



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Análisis de desempeño estructural de muros de hormigón armado de sección T reforzados con tubos de acero en elemento de borde

Memoria de Título presentada por

Diego Antonio Figueroa Quevedo

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gastón Fernando Cornejo

Agosto de 2021



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

Análisis de desempeño estructural de muros de hormigón armado de sección T reforzados con tubos de acero en elemento de borde

AUTOR:

Diego Antonio Figueroa Quevedo

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Prof. Guía

Gastón Fernandois Cornejo

Nombre Miembro 1 Comisión

Claudio Sepúlveda Contreras

Santiago, Chile, agosto de 2021

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO DE SECCIÓN T REFORZADOS CON TUBOS DE ACERO COMO ELEMENTO DE BORDE

Diego Antonio Figueroa Quevedo¹, Gastón Fernando Cornejo²

1 Universidad Técnica Federico Santa María

2 Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Este trabajo consiste en el análisis numérico del comportamiento estructural de muros de hormigón armado de sección T con elemento de borde compuesto. La geometría de los muros de sección T genera problemas de ductilidad en un sentido de carga (compresión en el alma), debido a la reducida área de hormigón que aporta en la resistencia a compresión, pudiendo incurrir en fallas de carácter frágil. Este tipo de falla puede ser evitado por medio de la incorporación de elementos que otorguen ductilidad y capacidad de deformación al muro. En este caso específico, se concede mediante la inclusión de un perfil de acero en el elemento de borde, dando origen así a elementos de borde compuesto, cuyo comportamiento se analiza en esta investigación en términos de resistencia, ductilidad y capacidad de deformación. Contemplando la problemática presentada, esta investigación se enfoca en el análisis y evaluación del mejoramiento del comportamiento estructural de muros de hormigón armado de sección T, mediante la inclusión de un perfil de acero de sección circular en el elemento de borde del alma, con la finalidad de incrementar la ductilidad y evitar comportamiento frágil en este tipo de muros. El análisis se realizó a partir de simulación numérica en el software de elementos finitos OpenSees, en donde se desarrollaron dos modelos: el primero corresponde a un modelo numérico simplificado del espécimen TW2 del estudio realizado por Thomsen & Wallace (1995), el cual se utilizó para la validación de resultados de la simulación numérica; y el segundo corresponde al modelo anteriormente mencionado, con una modificación en el elemento de borde: la eliminación de las barras de acero longitudinales y la inclusión de un tubo de acero como refuerzo en la dirección vertical.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que, al incluir el elemento de borde compuesto, aumenta la capacidad de resistencia lateral y la resistencia a momento, se incrementa la capacidad de disipación de energía e incrementa levemente la capacidad de deformación global del muro.

1. Introducción

Los distintos elementos estructurales de hormigón armado (HA) son diseñados para resistir diversas cargas y combinaciones de éstas: cargas gravitacionales, de viento, de nieve, sísmicas, entre otras. Para lograr la resistencia requerida por estas solicitaciones, se combinan las propiedades del hormigón y del acero, de modo de obtener la resistencia del hormigón en compresión y del acero en tracción.

Ciertas zonas de los elementos estructurales de HA requieren de una concentración de refuerzo de acero debido a que estas incurren en mayores solicitaciones debido a la geometría. Estas concentraciones de refuerzo se dan, por lo general, en los extremos libres en el caso de los muros y son denominadas elemento de borde.

Los elementos de borde son diseñados en la práctica utilizando barras de refuerzo longitudinal y estribos de confinamiento (refuerzo convencional), acorde a guías de diseño. Diversos autores han estudiado el comportamiento de la utilización de distintos perfiles de acero como refuerzo en el elemento de borde debido a que mejoran el desempeño ante solicitaciones sísmicas (Zhang et al. (2016)), aumentan la resistencia lateral, capacidad de deformación y disipación de energía (Wu et al. (2018) y Qian et al. (2012)). Los elementos de borde antes mencionados se han denominado elementos de borde compuestos.

Algunos elementos de HA de geometría asimétrica responden de distinta manera dependiendo de la dirección de carga, pudiendo causar fallas indeseadas o comportamiento frágil. Dentro de los elementos

que cuentan con estas características se encuentran los muros de hormigón armado no planos. Este tipo de muros se diferencian en la geometría de su sección transversal, la cual no es rectangular, a diferencia de muros de HA planos. En elementos de este tipo, a pesar de obtenerse las propiedades combinadas del hormigón en compresión y el acero de refuerzo en tracción, se da el caso en donde la respuesta a flexo compresión es deficiente en uno de los sentidos de carga, debido al área de hormigón que aporta en la resistencia a compresión. Dentro de los muros estructurales de HA más utilizados se encuentran los muros de sección transversal T. Estos muros incurren en comportamientos poco dúctiles en su dirección débil de carga (compresión del alma), generándose fallas de aplastamiento de hormigón en elementos de borde, pérdida de estabilidad en el alma en compresión y aplastamiento de alma (Zhang & Li, 2014).

1.1 Comportamiento estructural de muros no planos

A pesar de que los muros no planos son frecuentemente utilizados en edificios, no existe una gran cantidad de estudios respecto a estos elementos y su respuesta ante solicitaciones sísmicas. En cuanto a los estudios realizados, Behrouzi et al. (2015) en su resumen de testeos de muros no-planos de hormigón reforzado de gran-escala, identifican tres mecanismos primarios de falla bajo cargas cíclicas, identificados como falla en pandeo (*buckling-rupture failure*), falla de aplastamiento y pandeo en elemento de borde (*crushing-buckling*) y falla en compresión por cizalle (*shear-compression*). Además, identifican tres mecanismos de falla secundarios; falla efecto marco (*framing-action*), deslizamiento (*sliding*) y falla de confinamiento. Éstos últimos se desarrollan como consecuencia de las fallas primarias y contribuyen a la pérdida de rigidez y resistencia del elemento estructural.

De los mecanismos de falla primarios antes mencionados, la falla en pandeo (*buckling-rupture failure*) se caracteriza por el pandeo global del muro y posterior ruptura de las barras de refuerzo longitudinal de los elementos de borde, bajo compresión generada por flexión. Este tipo de falla fue reportada en los estudios experimentales realizados por Ile & Reynouard (2005), en donde tres muros de HA con sección transversal U, fueron sometidos a cargas unidireccionales (especímenes IleX e IleY) y carga multidireccional (IleXY). En el caso de los especímenes IleX e IleXY, se observó pandeo por compresión y posterior ruptura de las barras en tracción al cambiar el sentido de carga. El tercer muro ensayado, IleY, presentó pérdida de confinamiento en el extremo de un ala debido a ruptura de estribos de confinamiento, y las barras del elemento de borde sufrieron pandeo y posterior ruptura al ser sometidas a tracción en el cambio de dirección de la carga.

Por otra parte, la falla en compresión por cizalle (*shear compression*) ocurre cuando existe aplastamiento del hormigón en la zona entre los elementos de borde, generalmente en muros con alta demanda de corte, en el cual se desarrollan diagonales en compresión en el alma del muro y resultan en pérdida de recubrimiento y aplastamiento del hormigón en las zonas comprimidas, generalmente entre elementos de borde. Oesterle et al. (1976) ensayaron dos muros de sección transversal H, sometiéndolos a una carga axial equivalente al 7% de su resistencia característica y alta demanda de corte ($V_{max}/V_n = 1.02$ y 1.19), observando en ambos muros aplastamiento de hormigón no confinado en el alma, generado por diagonales en compresión.

El tercer mecanismo principal de falla observado en muros no planos de HA, aplastamiento y pandeo en elemento de borde (*crushing-buckling*), está caracterizado por el aplastamiento del hormigón en el núcleo de hormigón confinado y pandeo del refuerzo longitudinal en elementos de borde. Este último tipo de falla se observa principalmente en muros de sección transversal L y T. En el caso de muros de sección T, Thomsen & Wallace (1995) ensayaron dos muros con dicha sección transversal (especímenes TW1 Y TW2) observando falla frágil con repentina pérdida de recubrimiento y pandeo de barras longitudinales principalmente en elementos de borde, en el caso de muro TW1 y pandeo global debido a inestabilidad fuera del plano en el elemento de borde del alma del muro TW2.

Lo mencionado anteriormente indica que muros no planos podrían, en ciertas ocasiones, presentar una reducida capacidad de deformación y, por ende, este tipo de muros podrían exhibir problemas de

ductilidad principalmente en la dirección de carga débil. Esto se debe a que el área de hormigón que aporta en la respuesta a la compresión es menor, en comparación al área que aporta en el sentido de carga fuerte. Este problema puede llevar a la necesidad de rediseñar el elemento, de manera de aumentar el área del alma que aporta en la resistencia a compresión, lo cual puede generar discrepancias con el diseño arquitectónico.

1.2 Muros no planos de hormigón armado de sección T

Los muros de HA de sección T se utilizan normalmente como parte del sistema de resistencia de cargas laterales de los edificios. Estos elementos, debido a su geometría, incurren en comportamientos poco deseados en su dirección débil, es decir, cuando el ala del muro se somete a tracción, generándose fallas de aplastamiento de hormigón en elementos de borde, pérdida de estabilidad en el alma en compresión y aplastamiento de alma (Zhang & Li, 2014).

A pesar de existir recomendaciones para mejorar el comportamiento de muros de HA de sección T (Brueggen, 2009), existe poca investigación respecto a la diferencia en el comportamiento de muros de hormigón no planos con refuerzo no convencional, en específico, sobre la incidencia de este tipo de refuerzo en la capacidad de disipación de energía, resistencia lateral y capacidad de deformación de este tipo de muros.

1.3 Comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados con tubos de acero

1.3.1. Tubos de acero rellenos de hormigón (*Concrete Filled Steel Tube*, CFST)

Las columnas de HA son elementos sometidos a cargas de flexo-compresión, y sus principales modos de falla ante cargas cíclicas son: falla por flexión, falla por corte y falla por interacción flexión-corte (Ying & Jin-Xin, 2018). Para retardar la aparición de estas fallas, se ha estudiado otro tipo de sección compuesta para columnas: columnas hechas de tubos de acero rellenas con hormigón, o en inglés, *Concrete-Filled Steel Tubes* (CFST).

Seis elementos viga-columna CFST, fueron analizados por Elremaily & Azizinamini (2002). El diámetro exterior de los tubos de acero utilizados en dicho estudio es de 324mm y cuentan con un espesor de 6.4mm o 9.5mm. La Figura 1 muestra el esquema de configuración de testeo de las columnas ensayadas. Este estudio reportó mejoras en niveles de disipación de energía y ductilidad, al someter los elementos a carga axial y carga cíclica lateral.

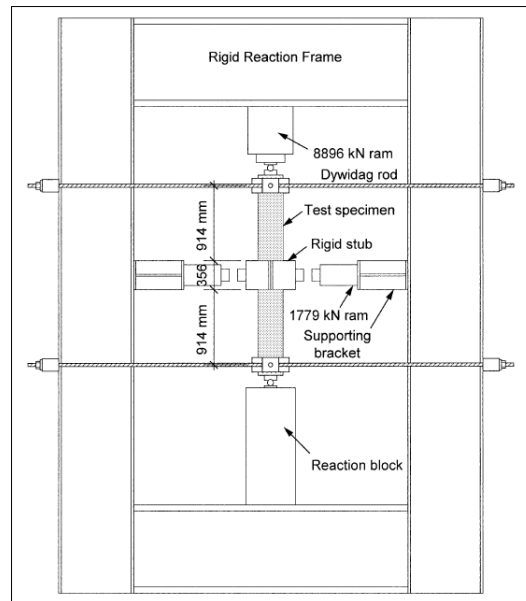


Figura 1: Esquema de configuración de testeo de columnas CFST. Recuperado de Elremaily & Azizinamini (2002).

Las columnas CEST aumentan su capacidad de deformación y de disipación de energía, minorizando el riesgo de sufrir fallas de tipo frágil. Este tipo de comportamiento es ideal para elementos sismo-resistentes, ya que evidencian la falla previa al colapso.

1.3.2. Tubos de acero con relleno y recubrimiento de hormigón (*Concrete Encased-and-filled Steel Tubes, CEST*)

Otro tipo de columna con refuerzo de acero no tradicional ha sido estudiada por Lee et al. (2019). El trabajo desarrollado por estos autores consta de un análisis del comportamiento a compresión de columnas compuestas por tubos circulares de acero de alta resistencia con relleno y revestimiento de hormigón (*Concrete Encased-and-filled Steel Tubes, CEST*). Las columnas ensayadas cuentan con refuerzo longitudinal compuesto por el tubo de acero y barras de acero posicionadas alrededor del tubo, de manera de que en la sección transversal se observa el tubo circular en medio de una formación de barras longitudinales con disposición cuadrada. Las barras longitudinales tienen como propósito dar soporte al refuerzo transversal (estribos de confinamiento). Los especímenes ensayados son seis, de los cuales cinco fueron cargados a compresión excéntrica y uno fue sometido a carga axial concéntrica, considerando como parámetros de prueba: (i) la excentricidad de la carga aplicada; (ii) el espaciamiento de refuerzo transversal; y (iii) el uso de revestimiento de hormigón.

La Figura 2 muestra la configuración de testeo de las columnas CEST ensayadas por Lee et al. (2019), para el caso de carga excéntrica y carga concéntrica.

Los resultados obtenidos permitieron la obtención de las siguientes conclusiones.

- A pesar de observarse agrietamiento prematuro en la cara comprimida de las columnas, El revestimiento de hormigón contribuyó significativamente a la rigidez y resistencia de las columnas CEST.

- Al reducir el espaciamiento de los estribos desde $b_c/2$ a $b_c/4$, con b_c equivalente al ancho de la sección de la columna, el agrietamiento del revestimiento fue retrasado y la resistencia máxima se incrementó levemente. En rango inelástico, el efecto del espaciamiento del refuerzo transversal fue limitado.
- Las resistencias máximas de los elementos CEST fue comparada con la predicha por códigos de diseño AISC 360-16 (American Institute of Steel Construction, 2016), EC 4 (European Committee For Standardization, 1994) y AIJ SRC (Architectural Institute of Japan, 2014). La resistencia a flexo-compresión fue predicha de manera razonable por el método de compatibilidad de deformaciones.
- En general, el comportamiento de los elementos CEST fue verificado mediante un análisis de modelo de fibras no-lineales. Los resultados mostraron que, en la carga máxima, la contribución del revestimiento de acero fue de aproximadamente 30%. La retención de la resistencia posterior a la carga máxima se le atribuye a la contribución del núcleo de hormigón confinado.

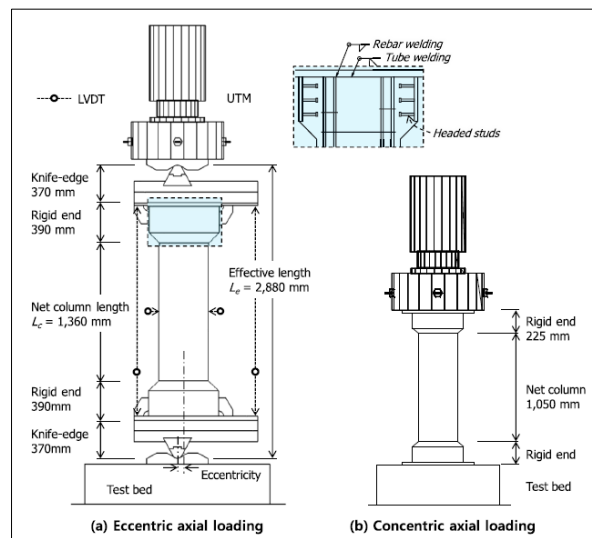


Figura 2: Configuración de testeo de columnas CEST, para (a) carga axial excéntrica y (b) carga axial concéntrica. Recuperado de Lee et al. (2019).

Por otra parte, Han & An (2014) analizaron el comportamiento bajo carga axial de columnas de hormigón de sección cuadrada reforzadas con tubos de acero ubicados en el centro de la columna, los cuales a su vez se encontraban rellenos de hormigón. El análisis se llevó a cabo mediante método de elementos finitos concluyendo que la resistencia del núcleo de hormigón aumenta debido al confinamiento otorgado por el tubo de acero. La vista esquemática y sección transversal del modelo de elementos finitos desarrollado por los autores se muestra en la Figura 3.

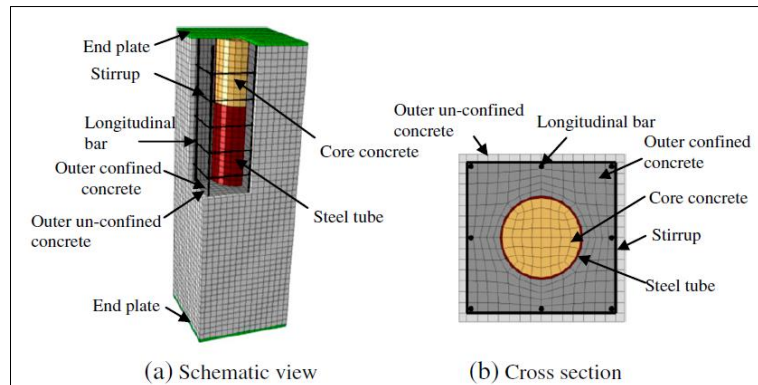


Figura 3: Vista esquemática de la columna (a) y sección transversal (b) del modelo de elementos finitos desarrollado por Han & An. Recuperado de Han & An (2014).

El comportamiento de columnas de HA reforzadas con perfiles tubulares de acero mejora debido al confinamiento que otorga dicho perfil al hormigón del núcleo, aumentando la capacidad de carga del elemento. Lo anterior supone una ventaja que podría extrapolarse al diseño de otro tipo de elementos estructurales, tales como muros de corte.

1.4 Muros planos de hormigón armado con refuerzo no tradicional

Aunque existe escasa literatura respecto a muros no planos con refuerzo no tradicional de acero, algunos autores han estudiado la inclusión de elementos de borde con tubos de acero embebidos en muros planos. Entre estas investigaciones se encuentra la realizada por Zhang et al. (2016) en donde se realizaron ensayos de carga axial y carga cíclica sobre tres muros de corte de sección rectangular, de iguales dimensiones y distinto refuerzo. Las dimensiones de altura y espesor de la sección de los muros son 1200mm y 150mm, respectivamente, con una altura total del muro de 2320mm. La configuración de testeo de los muros ensayados se muestra en la Figura 4.

El primer espécimen ensayado (HW-1) cuenta con refuerzo tradicional en sus elementos de borde, mientras que los dos restantes (STHW-2 y STHW-3) cuentan con elementos de borde reforzados con dos tubos de acero en cada extremo del muro. La finalidad de los autores al incluir dichos tubos de acero en los elementos de borde es mejorar la capacidad de deformación de los muros. Las cargas axiales aplicadas sobre el muro HW-1 y el muro STHW-2 son de 1400kN, mientras que el muro STHW-3 fue cargado axialmente con 1700kN.

Todos los muros fueron sometidos a cargas laterales cíclicas y los resultados obtenidos permitieron concluir que:

1. El mecanismo de falla en los muros STHW-2 y STHW-3 es falla por flexión, en donde se observó fluencia de los tubos de refuerzo y aplastamiento del hormigón en la zona de compresión
2. La capacidad de resistencia decrece ligeramente para el muro STHW-2 en comparación al muro HW-1
3. El uso de tubos como refuerzo en elementos de borde incrementa la capacidad de deformación y disipación de energía
4. El desplazamiento lateral máximo y disipación de energía en el caso de muro reforzado con CFST (STHW-2) son mayores en un 27% y 81%, respectivamente, en relación a los valores obtenidos para el muro con refuerzo tradicional
5. Los tubos de acero confinan el hormigón de alta resistencia, mejorando la resistencia lateral y ductilidad, y, por ende, mejorando el comportamiento sísmico del elemento.

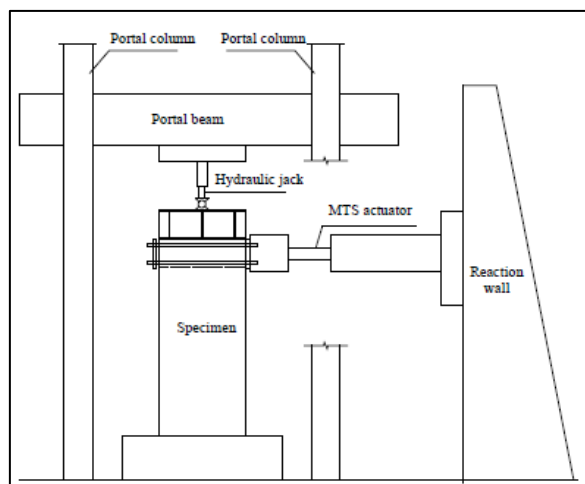


Figura 4: Configuración de testeo experimental de muros de corte reforzados con tubos de acero.

Recuperado de Zhang et al. (2016).

Por otra parte, los estudios realizados por Wu et al. (2018) y Qian et al. (2012), concluyen que el uso de tubos de acero embebidos y rellenos de hormigón como refuerzo en elemento de borde puede incrementar la resistencia lateral, capacidad de deformación del muro, resistencia residual post-falla, disipación de energía, carga de fluencia, máxima resistencia lateral y carga de agrietamiento en muros planos, respecto a muros planos con refuerzo de barras de acero en la dirección longitudinal. Las Figuras Figura 5 y Figura 6 muestran diferencias en el comportamiento de muros planos con refuerzo tradicional y refuerzo de tubos de acero embebidos en el elemento de borde. En la Figura 5 se muestra el comportamiento histerético del espécimen WSL-0 (izquierda), correspondiente a un muro plano de hormigón armado con refuerzo convencional en el elemento de borde; mientras que el espécimen WSL-1 (derecha) corresponde al mismo muro, con idéntico elemento de borde, pero además incluye un tubo de acero embebido dentro del elemento de borde original. En el caso de la Figura 6, se pueden observar dos gráficos; a la izquierda se encuentra el comportamiento histerético del muro SW1, correspondiente a un muro de HA con refuerzo tradicional, y a la derecha se puede observar el gráfico de comportamiento histerético del muro SW2, cuyo refuerzo longitudinal en el elemento de borde es un tubo de acero embebido.

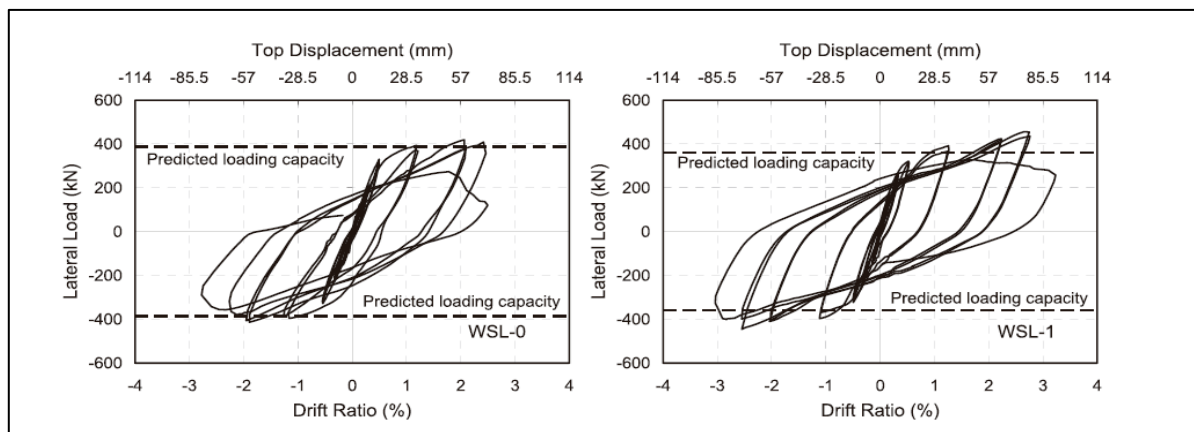


Figura 5: Resultados experimentales de comportamiento de especímenes WSL-0 y WSL-1. Recuperado de Wu et al. (2018).

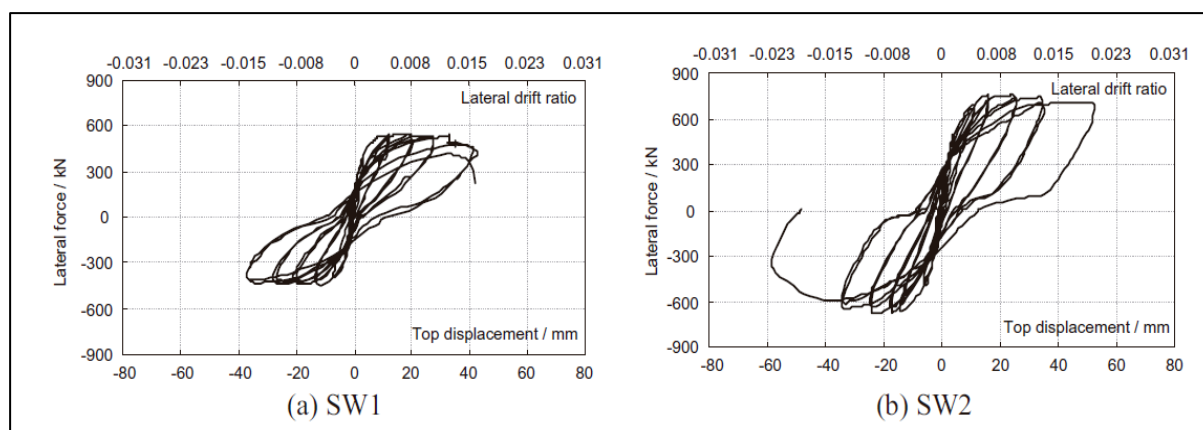


Figura 6: Resultados experimentales de comportamiento histerético de muros SW1 y SW2. Recuperado de Qian et al. (2012).

Las ventajas obtenidas de la inclusión de perfiles de acero en muros planos son convenientes en el diseño de muros no planos, de forma de evitar incurrir en comportamiento frágil. Por ejemplo, el aumento en capacidad de disipación de energía y capacidad de deformación permitiría evitar falla de aplastamiento y pandeo en elemento de borde en muros de sección T.

1.5 Modelamiento de elementos finitos en OpenSees

1.5.1. Modelamiento de elementos finitos de muros no planos

El modelamiento de muros no planos de HA y la obtención de la respuesta de éstos ante distintos tipos de cargas es una tarea desafiante, que se ha intentado resolver utilizando seis principales tipos de modelamiento: (1) modelos de elementos viga-columna de sección de fibra (*fiber-section beam-column element models*); (2) modelos de columna ancha (*wide column models, equivalent frame models*); (3) modelos de enrejados bi-dimensionales (*two-dimensional truss models*); (4) modelos de enrejado tri-dimensionales (*three-dimensional truss models*); (5) modelos con vigas y enrejados; y (6) modelos de elementos finitos (Lu & Panagiotou, 2014).

En particular, Lu & Panagiotou (2014) desarrollaron el modelamiento no-lineal viga-enrejado (*nonlinear beam-truss modelling*) para muros de HA no planos sometidos a cargas cíclicas y compararon los resultados obtenidos de la modelación numérica con resultados experimentales de tres casos estudio: (1) Thomsen & Wallace (1995), (2) Beyer et al. (2008), y (3) Oesterle et al. (1976).

El caso estudio número uno (Thomsen & Wallace, 1995) consideró un muro de HA no plano de sección T con una relación de esbeltez de $M/VL_w = 3$, en donde M es el momento en la base, V la fuerza de corte en la base, y L_w la longitud del muro en la dirección de carga. La longitud tanto del alma como del ala del muro estudiado es de 1219 milímetros, contando con un espesor de alma y ala de 102 milímetros. La escala del muro es 1:4 y fue seleccionada en base a la capacidad de los actuadores hidráulicos disponibles para el ensayo y la limitación de altura de la configuración de testeo. La carga axial, cuyo valor se mantuvo constante, se aplicó en el centroide de la sección transversal del muro y su valor equivale a $0.074f'cA_g$, en donde $f'c$ corresponde a la resistencia a compresión del hormigón y A_g es el área bruta de la sección.

El trabajo de Beyer et al. (2008) (caso estudio número dos) estudia la respuesta de un muro de HA no plano de sección U con $M/VL_w = 2.8$ en dirección paralela al alma y $M/VL_w = 2.6$ en la dirección paralela a las alas. Las dimensiones de dicho espécimen son: 1300 milímetros de longitud de alma, 1050 milímetros de longitud de ambas alas y 100 milímetros de espesor, tanto para alma como alas. Este muro ensayado corresponde a un modelo de escala 1:2 de un muro prototipo de eje de elevador. La carga axial aplicada tiene un valor constante de $0.04f'cA_g$ y se aplicó a través de una viga de acero paralela al alma, pasando por el centroide de la sección.

El caso estudio número tres (Oesterle et al., 1976) consideró un muro no plano de HA de sección I con $M/VL_w = 2.4$. La longitud de las alas es de 914mm mientras que la longitud del alma es de 1905mm y cuenta con un espesor uniforme de 102mm, y corresponde a una representación aproximada de escala 1:3 de un muro de tamaño real. El espécimen fue sometido a carga uniaxial en la dirección del alma, sin aplicar carga axial sobre el muro.

Para llevar a cabo el análisis de los tres casos estudio mencionados anteriormente, los autores utilizaron el software OpenSees (Pacific Earthquake Engineering Research Center, n.d.), y compararon las respuestas en términos de fuerza lateral-desplazamiento lateral, y deformación en áreas localizadas, considerando la interacción flexión-cortante (*flexure-shear interaction*, FSI) y el tamaño de malla (*mesh size*) utilizado.

Los modelos desarrollados en OpenSees utilizan elementos viga de sección de fibra no-lineales Euler-Bernoulli (*nonlinear Euler-Bernoulli fiber-section beam*) en la dirección vertical, elementos barra (enrejado) no lineales (*nonlinear truss elements*) paralelos a vigas lineales en la dirección horizontal, y elementos barra no lineales (*nonlinear truss elements*) en las direcciones diagonales.

Los resultados obtenidos por Lu & Panagiotou (2014) permitieron la obtención de las siguientes conclusiones relevantes para la presente investigación:

- El modelo representa de buena manera los efectos de interacción flexión – corte (*flexure shear interaction*, FSI) al calcular los esfuerzos y deformaciones del acero y hormigón en las direcciones vertical, horizontal y diagonal, y considerando el efecto de la deformación por tracción normal en el comportamiento a compresión del hormigón en la dirección diagonal.
- Los modelos viga-enrejado (*beam-truss*) modelaron satisfactoriamente la respuesta post agrietamiento de fuerza cíclica-desplazamiento para los tres casos. Las fuerzas laterales máximas computadas tuvieron valores de entre 0.92 y 1.1 veces los valores medidos experimentalmente para los tres casos.
- El refinamiento de la malla (*mesh refinement*) mostró resultados más precisos en el caso de deformaciones (respuestas locales). Los autores creen que la obtención de deformaciones es más sensible a parámetros del modelo que la respuesta fuerza lateral-desplazamiento.
- Para el muro de sección T, se calcularon fuerzas laterales máximas de 1.05 y 1.01 veces la respuesta experimental medida, en el caso de ala en tracción.

Adicionalmente, el elemento SFI-MVLEM desarrollado por Kolozvari et al. (2019) es capaz de predecir de buena manera el comportamiento global de carga-deformación, comportamiento inelástico en corte, interacción de deformaciones no lineales por flexión y corte, así como respuestas locales (deformaciones unitarias, rotaciones) bajo condiciones de carga lateral cíclica. Este elemento tiene dos desventajas; (1) el modelo no es aplicable a muros con relación de esbeltez menor a 1.0, debido a supuestos realizados en la formulación del modelo, y (2) el modelo está basado en un elemento viga-columna bi-dimensional de dos nodos, con lo cual no puede ser utilizado para predecir el comportamiento de muros no-planos sometidos a cargas multi-direccionales. El estudio llevado a cabo en este trabajo considera cargas cíclicas unidireccionales, aplicadas de forma paralela al alma del muro y un muro con relación de esbeltez mayor a 1.0, lo cual permite utilizar este tipo de elementos para la modelación.

El elemento SFI-MVLEM se compone de macro fibras orientadas en la dirección vertical, a las cuales se les asignan propiedades del comportamiento del concreto reforzado, el cual esta descrito por el modelo de puntal de ángulo fijo (*Fixed-Strut Angle Model*, FSAM). Este modelo representa una relación constitutiva bi-dimensional que relaciona el campo de deformaciones impuesto al panel (macro-fibra) de concreto reforzado y los esfuerzos que se desarrollan en el concreto y el acero de refuerzo. De esta manera, se logra captar la interacción de carga axial y flexión en cada una de las macro-fibras, permitiendo captar a su vez la interacción entre flexión y corte.

Las deformaciones axiales ε_y en cada panel son calculadas utilizando el supuesto de que secciones planas permanecen planas, y asumiendo que la rotación del elemento se concentra en un punto en el eje central del elemento a una altura relativa ch , como se puede observar en la Figura 7.

Las deformaciones axiales en dirección horizontal ε_x de cada panel de concreto reforzado se obtienen asumiendo que la suma de los esfuerzos horizontales asociados al acero de refuerzo y concreto es equivalente a cero. Esta suposición es incorporada al introducir grados de libertad (GDL) horizontales (δ_i) en cada macro fibra de modelo del elemento. Estos GDL son cinemáticamente independientes de los seis GDL ubicados en el extremo superior e inferior del elemento.

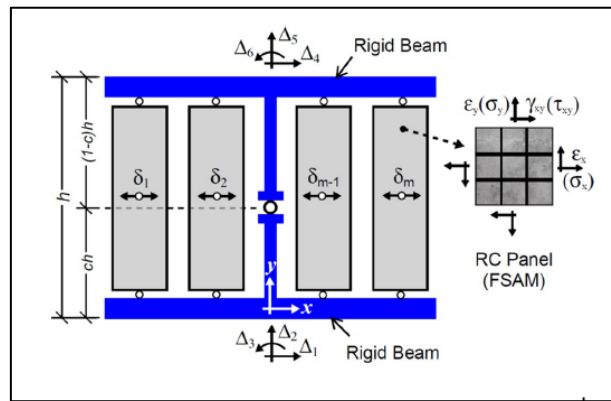


Figura 7: Esquema del elemento SFI_MVLEM. Recuperado de Kolovzari et al. (2015a).

Las deformaciones de corte son calculadas en los grados de libertad superiores e inferiores del elemento, y luego son transformadas a deformaciones por corte γ_{xy} en cada panel de concreto reforzado, asumiendo una distribución uniforme de deformaciones en la sección de muro.

Los antecedentes expuestos anteriormente dan cuenta de la capacidad de simular numéricamente el comportamiento de muros de hormigón armado no planos de forma adecuada, utilizando diversos elementos numéricos para formular los modelos. Ciertos elementos permiten obtener buenos resultados al modelar de mejor manera un tipo específico de muros, y en lo concerniente a esta investigación, se puede apreciar que el elemento SFI_MVLEM permite estimar la respuesta de muros de HA no planos de sección T.

1.5.2. Modelamiento de elementos finitos de muros planos con refuerzo no tradicional

La investigación llevada a cabo por Ji et al. (2015) estudia el comportamiento experimental y modelamiento de muros planos de hormigón armado. Los especímenes considerados son seis, de los cuales tres corresponden a muros con perfiles de acero abiertos embebidos: de sección I (SRCW1) y de sección C (SRCW2, SRCW3), utilizados como refuerzo en elemento de borde. Otros dos especímenes corresponden a muros reforzados con perfiles cerrados de acero de sección cuadrada (SRCW4) y sección circular (SRCW5). El ultimo espécimen analizado corresponde a un muro con refuerzo convencional en los elementos de borde (RCW1).

Para el modelamiento de los muros mencionados anteriormente, se utilizaron elementos shell de múltiples capas (*multi-layer shell elements*). Dichas capas representan el hormigón, las barras transversales y las barras longitudinales de refuerzo. El comportamiento del hormigón confinado y no confinado en el elemento de borde se modelaron mediante la definición de áreas con propiedades asignadas de concreto confinado o no confinado, según correspondiera, y para simular el comportamiento de los tubos de acero (en el caso del modelamiento de SRCW5), se utilizaron elementos barra equivalentes, con las propiedades de acero correspondientes. Esta forma de modelar el muro SRCW5 proporcionó resultados similares a los obtenidos a partir del ensayo experimental (ver Figura 9), obteniéndose errores de rigidez efectiva, carga lateral máxima y desplazamiento máximo de 9.2%, 1.1% y 4.7%, respectivamente. La representación gráfica del muro modelado por Ji et al. (2015) se muestra en la Figura 8, indicando las áreas de hormigón confinado, no confinado, y refuerzo de acero modelado como área equivalente.

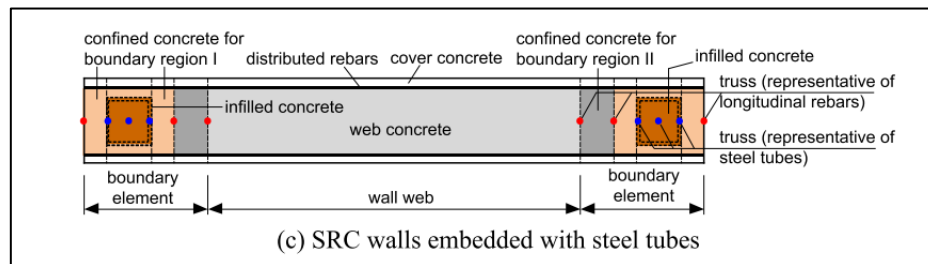


Figura 8: Representación de sección transversal del muro SRCW5. Recuperado de Ji et al. (2015)

Los resultados de comportamiento histerético obtenidos para el espécimen SRCW5 se muestran en la Figura 9, en donde en color rojo se pueden apreciar los resultados de la simulación numérica mediante método de elementos finitos, mientras que en color negro se encuentran graficados los resultados experimentales obtenidos en el ensayo de laboratorio.

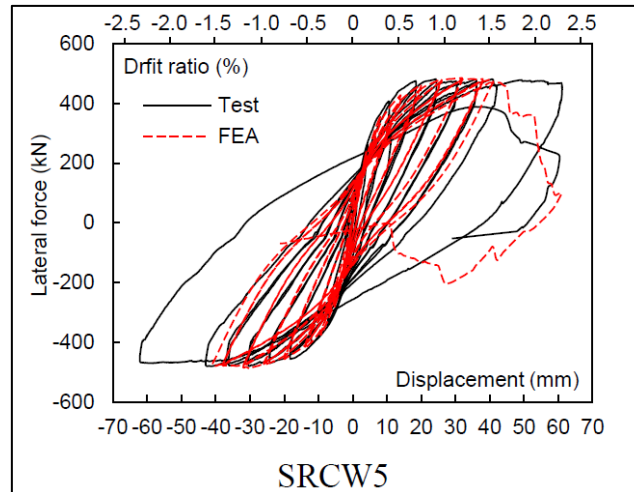


Figura 9: Resultados experimentales (en negro) y de simulación numérica mediante método de elementos finitos (en rojo) del espécimen SRCW5. Recuperado de Ji et al. (2015).

Los avances en modelación computacional mediante método de elementos finitos, los resultados y los comentarios expuestos anteriormente demuestran que en la actualidad se puede simular la respuesta de muros con refuerzo no convencional de buena manera.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de investigación es comparar la respuesta estructural ante cargas laterales cíclicas y carga axial constante, de un muro de sección T con refuerzo convencional (barras longitudinales y estribos como refuerzo transversal) y un muro de las mismas características reforzado con un tubo de acero embebido en el elemento de borde del alma, con la finalidad de analizar las ventajas obtenidas de utilizar refuerzo CEST en el diseño de muros estructurales sismo-resistentes de sección transversal asimétrica.

Para cumplir el objetivo principal de este trabajo de investigación, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los principales mecanismos de falla en muros estructurales de HA no planos con refuerzo tradicional
2. Definir los modelos (dimensiones y materiales) de los muros de sección T, implementarlos en OpenSees y llevar a cabo la simulación numérica
3. Realizar análisis y discusión de los resultados obtenidos en la simulación

3. Metodología

3.1 Definición del problema y oportunidad de investigación

Los temas tratados en la sección de Introducción evidencian problemas en el comportamiento de muros de HA no planos, en específico para muros con sección T, los cuales son afectados principalmente por falla tipo aplastamiento y pandeo en elemento de borde. Este tipo de falla se caracteriza por un bajo nivel de ductilidad, y corresponde a un comportamiento indeseado para diseños sismo-resistentes como los necesarios en nuestro país. A raíz de esto, y considerando los mejoramientos en cuanto a ductilidad y disipación de energía otorgados por refuerzos no tradicionales, como en el caso de elementos CFST y CEST y debido a la escasa investigación en el uso de este tipo de elementos de borde en muros no planos de HA, en este trabajo se analizó y comparó el comportamiento de muros de HA de sección T con

distintos tipos de refuerzo en el elemento de borde del alma (refuerzo convencional y perfil tubular de acero), mediante un análisis de elementos finitos.

La hipótesis en la cual se basa este trabajo de investigación es el mejoramiento del comportamiento estructural de muros de sección T reforzados con tubos de acero en el elemento de borde del alma, en comparación a muros de la misma geometría, con elementos de borde conformado por barras longitudinales y estribos de confinamiento. La comparación se realizará en términos de ductilidad y resistencia, ante cargas laterales cíclicas y carga axial constante.

Para efectuar el análisis propuesto se utilizó el software OpenSees, ya que a través de este programa se puede modelar de buena manera el comportamiento de los materiales y representar efectos de confinamiento y pérdida de resistencia debido a comportamiento histerético, además del comportamiento global fuerza – deformación de muros de hormigón armado. La implementación de los modelos se llevó a cabo mediante programación en lenguaje TCL y se simuló la respuesta de los muros ante sollicitación axial constante y carga lateral cíclica, la cual se modeló a través de la implementación de una rutina de desplazamientos en el extremo libre del muro.

3.2 Metodología

La metodología asociada al cumplimiento de los objetivos específicos definidos en la sección Objetivos, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Metodología

Objetivo Específico	Tareas	Herramientas
Identificar principales mecanismos de falla en muros estructurales de HA no planos	• Revisión literaria en muros no planos de HA • Recopilación de información relevante para el estudio	• Revisión literaria
Definir los modelos de muro, realizar modelación y simulación en OpenSees	• Revisión de modelamiento en OpenSees • Definición y elección de elementos para modelación de los muros en OpenSees • Programación en lenguaje TCL en OpenSees	• Revisión literaria • Estudio de modelos en OpenSees • Cypress OpenSees editor
Obtener resultados, realizar análisis y discusión de la modelación en OpenSees	• Recopilación de resultados • Generación de gráficos relevantes para el estudio • Análisis y discusión de los resultados obtenidos	• Cypress OpenSees editor • Matlab

En cuanto a la modelación en OpenSees, se tomó como ejemplo la modelación realizada por Kolozvari et al. (2015a) en su publicación en el sitio web de OpenSees “Example 1-SFI-MVLEM”. El modelo consideró los materiales y dimensiones del muro de sección T (espécimen TW2) ensayados por Thomsen & Wallace (1995).

3.2.1. Especímen considerado para calibración del modelo de muro con refuerzo tradicional y validación de resultados simulados

El modelo escogido para la calibración del modelo numérico del muro de HA con refuerzo tradicional corresponde al muro TW2 estudiado experimentalmente por Thomsen & Wallace (1995). Dicho

espécimen cuenta con una sección transversal T, cuyas dimensiones son 44 pulgadas (1118mm) de longitud del alma y 48 pulgadas (1219mm) de longitud del ala, contando con un espesor uniforme de 4 pulgadas (102mm), como se muestra en la Figura 12. El plano de diseño se muestra en la Figura 10, en donde se puede apreciar el refuerzo transversal y longitudinal del espécimen. La altura total del muro TW2 ensayado es de 144 pulgadas (3658mm) y la configuración de testeo se muestra en la Figura 13.

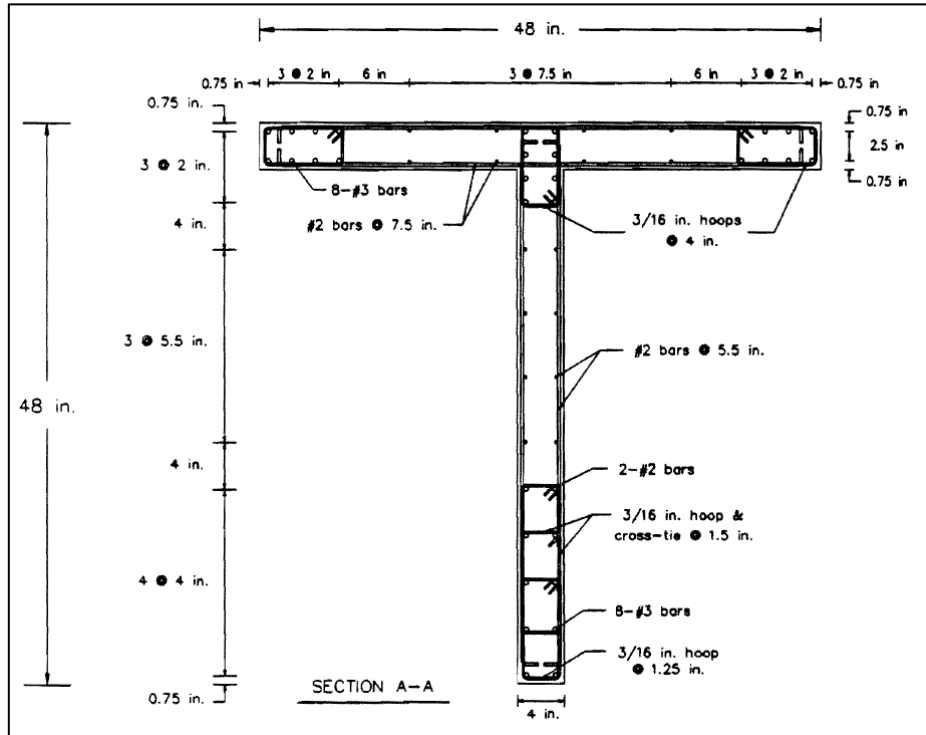


Figura 10: Sección transversal en la base del muro TW2. Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

Tomando el caso estudio correspondiente al muro TW2 de Thomsen & Wallace (1995), se validaron los resultados de la simulación de la respuesta en OpenSees de este muro al ser sometido a la secuencia de desplazamientos que se muestran en la Figura 11. Por otra parte, los resultados numéricos obtenidos al someter el muro con refuerzo de tubos de acero en el elemento de borde a la misma secuencia de drift lateral, fueron comparados con aquellos datos experimentales reportados para el muro con refuerzo convencional.

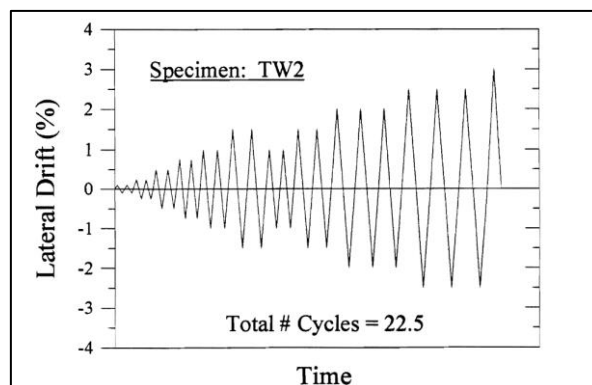


Figura 11: Rutina de drift lateral aplicada al muro TW2. Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

El espécimen TW2 fue sometido a la rutina de drift lateral mostrada en la Figura 11, imponiendo desplazamientos en la parte superior del muro mediante el actuador hidráulico mostrado en la configuración de testeo (Figura 13).

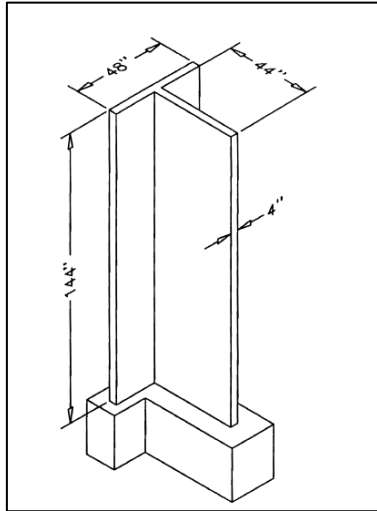


Figura 12: Vista 3D y dimensiones del muro TW2. Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

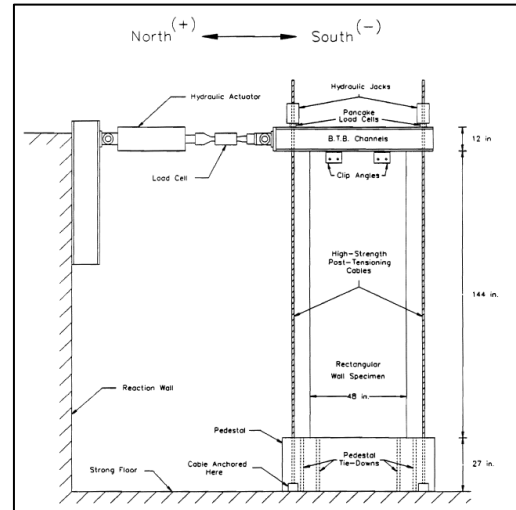


Figura 13: Configuración de testeo de los muros del estudio para validación de resultados. Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

Las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del espécimen TW2 fueron reportadas en el estudio de Thomsen & Wallace (1995), en donde se especifica que el valor de diseño de la resistencia a compresión del hormigón es de 4.0psi. Sin embargo, en el mismo estudio se señala el valor de la resistencia a compresión en la fecha de testeo del espécimen, en cinco niveles en la altura del muro. Estos valores se muestran en la Figura 14, en donde se muestra la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días de curado, la resistencia a compresión el día en que se efectuó el testeo y la resistencia de ruptura el día de testeo.

Specimen	Story Level	Comp. Strength at 28 Days (psi; MPa)	Comp. Strength at Test Date (psi; MPa)	Rupture Strength at Test Date (psi; MPa)
#4 (TW2)	Pedestal	4,465; 30.8 (2)	5,022; 34.6 (2)	729; 5.03 (2)
	1st Story	5,677; 39.1 (2)	6,048; 41.7 (3)	817; 5.63 (2)
	2nd Story	5,446; 37.6 (2)	6,413; 44.2 (3)	950; 6.55 (2)
	3rd Story	5,199; 35.9 (2)	5,894; 40.6 (3)	830; 5.72 (2)
	4th Story	5,164; 35.6 (3)	5,600; 38.6 (3)	754; 5.20 (2)

Figura 14: Propiedades de resistencia en compresión del hormigón utilizado en la construcción del espécimen TW2. Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

Las propiedades de diseño de los distintos aceros utilizados se muestran en la Figura 15, correspondiente a una tabla provista en el estudio realizado por Thomsen & Wallace (1995).

Properties	#3 Deformed Bar Longitudinal Boundary Steel	#2 Deformed Bar Uniformly Distributed Web Steel	3/16 in. Diameter Smooth Wire Transverse Steel
f_y ; ksi (MPa)	63 (434)	65 ¹ (448)	63 (434)
f_u ; ksi (MPa)	~93 (641)	~85 (586)	70 (483)
f_f ; ksi (MPa)	~92 (634)	~80 (552)	70 (483)
E_s ; ksi (MPa)	29,000 (200,000)	29,000 (200,000)	29,000 (200,000)
E_{sh}^2 ; ksi (MPa)	1,500 (10,344)	—	—
ϵ_y	0.0022	0.003	0.003
ϵ_{sh}	0.016	—	—
ϵ_u	0.10	0.08	0.06
ϵ_f	0.12	0.10	0.07

¹ Yield stress calculated using 0.2% offset method
² Tangent Modulus at the Onset of Strain Hardening

Figura 15: Propiedades de los aceros utilizados en la construcción del espécimen TW2. Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

Los resultados experimentales de carga lateral y desplazamiento de techo reportados en el estudio de Thomsen & Wallace (1995) son los mostrados en la Figura 16. Dichos datos fueron utilizados para comparar los resultados de la simulación numérica en términos de carga lateral y desplazamiento de techo. En cuanto a los valores de rotación en la base y momento en la base (Figura 17), el estudio no entrega valores tabulados, por ende, solo se realizó una comparación cualitativa.

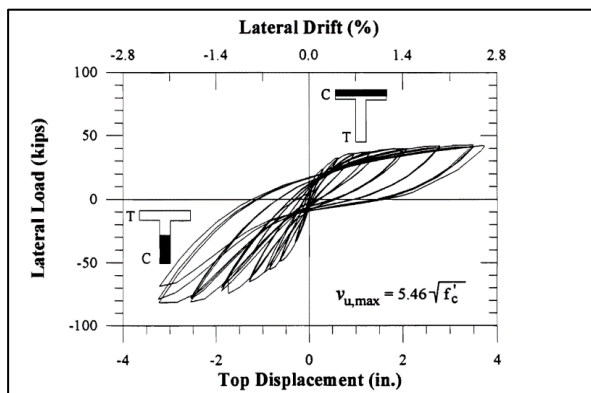


Figura 16: Gráfico de resultados experimentales de carga lateral (Lateral Load) y Desplazamiento de techo (Top Displacement). Recuperado de Thomsen & Wallace (1995)

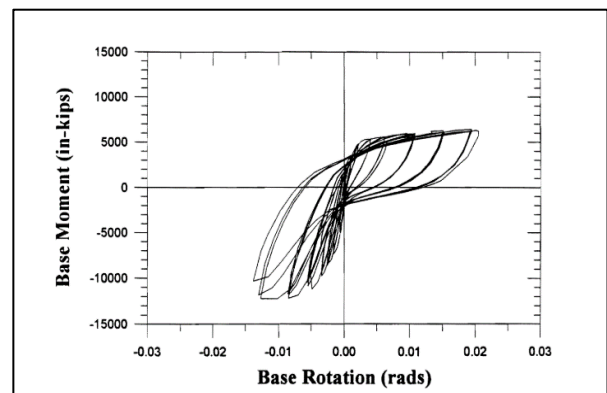


Figura 17: Gráfico de resultados experimentales de momento en la base (Base Moment) y rotación en la base (Base Rotation). Recuperado de Thomsen & Wallace (1995)

Los resultados reportados por Thomsen & Wallace (1995) de número de ciclo, desplazamiento de techo, carga y esfuerzo de corte son aquellos que se muestran en la Figura 18.

Cycle Number	Data Point Number	Top Displacement		Initial Cycle				Repeat Cycle			
		inches	Drift (%)	North		South		North		South	
				Load (kips)	Shear Stress ¹ $\sqrt{f'_c}$ (psi) ²	Load (kips)	Shear Stress ¹ $\sqrt{f'_c}$ (psi)	Load (kips)	Shear Stress ¹ $\sqrt{f'_c}$ (psi)	Load (kips)	Shear Stress ¹ $\sqrt{f'_c}$ (psi)
1 and 2	21-85	0.144	0.1	15.48	1.04	16.99	1.14	15.59	1.04	16.91	1.13
3 and 4	86-149	0.36	0.25	23.67	1.58	33.78	2.26	23.32	1.56	33.16	2.22
5 and 6	150-213	0.72	0.5	32.34	2.17	48.80	3.27	32.06	2.15	47.75	3.20
7 and 8	214-277	1.08	0.75	35.60	2.38	55.42	3.71	35.16	2.35	57.46	3.85
9 and 10	278-341	1.44	1.00	37.05	2.48	65.11	4.36	36.75	2.46	63.22	4.23
11 and 12	342-405	2.16	1.50	39.47	2.64	74.53	4.99	37.25	2.49	72.49	4.85
13 and 14	406-469	1.44	1.00	34.22	2.29	42.40	2.84	34.16	2.29	42.73	2.86
15 and 16	470-533	2.16	1.50	39.81	2.67	69.24	4.64	39.05	2.61	69.88	4.68
17 and 18	534-597	2.88	2.00	41.85	2.80	81.26	5.44	40.71	2.73	78.53	5.26
19	598-629	2.88	2.00	40.48	2.71	77.87	5.21	—	—	—	—
20 and 21	630-693	3.60	2.50	42.65	2.85	81.56	5.46	41.41	2.77	78.87	5.28
22	694-725	3.60	2.50	41.06	2.75	68.60	4.59	—	—	—	—
23 ³	726-741	3.89	2.70 ⁴	41.49	2.78	—	—	—	—	—	—

¹ Shear Stress Based on Cross-Sectional Area of Web (192 in²)
² $f'_c = 6,050$ psi
³ Only Half Cycle Performed Because Web Boundary Element Was Beginning To Buckle Out-of-Plane
⁴ Couldn't Achieve Full Displacement Because Actuator Reached Maximum Stroke

Figura 18: Tabla de resultados de carga, desplazamiento de techo y esfuerzo de corte del espécimen TW2.

Recuperado de Thomsen & Wallace (1995).

3.3 Modelación de Elementos Finitos del muro TW2 para simulación de comportamiento ante desplazamientos impuestos

En una primera evaluación se consideraron tres tipos de elementos numéricos para la modelación del muro de HA de sección T. Sin embargo, se determinó utilizar solo uno de estos elementos. Los elementos considerados son: (i) *fiber-type beam-column element*; (ii) *multi-layer shell element*; y (iii) *shear-flexure interaction multiple vertical lines element model* (SFI-MVLEM). El elemento *fiber-type beam-column* es capaz de simular de manera precisa el comportamiento de muros planos y de sección C. Sin embargo, este elemento fue descartado dada la baja capacidad de predicción de resultados en el caso de muros no planos de sección T. Para este tipo de muros, datos experimentales muestran que secciones planas no permanecen planas, con lo cual la distribución de deformaciones unitarias no se simula correctamente (Lowes et al., 2014). En el caso del elemento *multi-layer shell*, los resultados de validación del elemento publicados en el paper del autor (Lu et al., 2015), no se condicen con los resultados obtenidos al correr el código anexo al mismo documento. De esta manera, el elemento considerado para la modelación numérica del muro TW2 es el *shear-flexure interaction multiple vertical lines element model*.

La implementación del muro TW2 y el análisis numérico efectuado, se basaron en los códigos publicados como “Example 1-SFI-MVLEM” de la utilización del elemento SFI-MVLEM en Sitio web de OpenSees (Koložvari et al., 2015a). Los archivos obtenidos desde dicho sitio son: *dispControl.tcl*, *gravity.tcl*, *LibAnalysisStaticParameters.tcl*, *LibGeneratePeaks.tcl* y *SFI_MVLEM_SP4.tcl*. Estos conforman la simulación numérica del espécimen RW-A15-P10-S78 del estudio de Tran & Wallace (2012). El archivo *LibAnalysisStaticParameters* configura los parámetros del análisis estático a efectuar en el muro, dado que, a pesar de tratarse de un ensayo experimental cuasiestático, la simulación numérica efectúa un análisis estático incremental, discretizando los desplazamientos e incrementando la fuerza estática lateral en cada uno de los incrementos de desplazamientos impuestos. Por otra parte, la función del archivo *LibGeneratePeaks.tcl* es generar la discretización de los desplazamientos impuestos de manera lateral, a partir de un vector de drift laterales máximos impuestos al muro. Además, el archivo *gravity.tcl* genera los patrones de carga gravitacionales a ser aplicados en el muro. El modelo del muro, considerando las coordenadas de los nodos, la asignación de propiedades de los materiales a

los elementos y la asignación de estos elementos entre los nodos se realiza en el archivo *SFI_MVLEM_SP4.tcl*. Finalmente, el archivo *dispControl.tcl* ejecuta el análisis citando todos los archivos antes mencionados.

La implementación del modelo del muro TW2 (Thomsen & Wallace, 1995) tomó dos intentos para obtener resultados similares a los esperados. El primero de éstos, modelo 10V-3H consideró una discretización menor en la dirección vertical y horizontal: 10 elementos en dirección vertical, y 3 elementos en la dirección horizontal. Nuevamente este modelo arrojó resultados poco satisfactorios, llegando a más ciclos de desplazamientos de la rutina de drift lateral e indicando nuevamente problemas de convergencia numérica. El segundo intento (5V-3H), fue desarrollado utilizando una menor discretización, contando con sólo 5 elementos en la dirección vertical y 3 macro-fibras en la dirección horizontal, según lo mostrado en la Figura 19. Esta figura muestra tres colores: (i) verde, correspondiente al elemento de borde del alma; (ii) azul, que representa la sección no confinada del alma; y (iii) morado: ala del muro. Los resultados obtenidos en el segundo intento no muestran todos los ciclos de carga y descarga asociados a la rutina de drift lateral, aunque si se llegó a mayores ciclos que en el intento anterior, incurriendo nuevamente en errores de convergencia.

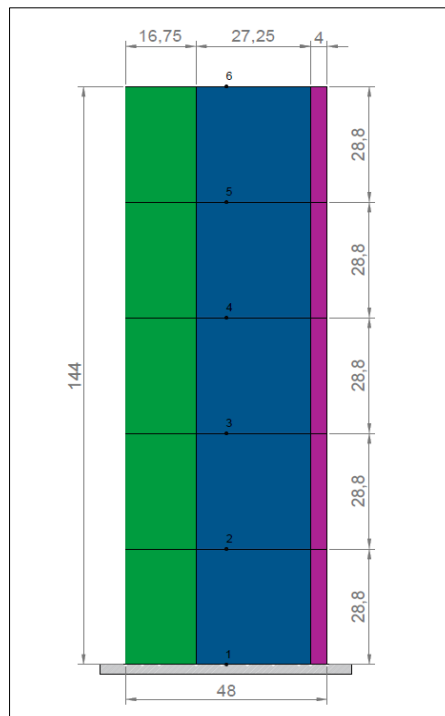


Figura 19: Esquema del modelo numérico 5V-3H del espécimen TW2, desarrollado en OpenSees.

Dimensiones en pulgadas.

El material utilizado en la modelación del hormigón corresponde al material uniaxial ConcreteCM (Kolozvari et al., 2015b), que simula el comportamiento histerético del modelo de concreto desarrollado por Chang & Mander (1994), el cual permite simular el comportamiento de hormigón confinado y hormigón no confinado.

Las propiedades del hormigón asignadas a las macro-fibras son: resistencia máxima a compresión (f'_c), deformación unitaria en resistencia máxima a compresión ($ec0$), resistencia máxima en tracción (ft), deformación unitaria máxima en resistencia máxima en tracción (et), módulo de Young (E), deformación unitaria de agrietamiento en compresión y en tracción ($xcrnu$ y $xcrp$, respectivamente), resistencia máxima a compresión de hormigón confinado ($fpcc$), deformación unitaria en resistencia máxima a compresión del hormigón confinado ($xcrnc$). La resistencia a compresión del hormigón

confinado fue obtenida utilizando el modelo analítico de Mander para hormigón confinado, considerando los valores de f'_c mostrados en la tabla de la Figura 14, correspondientes a cada nivel de la discretización vertical del muro, y las correspondientes cuantías de acero de confinamiento de cada una de las macro-fibras del muro.

En cuanto a la modelación del comportamiento del acero de refuerzo, esta se realizó utilizando el material uniaxial SteelMPF (Kolozyari et al., 2015b), el cual reproduce el comportamiento definido por el modelo no-lineal propuesto por Menegotto & Pinto (1973).

Las propiedades de acero asignadas a las macro-fibras son: tensión de fluencia (f_y), deformación unitaria de fluencia (ϵ_y) y módulo de Young (E_s). Estas propiedades fueron asignadas a cada uno de los aceros de refuerzo, es decir, barras #3, barras #2 y barras 3/16, según las propiedades reportadas en la tabla de la Figura 15.

La aplicación de cargas en el modelo de la Figura 19, se efectuó en el nodo 6, correspondiente al extremo superior del muro. En este nodo se impusieron los desplazamientos de la rutina de drift lateral de la Figura 11, y de manera vertical se aplicó una carga gravitacional de 110.4 [kip], correspondiente a $0.075f'_cA_g$, en donde f'_c es la resistencia máxima a compresión del hormigón y A_g corresponde al área bruta de la sección transversal del muro. Cabe destacar que el valor de f'_c considerado para el cálculo de la carga axial corresponde al valor de diseño, es decir, 4.0psi.

3.3.1. Modelo final TW2 y validación de resultados

El modelo final desarrollado en OpenSees para la obtención y validación de resultados simulados numéricamente se encuentra esquematizado en la Figura 20. A la izquierda de esta figura se puede apreciar que la discretización vertical cuenta con 5 elementos SFI_MVLEM, mientras que la dirección horizontal está compuesta por 4 macro-fibras. Los colores señalados en la Figura 20 corresponden a los mismos señalados para la Figura 19, es decir: verde, elemento de borde del muro TW2; azul: alma no confinada del muro TW2; y morado: ala del muro TW2. A cada una de estas macro-fibras y elementos se le asignaron las correspondientes propiedades de cuantía de refuerzo longitudinal, cuantía de refuerzo transversal y resistencia a compresión del hormigón confinado según el modelo de Mander y hormigón no confinado.

Cabe destacar que el elemento de borde fue discretizado en 2 macro-fibras de dimensiones 4×4 [in²] y 12.75×4 [in²], con la finalidad de obtener las deformaciones unitarias en la macro-fibra del extremo izquierdo de la Figura 20 y poder comparar con las deformaciones unitarias de la macro-fibra de iguales dimensiones y ubicación del elemento de borde compuesto (ver Figura 23).

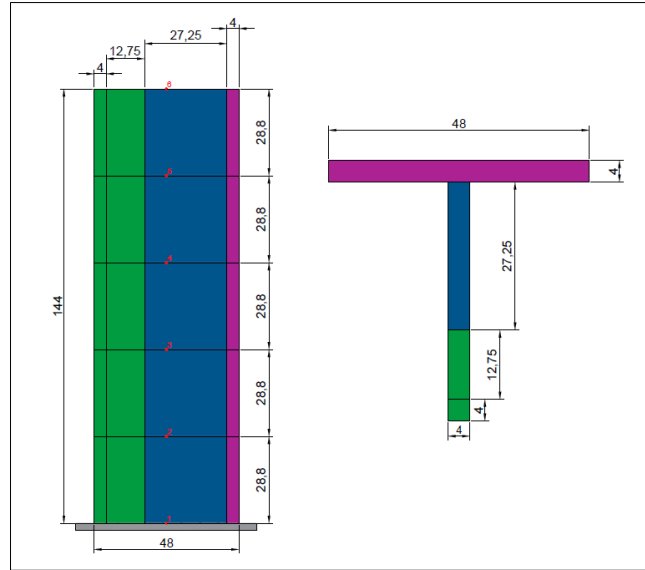


Figura 20: Esquema de modelo numérico del muro TW2.

3.3.2. Diseño del elemento de borde compuesto en alma del muro

El diseño del elemento de borde compuesto se realizó considerando las especificaciones de AISC360-10 (American Institute of Steel Construction, 2010). El criterio de diseño corresponde a falla balanceada, considerando el alma en compresión, y el nivel de carga axial al cual fue sometido el espécimen TW2, cuyo valor es $P = 0.075f'_cA_g = 110.4 [kips]$. Este criterio implica la imposición de deformaciones unitarias de 0.003 en la fibra de hormigón comprimida más alejada del eje neutro, y una imposición de deformación unitaria de fluencia en el acero, con un valor considerado de 0.002 en la capa de acero en tracción más alejada del eje neutro. A partir de este perfil de deformaciones, y considerando la ecuación de equilibrio de fuerzas en la sección transversal (Ecuación 1), se calcularon los valores de esfuerzo y fuerza resultante en cada una de las capas de acero de refuerzo en la sección del muro, dejando como incógnita el área de acero requerido en el elemento de borde ($A's$).

Otra consideración hecha en el diseño del elemento de borde es la obtención de áreas equivalentes. Se asumió que cada capa de refuerzo se concentra en una única área de acero ubicada en el eje de simetría de la sección transversal del muro.

La Figura 21(a) muestra la simplificación del refuerzo longitudinal, mientras que la Figura 21 (b) y (c) muestran el perfil de deformaciones unitarias impuestas en la sección transversal y el diagrama de fuerzas resultantes en la sección transversal del elemento, respectivamente.

Además, siguiendo la práctica habitual de diseño en elementos sometidos a flexo-compresión, se consideró el estado último del hormigón para una deformación de 0.003, utilizando en rectángulo equivalente para la distribución de esfuerzos desarrollados en el hormigón en compresión (ACI318-08, sección 10.2.7), lo cual no se ajusta necesariamente al fenómeno físico que se desarrolla, pero se condice con la práctica habitual para diseño de muros de HA.

Para obtener el área de acero requerida correspondiente al tubo de acero se reestructuró el elemento de borde, eliminando las ocho barras #3 del elemento de borde del alma (ver Figura 10) e incluyendo solo cuatro barras #2 a modo de soporte para los estribos de confinamiento. El perfil tubular fue incluido dentro de esta disposición de barras longitudinales, como se muestra en el diseño final (Figura 22).

A partir de la imposición de deformaciones, fuerzas resultantes en el hormigón y capas de acero, se obtuvo un área de acero requerida en el elemento de borde de $As' = 0.621 [in^2]$.

$$\mathbf{P} + \sum \mathbf{C}_{s,i} + \sum \mathbf{T}_{s,j} + \mathbf{C}_c = \mathbf{0} \quad (1)$$

En donde:

P : Fuerza de compresión aplicada al muro ($0.075f'_cA_g$)

$C_{s,i}$: Fuerza de compresión desarrollada en la i -ésima capa de acero de refuerzo longitudinal

$T_{s,j}$: Fuerza de tracción desarrollada en la j-ésima capa de acero de refuerzo longitudinal

C_c : Resultante de fuerza del hormigón en compresión

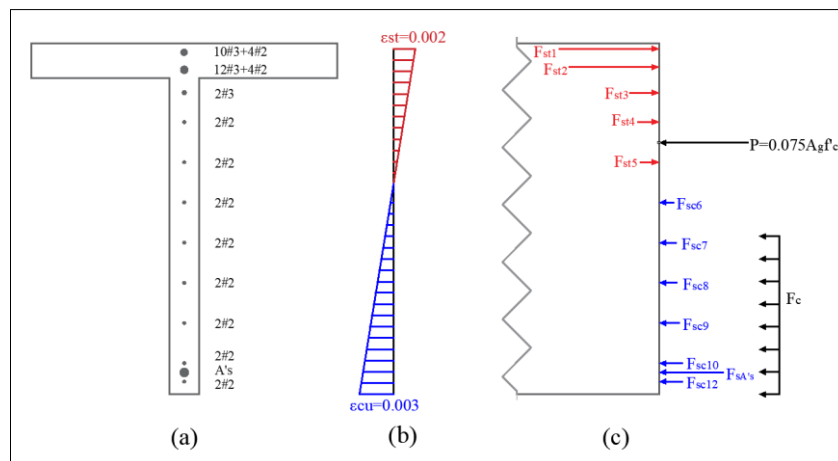


Figura 21: (a) Áreas equivalentes de refuerzo longitudinal, (b) perfil de deformaciones unitarias impuesto, y (c) diagrama de fuerzas en la sección transversal.

El modelo de hormigón confinado utilizado para el tubo de acero corresponde al modelo de Susantha et al. (2001), el cual se basa en el modelo analítico de Mander para hormigón confinado y realiza ajustes a dicho modelo a partir de resultados experimentales obtenidos de ensayos hechos a tubos de acero rellenos de hormigón.

La elección del tubo a utilizar en el elemento de borde se realizó desde la tabla de perfiles AISC (Table 1-13 Round HSS). El tubo elegido es H2.375x0.125, cuyas dimensiones son diámetro exterior $D_{ext} = 2.375 [in]$, espesor de diseño $t_{dis} = 0.116 [in]$, y un área transversal de $A = 0.823 [in^2]$.

La materialidad escogida para el perfil tubular seleccionado es acero estructural ASTM A572-60. El material fue escogido en función de su esfuerzo de fluencia de 60ksi, con el objetivo de asimilar las propiedades del acero de refuerzo longitudinal que actúa como soporte de los estribos de confinamiento del elemento de borde del alma, y de esta manera simplificar la modelación numérica.

Las verificaciones realizadas para este perfil consideran la revisión de esbeltez, en donde se procuró elegir un perfil compacto de modo de evitar fallas asociadas al pandeo del tubo de acero. Por otra parte, se verificó la cuantía de refuerzo longitudinal en elemento de borde compuesto y el espaciamiento entre tubo de acero y las barras longitudinales (AISC360, Capítulo I). Finalmente, el diseño del elemento de borde compuesto cumple con los requerimientos especificados en AISC360 Capítulo I y el diseño de la sección transversal se encuentra detallada en la Figura 22.

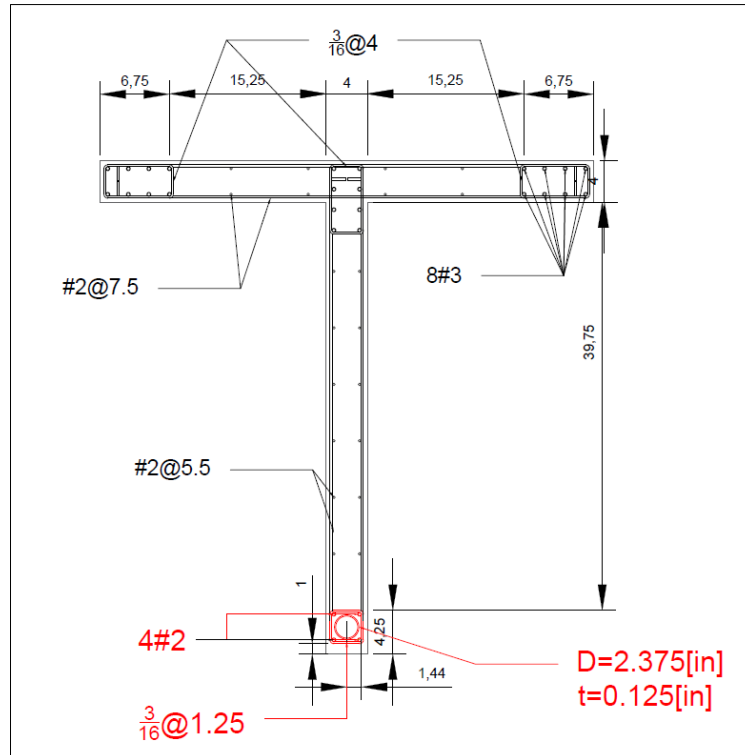


Figura 22: Esquema de diseño de refuerzo de acero en muro TW2 con elemento de borde compuesto.

3.3.3. Implementación del diseño de elemento de borde compuesto en modelo de OpenSees

El modelo implementado en OpenSees es incapaz de reproducir la falla por deslizamiento entre el perfil de acero y el hormigón circundante, con lo cual, el supuesto asumido en la implementación del modelo del muro con elemento de borde modificado es el siguiente:

- Existe transferencia de corte completa entre tubo de acero y hormigón circundante (acción *full composite*)

El modelo desarrollado para el muro con elemento de borde compuesto consideró una discretización de cinco elementos en la dirección vertical y tres macro-fibras en la dirección horizontal, como se muestra en la Figura 23. En dicha figura, el elemento de borde corresponde a la macro-fibra del extremo izquierdo (indicada en color verde), a la cual fueron asignadas las propiedades de cuantía de refuerzo longitudinal y transversal del diseño (Figura 22), además de las propiedades de hormigón confinado. Sobre estas últimas propiedades asignadas, dadas las limitaciones de la modelación en OpenSees, se asignaron de la siguiente manera: inicialmente se calcularon las propiedades de deformaciones unitarias y resistencia a compresión del hormigón confinado por estribos (correspondiente a la zona entre tubo de acero y estribos de confinamiento), y del hormigón confinado por el tubo de acero (según modelo de Susantha et al. (2001)). Al obtener las propiedades de ambos hormigones confinados, se realizó una ponderación por área (considerando las correspondientes áreas para cada tipo de hormigón confinado dentro del elemento de borde compuesto de dimensiones $4 \times 4 \text{ [in}^2\text{]})$ para de esta manera obtener propiedades capaces de representar el comportamiento del elemento de borde compuesto.

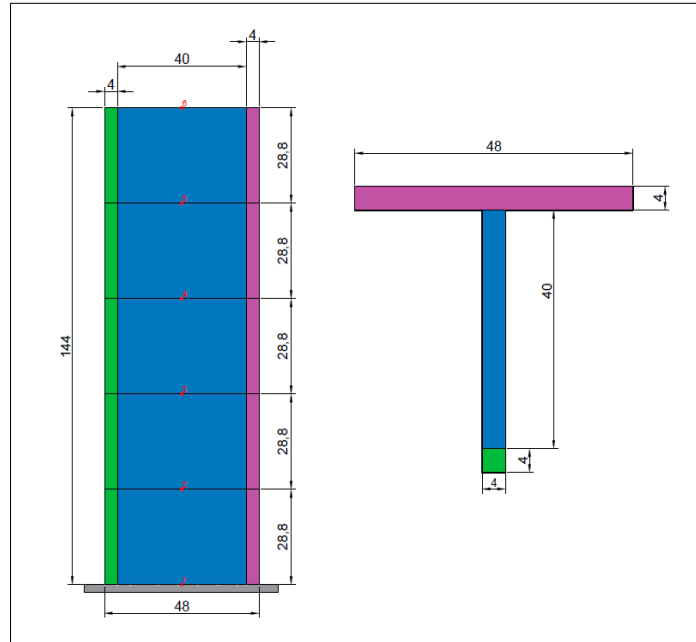


Figura 23: Esquema del modelo del muro TW2 con elemento de borde compuesto implementado en OpenSees.

El modelamiento del comportamiento del material del perfil de acero se realizó utilizando el material uniaxial SteelMPF (Kolozvari et al., 2015b).

3.3.4. Problemas en la implementación numérica y soluciones para obtención de resultados finales

La implementación del modelo numérico en OpenSees no estuvo exenta de problemas, y debido a esto, se desarrollaron varios modelos preliminares con problemas de convergencia debido a inestabilidad numérica, la cual estuvo asociada a la tolerancia del método de integración numérica utilizado, magnitud del incremento de desplazamiento impuesto, máximo número de iteraciones del método de integración numérica, o eficiencia del test de convergencia. Estos últimos parámetros fueron variados de manera de obtener valores acordes a las unidades utilizadas (sistema imperial), un número de iteraciones suficiente para lograr la convergencia sin generar tiempos de cálculo demasiado extensos, o un test para verificación de convergencia eficiente que logre determinar si se cumple o no la convergencia dentro del máximo número de iteraciones especificado en el código del software.

La modificación que permitió obtener un resultado aceptable fue el cambio de tipo de test de convergencia, pasando de un test tipo *NormDispIncr Test* a *NormUnbalance Test*. Además de esto, se fijó el incremento de desplazamientos en 0.01 [in], se aumentó el máximo número de iteraciones desde 200 a 500, y se aumentó la tolerancia asociada al método de integración numérica, fijándose en un valor de $1.0e^{-5}$. Estos cambios permitieron obtener modelos del muro TW2 y TW2 con elemento de borde compuesto satisfactorios, capaces de completar la rutina de desplazamientos impuestos.

4. Resultados

4.1 Resultados preliminares

En esta sección se presentan los resultados preliminares obtenidos de la simulación numérica del comportamiento del muro TW2 sometido a desplazamientos controlados en el nodo superior. Los resultados mostrados en la Figura 24, corresponden a los resultados preliminares obtenidos con una discretización de 10 elementos en la dirección vertical, y 3 macro-fibras horizontalmente, correspondiente al modelo 10V-3H. Finalmente, los resultados mostrados en la Figura 25 son los obtenidos en el segundo modelo (5V-3H). Los modelos desarrollados hasta este punto presentaron errores de convergencia debido a inestabilidad numérica, sin embargo, se puede apreciar que los resultados del modelo 5V-3H, presentan mayores ciclos de carga y descarga, llegando a simular una mayor cantidad de ciclos de la rutina de drift lateral impuesto en la parte superior del modelo.

Los resultados con los cuales se contrastaron los datos obtenidos de la simulación en OpenSees, corresponden a los datos reportados en el estudio de (Thomsen & Wallace, 1995), cuyos valores se pueden apreciar como cruces de color naranja, tanto en la Figura 24 como en la Figura 25.

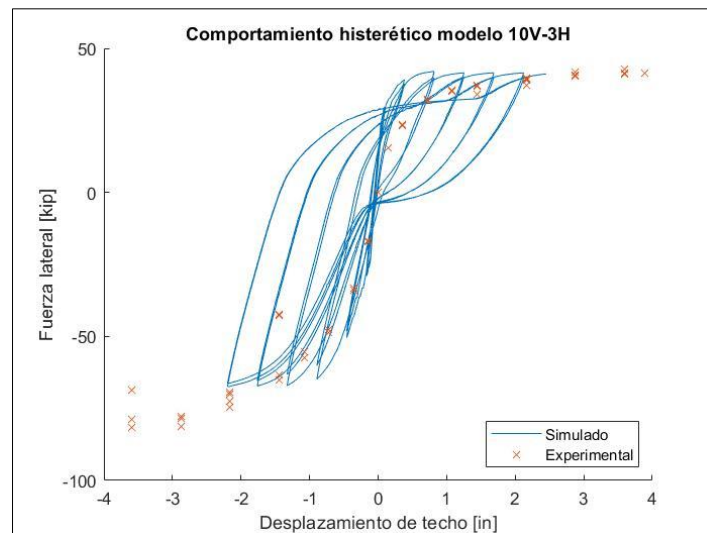


Figura 24: Comportamiento histerético del modelo 10V-3H del muro TW2.

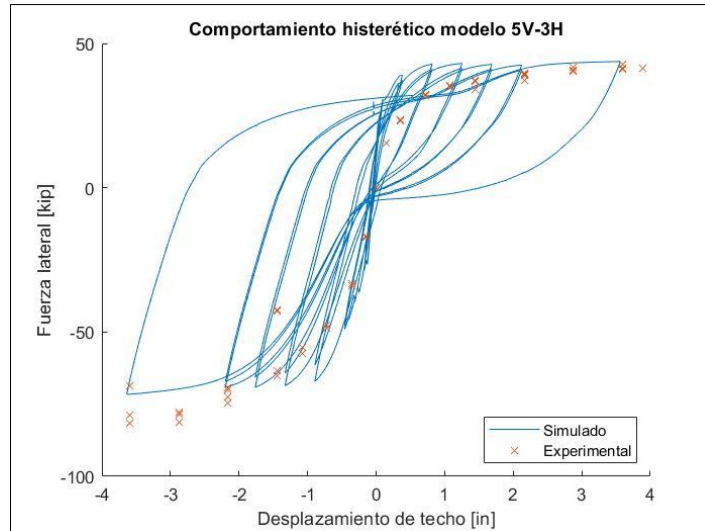


Figura 25: Comportamiento histerético del modelo 5V-3H del muro TW2.

Dados los problemas de convergencia obtenidos en el modelo desarrollado en OpenSees, se analizaron y modificaron algunos de los distintos escenarios asociados a la resolución numérica del sistema de ecuaciones del fenómeno físico simulado, tales como test de convergencia y tolerancia del test de convergencia. La finalidad del test de convergencia es verificar si el método numérico utilizado para la resolución de la ecuación no lineal que modela el fenómeno físico alcanza la convergencia, es decir, si es que se igualan ambos lados de la ecuación de equilibrio estático de fuerzas (dado que el análisis implementado es de carácter estático), mientras que la tolerancia corresponde al criterio de aprobación de la igualdad en ambos lados de la ecuación. Los resultados completos de la rutina de desplazamientos se presentan en la siguiente subsección.

4.2 Resultados del modelo TW2

Los resultados simulados numéricamente de fuerza lateral y desplazamiento de techo del modelo TW2 son los presentados en la Figura 26. Junto a los resultados numéricos (graficados en azul), se encuentran los resultados reportados por Thomsen & Wallace (1995), en su estudio “*Displacement-based design of reinforced concrete structural walls: Experimental studies of walls with rectangular and T-shaped cross sections*”.

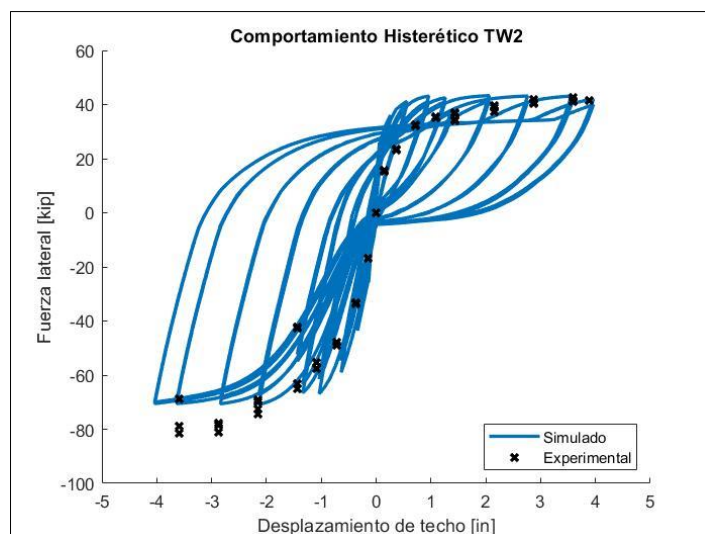


Figura 26: Comportamiento histerético del modelo TW2 y resultados experimentales reportados por Thomsen & Wallace (1995).

Para el cálculo de rotación basal se adicionó un elemento SFI_MVLEM de baja altura en la parte inferior del modelo incluyendo un nodo adicional, el cual se ubicó a la mínima distancia a la base que evitara inestabilidad numérica en la simulación. De este modo, se obtuvo una aproximación de la rotación del muro en la base. Cabe mencionar que dicho elemento incluido mantuvo las propiedades del nivel 1.

Los valores de momento y rotación en la base del modelo TW2 sometido a la rutina de desplazamientos fueron obtenidos en el modelo desarrollado en OpenSees y se muestran en la Figura 27. Este gráfico no muestra resultados experimentales, ya que el estudio de Thomsen & Wallace (1995) sólo muestra resultados gráficos (ver Figura 17).

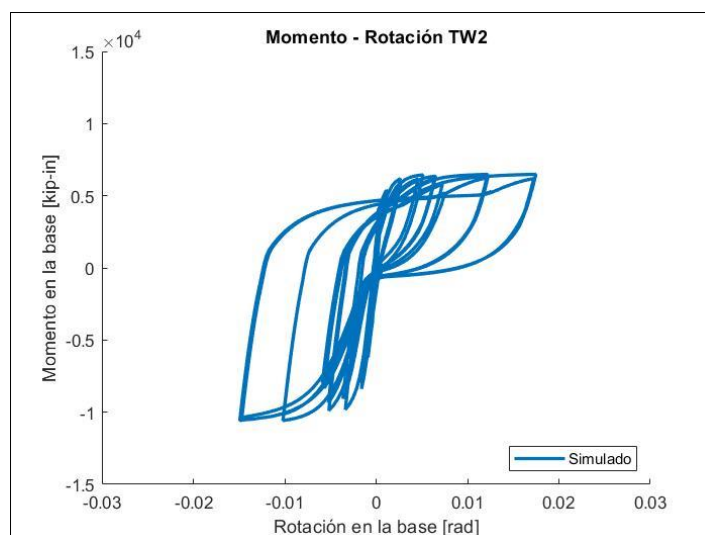


Figura 27: Gráfico de Momento – Rotación en la base del modelo TW2 sometido a la rutina de desplazamientos.

La Figura 28 muestra el resultado de un Análisis Pushover realizado sobre el modelo del muro TW2 hasta alcanzar una deformación unitaria en compresión del elemento de borde de 0.005, correspondiente a la deformación unitaria a la cual se obtiene la resistencia máxima en compresión del hormigón confinado del elemento de borde. Este valor ha sido considerado como deformación unitaria en estado

último, de modo de poder obtener la razón de ductilidad del muro modelado. Además, a la curva de Pushover simulada se le aplicó un ajuste de curva elastoplástica perfecta (EPP), mostrado en línea segmentada, según las disposiciones de Eurocode8 (European Committee For Standardization, 1998).

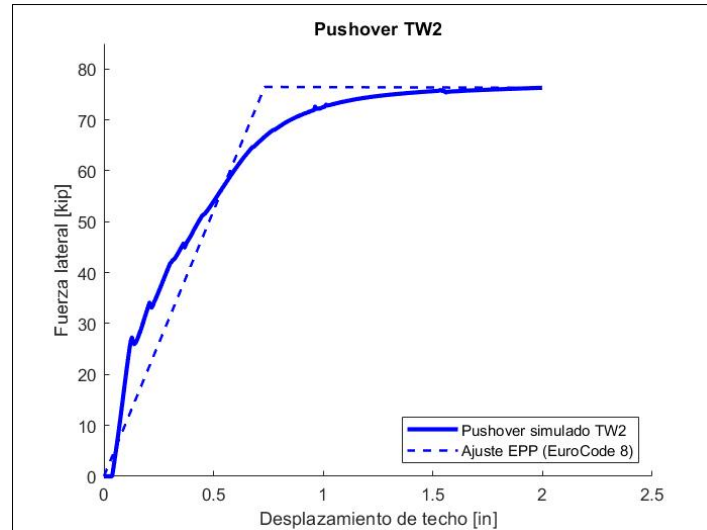


Figura 28: Gráfico de Pushover del modelo TW2 y ajuste bilineal de la curva Pushover, según EuroCode8.

4.3 Resultados del modelo TW2 con elemento de borde compuesto

La Figura 29 muestra los resultados de fuerza lateral y desplazamiento de techo obtenidos numéricamente para el modelo TW2 con elemento de borde compuesto. Además, en esta misma figura se muestran los resultados obtenidos experimentalmente del modelo TW2, los cuales fueron reportados por Thomsen & Wallace (1995) en su estudio sobre muros estructurales de hormigón reforzado. Dichos resultados experimentales se muestran en color negro, mientras que el comportamiento simulado se presenta en color rojo.

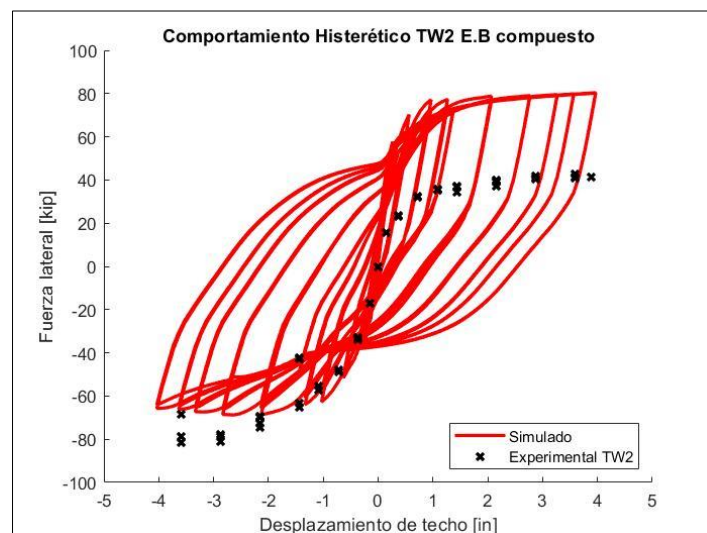


Figura 29: Comportamiento histerético del modelo TW2 con elemento de borde compuesto y resultados experimentales reportados por Thomsen & Wallace (1995).

Al igual que en el modelo TW2, la obtención de la rotación en la base se realizó de manera aproximada mediante la inclusión de un elemento SFI_MVLEM en la parte inferior del modelo, manteniendo las

propiedades originales de acero y hormigón en las correspondientes macro-fibras e incluyendo un nodo a corta distancia del apoyo en el cual se registraron las rotaciones basales del muro.

El comportamiento del muro con elemento de borde compuesto, en cuanto a momento en la base y rotación en la base se muestra en el gráfico mostrado en la Figura 30.

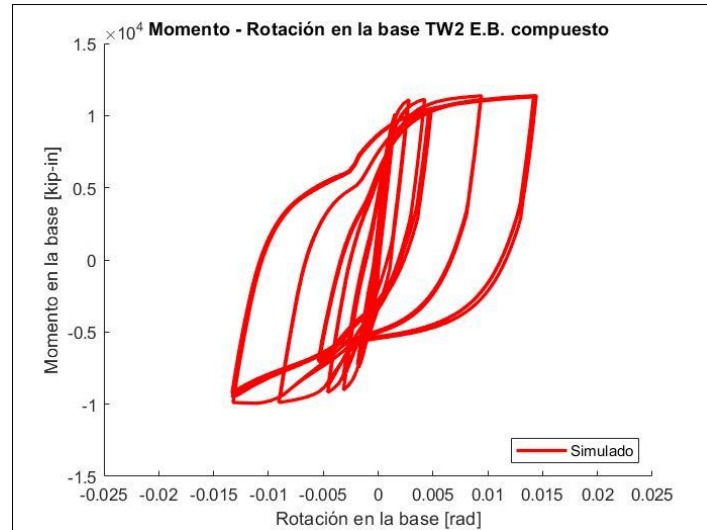


Figura 30: Gráfico de Momento – Rotación en la base del modelo TW2 con elemento de borde compuesto sometido a la rutina de desplazamientos.

Similar al gráfico de Pushover del muro TW2 (Figura 28), el análisis Pushover considerado para el modelo TW2 con elemento de borde compuesto fue simulado hasta alcanzar un nivel de deformación unitaria de 0.009. Este valor corresponde a la deformación unitaria a la cual se alcanza la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado por tubos de acero, calculado según el modelo de Susantha et al. (2001) y fue considerado como criterio de estado último de modo de poder obtener la razón de ductilidad del modelo sometido al análisis Pushover. Los resultados numéricos obtenidos son los que se muestran en la Figura 31, en donde además se muestra el ajuste de comportamiento elastoplástico perfecto (EPP) aplicado a la curva de Pushover, obtenido acorde a las disposiciones de EuroCode8.

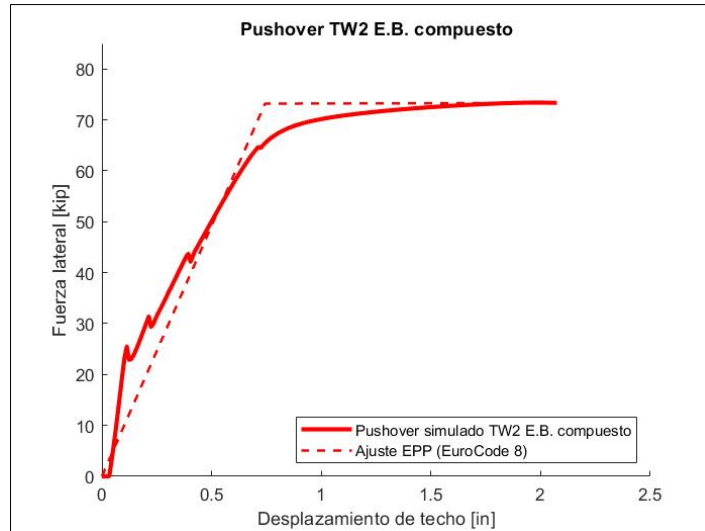


Figura 31: Gráfico de Pushover del modelo TW2 con elemento de borde compuesto y ajuste bilineal de la curva Pushover según EuroCode8.

4.4 Comparación de resultados obtenidos para el modelo TW2 y TW2 con elemento de borde compuesto

Los resultados de fuerza lateral y desplazamiento de techo obtenidos numéricamente tanto para el modelo TW2 y el modelo TW2 con elemento de borde compuesto se muestran en la Figura 32, de modo de poder comparar los resultados obtenidos para ambos modelos.

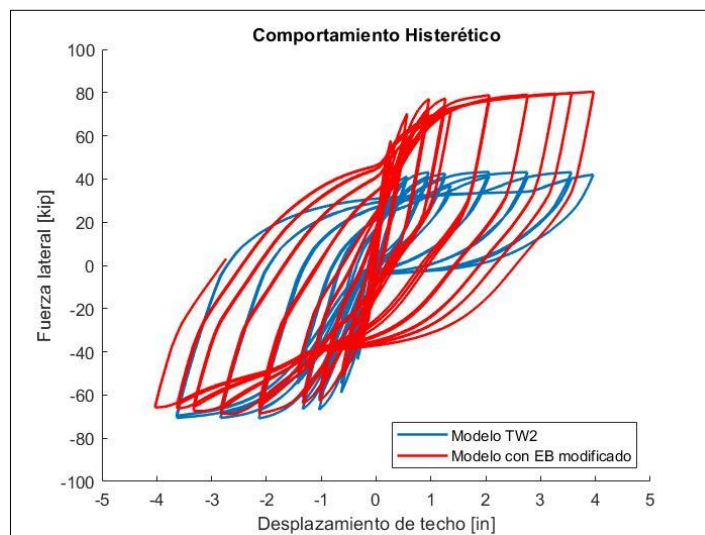


Figura 32: Comparación de comportamientos histeréticos de los modelos TW2 (en azul) y TW2 con elemento de borde compuesto (en rojo).

La comparación de momento y rotación en la base para los dos modelos desarrollados en OpenSees se muestra en la Figura 33, en donde la curva en azul muestra los resultados del modelo TW2 y los resultados graficados en rojo representan los datos obtenidos para el modelo TW2 con elemento de borde compuesto.

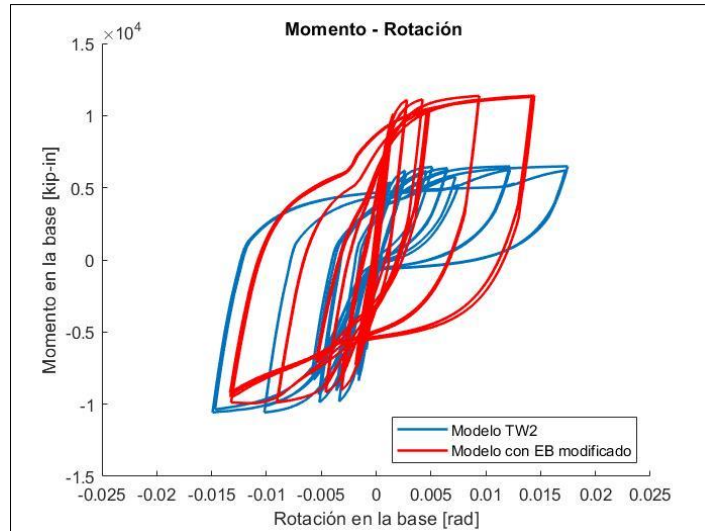


Figura 33: Comparación de gráficos de Momento – Rotación en la base para los modelos TW2 (en azul) y TW2 con elemento de borde compuesto (en rojo).

La comparación de curvas elastoplásticas perfectas obtenidas de las curvas de Pushover de ambos modelos son los mostrados en la Figura 34.

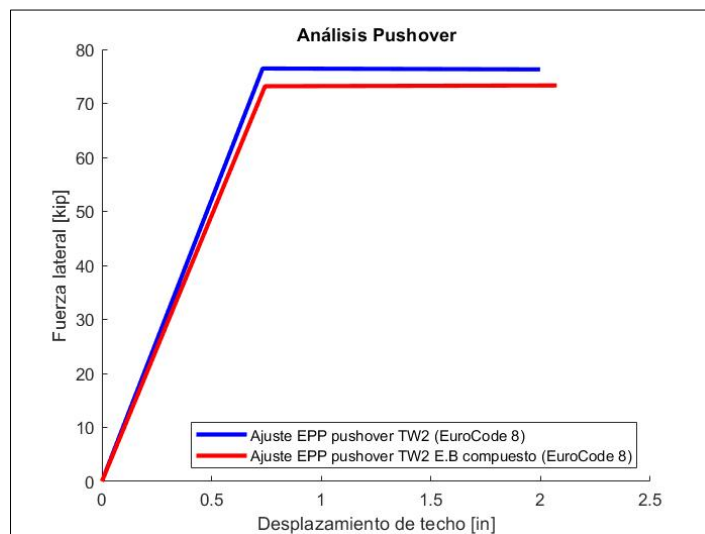


Figura 34: Comparación de resultados del análisis Pushover para los modelos TW2 (azul) y TW2 con elemento de borde compuesto (rojo).

5. Discusión de resultados

5.1 Discusión de resultados preliminares

Los dos modelos desarrollados presentaron errores de convergencia debido a inestabilidad numérica. Sin embargo, se puede apreciar un mayor avance en la simulación del comportamiento histérico de del muro TW2 a medida que se disminuyó la discretización vertical y horizontal, obteniéndose los mejores resultados con una discretización de 5 elementos en la dirección vertical y 3 macro fibras en la

dirección horizontal, correspondiente al modelo 5V-3H (Figura 25). Además, cabe destacar que los resultados obtenidos para dicho modelo, a pesar de no haber completado la totalidad de ciclos de la rutina de drift lateral, se ajustan de buena manera al comportamiento experimental del muro TW2.

Para eliminar los problemas de convergencia numérica, se modificó el tipo de test de convergencia y su tolerancia, pasando de test tipo *NormDispIncr* a *NormUnbalance*, obteniéndose los resultados completos de la rutina de drift lateral impuesta al modelo 5V-3H del muro TW2. Como se puede apreciar en el gráfico de Comportamiento histerético del modelo 5V-3H del muro TW2. (Figura 25), los resultados obtenidos se ajustan de buena manera a los datos de la envolvente de fuerza-desplazamiento reportados por Thomsen & Wallace (1995).

5.2 Discusión de resultados finales

El gráfico de comparación de comportamientos históricos (Figura 32) muestra un incremento en la capacidad de carga lateral cuando el ala del muro TW2 con elemento de borde compuesto se encuentra en compresión (lado derecho del gráfico, desplazamientos positivos), con relación a los resultados simulados para el muro TW2. En el otro sentido de carga (compresión del alma, desplazamientos de techo negativos), se observa una leve disminución de la resistencia en términos de fuerza lateral. Los ensayos experimentales realizados por Wu et al. (2018) y Qian et al. (2012), consideran muros de sección rectangular y reportan incrementos en la capacidad resistente de dichos elementos en ambos sentidos de carga, lo cual se debe a la simetría de los muros ensayados en dichos estudios. Los muros modelados (TW2 y TW2 con elemento de borde compuesto) poseen una sección transversal T no plana, con lo cual no es posible realizar una comparación directa entre los resultados obtenidos en los estudios antes mencionados (Wu et al. (2018) y Qian et al. (2012)) y el estudio realizado en la presente investigación. Sin embargo, en un sentido de carga se observó un incremento de la resistencia lateral (compresión del ala del muro).

En la Figura 32 se puede apreciar además que la forma que adoptan las curvas de comportamiento histerético es más amplia en el caso del muro TW2 con elemento de borde compuesto que en los resultados obtenidos para el muro TW2. Esto indica que la inclusión de un tubo de acero en el elemento de borde del alma del muro aumenta la capacidad de disipación de energía del elemento estructural. El incremento en la amplitud de las curvas de histéresis demuestra que el comportamiento del muro TW2 con elemento de borde compuesto es dominado por flexión, en contrariedad al caso del muro TW2, para el cual se observan curvas de histéresis de baja amplitud. Por ende, se infiere que su comportamiento es mayormente influenciado por esfuerzos de corte. Cabe destacar que es deseable evitar el comportamiento dominado por corte, puesto que las fallas por corte son de carácter frágil y de baja ductilidad. En cuanto a la rigidez de los elementos estructurales analizados, no es posible concluir sobre cambios en dicha propiedad, dado el carácter de los resultados obtenidos.

Por otra parte, la Figura 33 presenta la comparación de Momento – Rotación en la base donde se muestra que, para un mismo nivel de desplazamiento de techo impuesto a ambos modelos, el muro TW2 con elemento de borde compuesto sufre menores deformaciones de rotación en la base. En este gráfico de comparación se puede observar que la capacidad de momento resistente en la base es mayor en el muro TW2 con elemento de borde compuesto, en comparación al muro TW2 con refuerzo longitudinal convencional.

Por otra parte, la simulación del análisis Pushover se realizó sobre los muros TW2 y TW2 con elemento de borde compuesto hasta obtener una deformación unitaria vertical en compresión en los elementos de borde de 0.005 y 0.009 respectivamente. Estas deformaciones corresponden a la deformación unitaria en donde se desarrolla la máxima resistencia a compresión del hormigón confinado por estribos de confinamiento, en el caso del muro TW2, y del hormigón confinado por tubos de acero, en el caso del muro TW2 con elemento de borde compuesto. Dichos valores de 0.005 y 0.009 han sido considerados deformaciones de estado último y fueron utilizadas para calcular la razón de ductilidad μ . Al realizar este análisis, y obtener los ajustes de curvas elastoplásticas perfectas según las disposiciones del EuroCode8 (Figura 34), fueron obtenidos los desplazamientos de fluencia, estado último y la razón de

ductilidad. Así mismo, fueron calculados los desplazamientos de estado último en el análisis cíclico, manteniendo el criterio de estado último como deformaciones unitarias de 0.005 y 0.009 en la macro-fibra correspondiente al elemento de borde en el modelo del muro TW2 y muro TW2 con elemento de borde compuesto, respectivamente. El desplazamiento de fluencia considerado para el caso cíclico es aquel obtenido en el análisis Pushover. Los valores de desplazamiento de fluencia, desplazamiento en estado último y razón de ductilidad se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen resultados análisis Pushover y análisis cíclico.

Análisis	Modelo	Def. unitaria Estado Último	Desplazamiento de fluencia [in]	Desplazamiento Estado Último [in]	Razón de ductilidad
Pushover	TW2	0.005	0.73	1.99	2.73
	TW2 con elemento de borde compuesto	0.009	0.74	2.07	2.80
Cíclico	TW2	0.005	0.73	2.5	3.42
	TW2 con elemento de borde compuesto	0.009	0.74	2.63	3.55

Los resultados de razón de ductilidad mostrados en la Tabla 2 evidencian un leve incremento en la ductilidad del muro con elemento de borde compuesto respecto a la ductilidad del muro con refuerzo convencional, tanto en el análisis Pushover como en el análisis cíclico.

Además, en el gráfico de Comparación de resultados del análisis Pushover para los modelos TW2 (azul) y TW2 con elemento de borde compuesto (rojo)., se observó una disminución de la resistencia lateral de fluencia cuando el alma se encuentra en compresión, pasando de un valor de $Fy_1 = 76.46[kip]$ para el muro TW2 a $Fy_2 = 73.18[kip]$ para el muro con elemento de borde compuesto.

Cabe destacar que el desarrollo de los modelos numéricos presentados son meramente un ejemplo académico, con lo cual, el diseño del muro con tubo de acero en elemento de borde no cumple necesariamente con las disposiciones de diseño sísmico de nuestro país. Aún más, al tratarse de la simulación de un espécimen a escala ensayado experimentalmente por Thomsen & Wallace (1995), los espesores de 4 pulgadas (10.16 centímetros) no cumplen la normativa sobre diseño de elementos estructurales sometidos a actividad sísmica en Chile.

6. Conclusiones

Este trabajo presenta los resultados comparativos de la simulación numérica de dos muros de hormigón armado de sección transversal T sometidos a una rutina de desplazamientos en el extremo superior libre. El primer modelo analizado corresponde a la simulación del espécimen TW2 de la investigación desarrollada por Thomsen & Wallace (1995), mientras que el segundo modelo corresponde a un muro de igual materialidad y características geométricas, pero con distinto elemento de borde: elemento de borde compuesto. El objetivo de esta investigación es identificar los principales mecanismos de falla en este tipo de muros, realizar la modelación numérica de ambos muros mediante método de elementos finitos en OpenSees y posteriormente analizar y comparar los resultados obtenidos.

Este trabajo de investigación permitió la obtención de las siguientes conclusiones:

1. Los resultados obtenidos de la simulación del muro TW2 con refuerzo convencional se ajustan de buena manera a los resultados reportados por Thomsen & Wallace (1995). Esto teniendo en cuenta que el modelo desarrollado en OpenSees es una simplificación del modelo físico y que las diferencias entre los datos simulados y los datos experimentales se deben a este hecho. Para reafirmar lo anteriormente comentado, se calculó la máxima diferencia porcentual entre los resultados simulados y los resultados experimentales en el caso del alma en compresión, y el valor obtenido es de 13.5%. Este valor fue obtenido para un nivel de desplazamiento de techo de -3.68 pulgadas.
2. A partir de la comparación de comportamiento hysterético de ambos modelos, se concluye que la inclusión del tubo de acero en el elemento de borde incrementa la capacidad de disipación de energía, además de incrementar la capacidad de resistencia lateral en el sentido de carga de ala en compresión. Asimismo, la forma de las curvas de histéresis del muro TW2 con elemento de borde compuesto permiten inferir que el comportamiento de este muro es dominado por flexión, situación deseable en el diseño de muros estructurales de hormigón armado, dado el carácter dúctil de las fallas por flexión.
3. El gráfico de comparación de Momento – Rotación en la base demuestra que la inclusión del tubo de acero en el elemento de borde del muro incrementa la capacidad de resistencia a momento, obteniéndose mayores momentos resistentes y menores rotaciones en la base, para los mismos niveles de desplazamientos de techo impuestos.
4. El ajuste de curva elastoplástica perfecta aplicado a las curvas de Pushover de ambos muros demostró una disminución de la capacidad de resistencia ante cargas laterales en el caso del muro TW2 con elemento de borde compuesto, cuando el sentido de carga genera compresión en el alma. Al analizar los desplazamientos de fluencia, desplazamientos en estado ultimo y la razón de ductilidad del análisis Pushover y del análisis cíclico, se observó un leve incremento en la capacidad de deformación del muro con elemento de borde compuesto respecto al mismo muro con refuerzo convencional en el elemento de borde.

En resumen, este estudio concluye que al incluir un tubo de acero en el elemento de borde del alma del muro de sección T se aumenta la resistencia de carga lateral y resistencia a momento en la base del muro, además de incrementarse la capacidad de disipación de energía. Respecto a la capacidad de deformación del muro, los resultados del análisis Pushover y su ajuste de curva EPP permitieron demostrar un leve incremento en la razón de ductilidad.

Dado el carácter de este estudio, el cual es netamente un ejercicio académico de simulación numérica, queda como tarea pendiente la creación de modelos de muros de hormigón armado de sección T con tubos de acero en el elemento de borde del alma y muros de las mismas características geométricas con refuerzo convencional, para un posterior ensayo en laboratorio y recolección de datos experimentales. De esta manera se podrá verificar, analizar, evaluar y comparar experimentalmente el comportamiento de un muro con refuerzo de tubos de acero embebidos en el elemento de borde, respecto al comportamiento de muros de sección T con refuerzo de barras longitudinales y estribos de confinamiento.

Finalmente, este estudio ilustra ciertos cambios en el comportamiento de muros de sección T al incluir un tubo de acero en el elemento de borde del alma. No obstante, los datos obtenidos no son suficientes para desarrollar provisiones de diseño de elementos de borde compuestos en muros de estas características geométricas.

7. Referencias

- American Institute of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings ANSI / AISC 360-16. In *American Institute of Steel Construction* (Vol. 3, p. 676). https://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/publicacion/especificacion_para_construcciones_de_acero_-_aisc_360-16_0.pdf
- Architectural Institute of Japan. (2014). AIJ standard for Structural Calculation of Reinforced Concrete Structures Revised 2018. *Architectural Institute of Japan*.
- Behrouzi, A., Mock, A., Lowes, L., Lehman, D. E., & Kuchma, D. (2015). *Summary of Large-Scale Nonplanar Reinforced Concrete Wall Tests* (p. 40). https://digitalcommons.calpoly.edu/aen_fac/101
- Beyer, K., Dazio, A., & Priestley, M. J. N. (2008). Quasi-static cyclic tests of two U-shaped reinforced concrete walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1023–1053. <https://doi.org/10.1080/13632460802003272>
- Brueggen. (2009). Performance of T-shaped Reinforced Concrete Structural Walls under Multi-Directional Loading [University of Minnesota]. In *Journal of Human Development* (Vol. 6, Issue 1). <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.34>
- Chang, G. A., & Mander, J. B. (1994). Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part I – Evaluation of Seismic Capacity. In *NCEER Technical Report No. NCEER-94-0006*.
- Elremaily, A., & Azizinamini, A. (2002). Behavior and strength of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(12), 1567–1591. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00005-6)
- European Committee For Standardization. (1994). *EuroCode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* (Vol. 1). British Standards Institution.
- European Committee For Standardization. (1998). *EuroCode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures*. British Standards Institution.
- Han, L. H., & An, Y. F. (2014). Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 93, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.10.019>
- Ile, N., & Reynouard, J. M. (2005). Behaviour of U-shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(1), 67–94. <https://doi.org/10.1080/13632460509350534>
- Ji, X., Sun, Y., Qian, J., & Lu, X. (2015). Seismic behavior and modeling of steel reinforced concrete (SRC) walls. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 44, 955–972. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Kolozvari, K., Kalbasi, K., Orakcal, K., Massone, L. M., & Wallace, J. (2019). Shear–flexure-interaction models for planar and flanged reinforced concrete walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(12), 6391–6417. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00658-5>
- Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. (2015a). *SFI MVLEM - Cyclic Shear-Flexure Interaction Model for RC Walls - OpenSeesWiki*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/SFI_MVLEM_-_Cyclic_Shear-Flexure_Interaction_Model_for_RC_Walls
- Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2015b). *Shear-flexure interaction modeling for reinforced concrete structural walls and columns under reversed cyclic loading*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, PEER Report No. 2015/12. http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2015/webPEER-2015-12-kolozvari.pdf
- Lee, H. J., Park, H. G., & Choi, I. R. (2019). Eccentric compression behavior of concrete-encased-and-filled steel tube columns with high-strength circular steel tube. *Thin-Walled Structures*, 144(March), 106339. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106339>
- Lowes, L., Pugh, J., & Lehman, D. (2014). *Nonlinear Analysis of Concrete Wall Buildings Using OpenSees Acknowledgements*.
- Lu, X., Xie, L., Guan, H., Huang, Y., & Lu, X. (2015). A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees. *Finite Elements in Analysis and Design*, 98, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.01.006>
- Lu, Y., & Panagiotou, M. (2014). Three-dimensional cyclic beam-truss model for nonplanar reinforced concrete walls. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 140(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-)

- Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1973). Method of Analysis for Cyclically Loaded R. C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending. *Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Loads*, 15–22.
- Oesterle, R. G., Fiorato, A. E., Johal, L. S., Carpenter, J. E., Russel, H. G., & Corley, W. G. (1976). *Earthquake resistant structural walls - Tests of isolated walls*.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (n.d.). *OpenSees - The Open System for Earthquake Engineering Simulation*. <https://apps.peer.berkeley.edu/products/openssees.html>
- Qian, J., Jiang, Z., & Ji, X. (2012). Behavior of steel tube-reinforced concrete composite walls subjected to high axial force and cyclic loading. *Engineering Structures*, 36, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.026>
- Susantha, K. A. S., Ge, H., & Usami, T. (2001). Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes. *Engineering Structures*, 23(10), 1331–1347. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00020-7)
- Thomsen, J. H., & Wallace, J. W. (1995). Displacement-based design of reinforced concrete structural walls: Experimental studies of walls with rectangular and T-shaped cross sections. *Department of Civil and Environmental Engineering, Rep. No. C*(June), 375.
- Tran, T. A., & Wallace, J. W. (2012). Experimental Study of Nonlinear Flexural and Shear Deformations of Reinforced Concrete Structural Walls. *15th World Conference of Earthquake Engineering*.
- Wu, L., Tian, Y., Su, Y., & Chen, H. (2018). Seismic performance of precast composite shear walls reinforced by concrete-filled steel tubes. *Engineering Structures*, 162(November 2017), 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.069>
- Ying, M., & Jin-Xin, G. (2018). Seismic failure modes and deformation capacity of reinforced concrete columns under cyclic loads. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 80–91. <https://doi.org/10.3311/PPci.9893>
- Zhang, Q., Bai, L., Liang, X., & Xiong, E. (2016). Experimental study on seismic behavior of steel tube confined high-strength concrete shear walls. *Journal of Vibroengineering*, 18(4), 2263–2277. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16657>
- Zhang, Z. W., & Li, B. (2014). Evaluation of Seismic Performance of Slender L- Shaped and T-Shaped Rc Structural Walls. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 1–11.