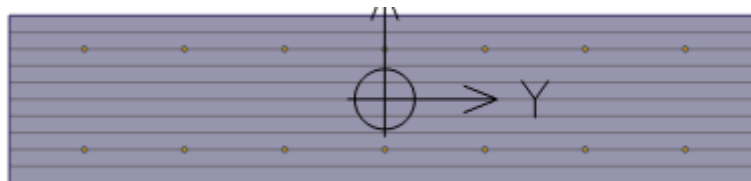


Figura 140. Sec_HA6.2 0.3x1.35 metros 14Ø10



Figura 141. Ubicación Sec_HA6.2

A continuación, se presenta una tabla con los b_{eff} calculados para el Muro 1.1.

Tabla 10. Secciones diagonales Muro 1.1

Sección	B_{eff} [m]	Espesor [m]
A1	0.484	0.3
A2	0.515	0.3
A3	0.524	0.3
A4	0.695	0.3
A5	0.789	0.3
A6	0.759	0.3

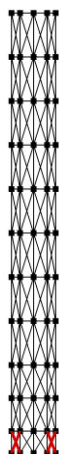


Figura 142. Ubicación secciones A1

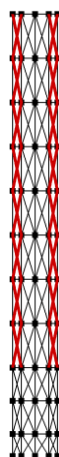


Figura 143. Ubicación secciones A2

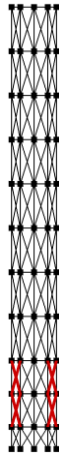


Figura 144. Ubicación secciones A3

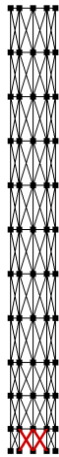


Figura 145. Ubicación secciones A4



Figura 146. Ubicación secciones A5



Figura 147. Ubicación secciones A6

8.2.2 Muro 2.2

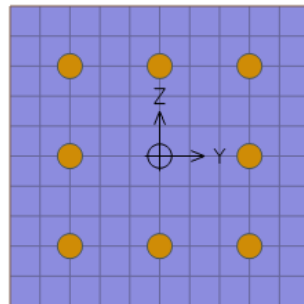


Figura 148. Sec_HA1 (Confinado) 0.3x0.3 metros 8Ø25

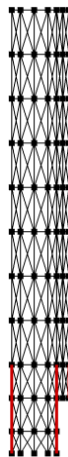


Figura 149. Ubicación Sec_HA1 (Confinado)

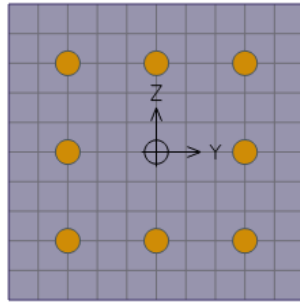


Figura 150. Sec_HA1 (No confinado) 0.3x0.3 metros 8Ø25

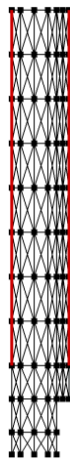


Figura 151. Ubicación Sec_HA1 (No confinado)

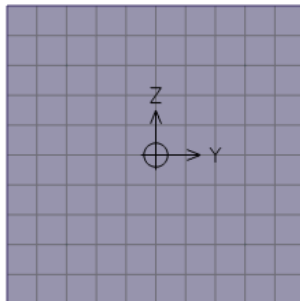


Figura 152. Sec_HA1_1 0.3x0.3 metros 4Ø1 (Dummy Fibers)

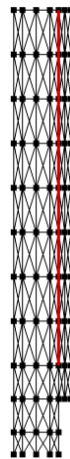


Figura 153. Ubicación Sec_HA1_1

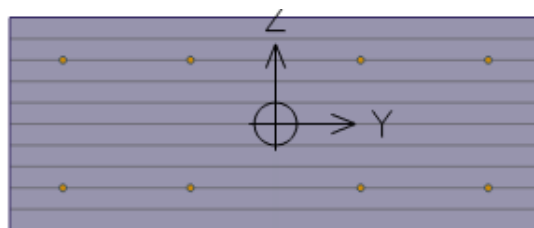


Figura 154. Sec_HA2 0.3x0.75 metros 8Ø10

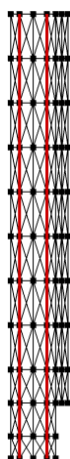


Figura 155. Ubicación Sec_HA2

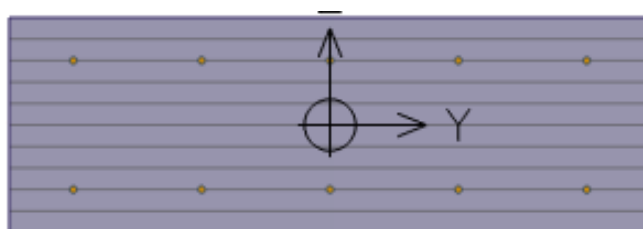


Figura 156. Sec_HA3 0.3x0.9 metros 10Ø10

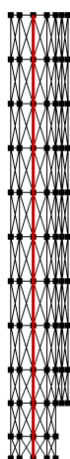


Figura 157. Ubicación Sec_HA3

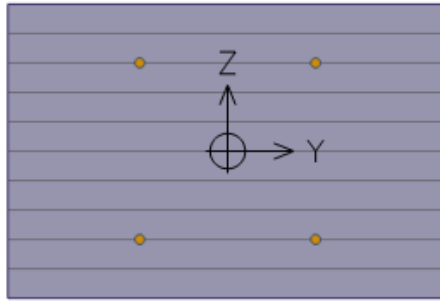


Figura 158. Sec_HA4 0.3x0.45 metros 4Ø10

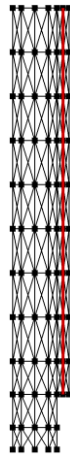


Figura 159. Ubicación Sec_HA4

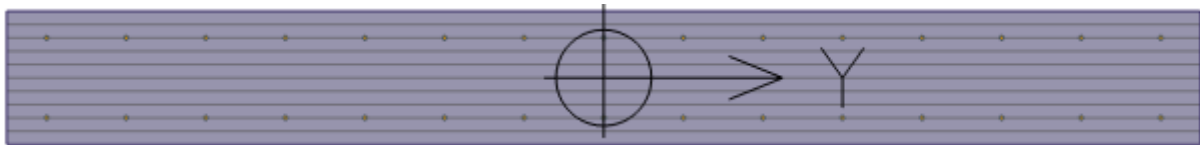


Figura 160. Sec_HA5 0.13x2.7 metros 30Ø10

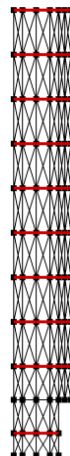


Figura 161. Ubicación Sec_HA5

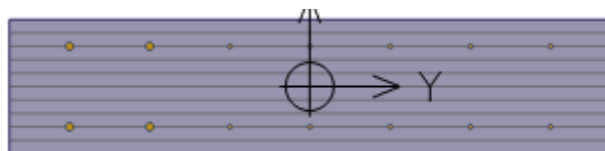


Figura 162. Sec_HA6.1 0.3x1.35 metros 10Ø10 y 4Ø18

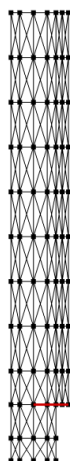


Figura 163. Ubicación Sec_HA6.1

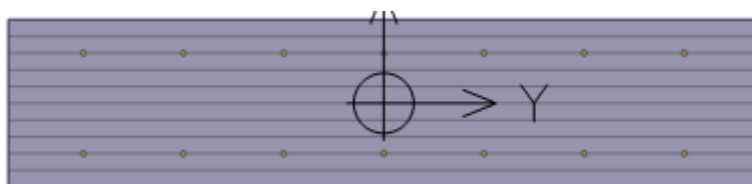


Figura 164. Sec_HA6.2 0.3x1.35 metros 14Ø10

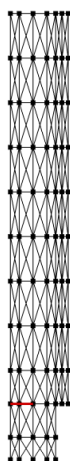


Figura 165. Ubicación Sec_HA6.2

A continuación, se presenta una tabla con los b_{eff} calculados para el Muro 2.2.

Tabla 11. Secciones diagonales Muro 2.2

Sección	B_{eff} [m]	Espesor [m]
A1	0.484	0.3
A2	0.515	0.3
A3	0.524	0.3
A4	0.695	0.3
A5	0.789	0.3
A6	0.759	0.3
A7	0.352	0.3
A8	0.376	0.3

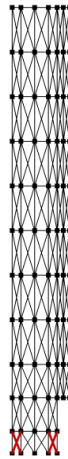


Figura 166. Ubicación secciones A1

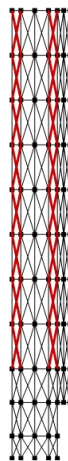


Figura 167. Ubicación secciones A2

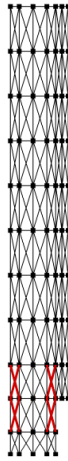


Figura 168. Ubicación secciones A3

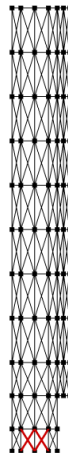


Figura 169. Ubicación secciones A4

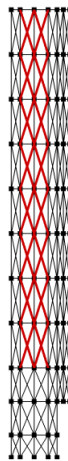


Figura 170. Ubicación secciones A5

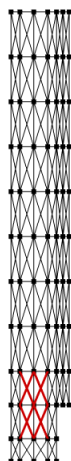


Figura 171. Ubicación secciones A6

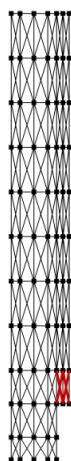


Figura 172. Ubicación secciones A7

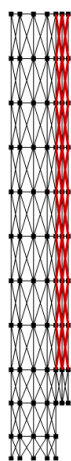


Figura 173. Ubicación secciones A8

8.2.3 Muro 2.3

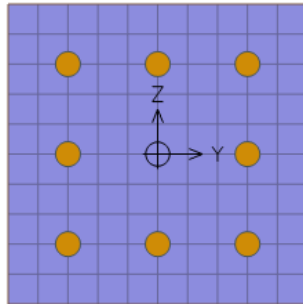


Figura 174. Sec_HA1 (Confinado) 0.3x0.3 metros 8Ø25



Figura 175. Ubicación Sec_HA1 (Confinado)

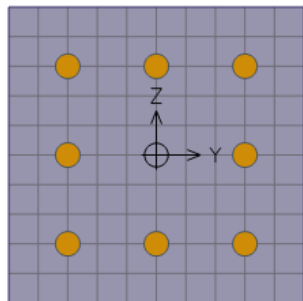


Figura 176. Sec_HA1 (No confinado) 0.3x0.3 metros 8Ø25

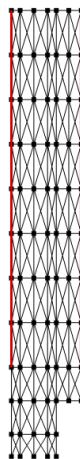


Figura 177. Ubicación Sec_HA1 (No confinado)

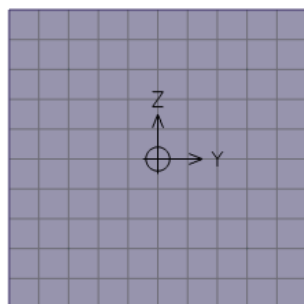


Figura 178. Sec_HA1_1 0.3x0.3 metros 4Ø1 (Dummy Fibers)

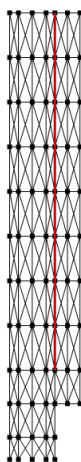


Figura 179. Ubicación Sec_HA1_1

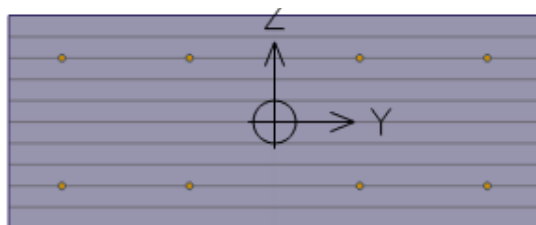


Figura 180. Sec_HA2 0.3x0.75 metros 8Ø10

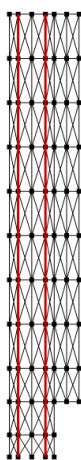


Figura 181. Ubicación Sec_HA2

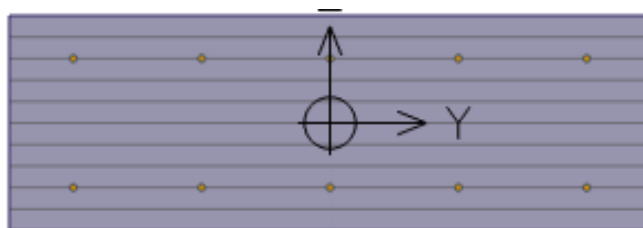


Figura 182. Sec_HA3 0.3x0.9 metros 10Ø10

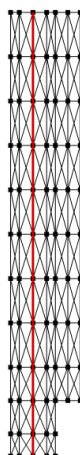


Figura 183. Ubicación Sec_HA3

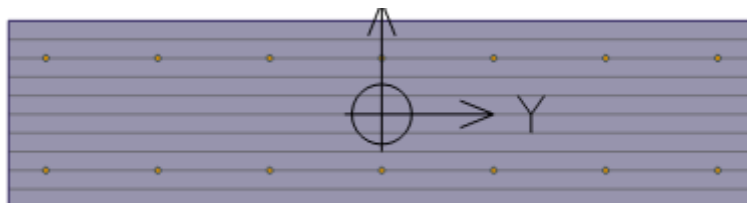


Figura 184. Sec_HA4 0.3x1.2 metros 14Ø10

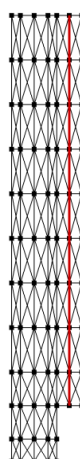


Figura 185. Ubicación Sec_HA4

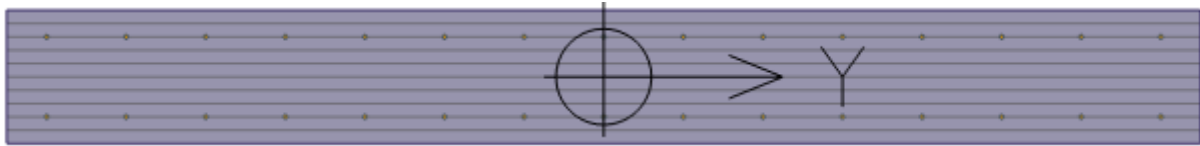


Figura 186. Sec_HA5 0.13x2.7 metros 30Ø10

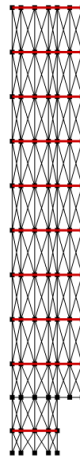


Figura 187. Ubicación Sec_HA5

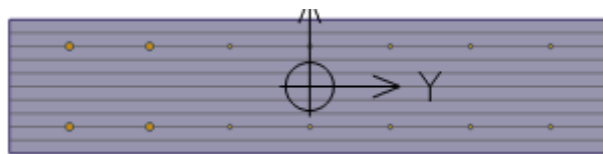


Figura 188. Sec_HA6.1 0.3x1.35 metros 10Ø10 y 4Ø18



Figura 189. Ubicación Sec_HA6.1

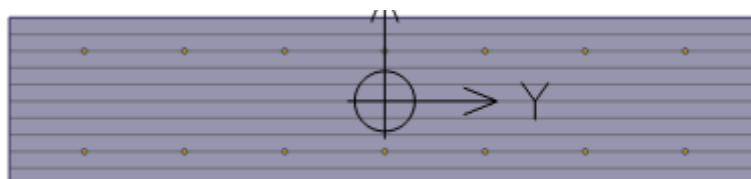


Figura 190. Sec_HA6.2 0.3x1.35 metros 14Ø10

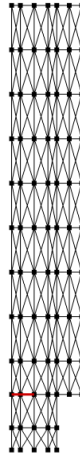


Figura 191. Ubicación Sec_HA6.2

A continuación, se presenta una tabla con los b_{eff} calculados para el Muro 3.3.

Tabla 12. Secciones diagonales Muro 3.3

Sección	B_{eff} [m]	Espesor [m]
A1	0.484	0.3
A2	0.515	0.3
A3	0.524	0.3
A4	0.695	0.3
A5	0.789	0.3
A6	0.759	0.3
A7	0.693	0.3
A8	0.744	0.3



Figura 192. Ubicación secciones A1

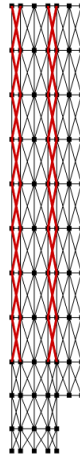


Figura 193. Ubicación secciones A2



Figura 194. Ubicación secciones A3



Figura 195. Ubicación secciones A4

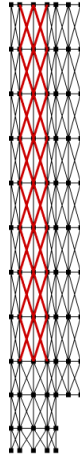


Figura 196. Ubicación secciones A5



Figura 197. Ubicación secciones A6



Figura 198. Ubicación secciones A7

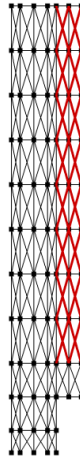


Figura 199. Ubicación secciones A8