

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DELGADOS
EN CONCRETO REFORZADO TÍPICOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO
TÚNEL

ANGIE JULIANA ARÉVALO SANJUAN
MILTON ALONSO GONZALEZ SANCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DELGADOS
EN CONCRETO REFORZADO TÍPICOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO
TÚNEL

ANGIE JULIANA ARÉVALO SANJUAN
MILTON ALONSO GONZALEZ SANCHEZ

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director
ALVARO VIVIESCAS JAIMES
PhD. En Ingeniería de la Construcción

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios primero que todo por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y sabiduría para lograr mis objetivos, además de su infinito amor.

A mis padres Carmen Elena Sanjuán y Volmar Arévalo Tosecano por haberme dado la vida, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, su motivación constante que me ha permitido ser la persona que soy hoy en día, por el valor mostrado para salir adelante y por todo su amor.

A mi hermano Volmar Francis Arévalo por estar conmigo en este camino para lograr esta meta, por su amor y por ser una de las razones que me motivaron a culminar esta carrera.

A mi compañero de tesis Milton Alonso por impulsarme, apoyarme y acompañarme durante la elaboración de este proyecto.

A Lynda María Álvarez por su colaboración en parte del proyecto, por sus consejos y su constante compañía a lo largo de todo ese proceso, por tenerme paciencia y su motivación.

A mis familiares y amigos que me acompañaron en este proceso y en ocasiones me brindaron su ayuda y compañía, a todas las personas que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

Angie Juliana Arévalo Sanjuán

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, la gloria es y será siempre para Él, sin su dirección, gracia, favor e incondicional amor me hubiese sido imposible iniciar y culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Carmen Sanchez y Milton Gonzalez, y mis hermanos, que han sido la principal motivación a lo largo de estos años, su confianza en mí siempre me ha llevado a dar lo mejor y su constante apoyo facilitó la superación de cada obstáculo.

A mi compañera de trabajo de grado Angie Juliana que siempre me brindó su apoyo y compañía a pesar de tantos imprevistos, sus ideas, aportes y disposición fueron muy importantes para elaborar este proyecto.

A familiares y amigos que me acompañaron en esta etapa ofreciendo siempre de la mejor manera su ayuda, apoyo y buenos momentos.

Milton Alonso Gonzalez Sanchez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma mater, que nos brindó los espacios y profesores a lo largo de toda nuestra carrera, lo que influyó en lo que hoy consideramos una buena e íntegra formación profesional.

Agradecemos el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS, a través del proyecto 1895 “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES TIPO TÚNEL EN ZONAS DE ALTA AMENAZA SÍSMICA FASE 1”, bajo el cual se desarrolló este proyecto de grado.

Al Ingeniero Álvaro Viviescas Jaimes, director de este proyecto por su colaboración y por los aportes que nos brindó, y por ser soporte y guía en este trabajo.

A Jaime Vega por su constante ayuda en la elaboración de este proyecto, por todas las enseñanzas brindadas y por su apoyo hasta culminar el proyecto.

A la empresa OTECO LTDA, que en cabeza del ingeniero Adriano Otero, nos facilitó los materiales necesarios para implementar el sistema de postensado en nuestro proyecto.

Al taller de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander que en varias oportunidades nos abrió sus puertas y prestó sus equipos para fines constructivos del proyecto.

A todos nuestros maestros por sus enseñanzas y a nuestros compañeros de clase por todas las experiencias brindadas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 EDIFICIOS CON SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO TÚNEL	21
2.2 DESEMPEÑO OBSERVADO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL ANTE EVENTOS SÍSMICOS Y MECANISMOS DE FALLA.....	22
2.3 CONSIDERACIÓN DE ELEMENTOS DE BORDE EN MUROS	25
2.4 RESISTENCIA Y RIGIDEZ EN MUROS DE CONCRETO REFORZADO ...	25
2.5 TIPOS DE FALLAS CARACTERISTICAS EN LOS MUROS DE CONCRETO REFORZADO	26
2.5.1 Falla por flexión.....	26
2.5.2 Falla por tracción diagonal por corte.....	27
2.5.3 Falla por adherencia	27
2.5.4 Falla por deslizamiento	27
2.6 CONCRETO POSTENSADO.....	28
2.6.1 Perdidas por embutimiento de cuña	29
2.7 REQUERIMIENTOS	29
2.8 MODELO DE FIBRAS EN EL SOFTWARE MIDAS GEN	30
2.8.1 Modelo por fibras.	30
2.8.2 Análisis Tiempo-Historia	31

3.	CONFIGURACION DEL ESPECIMEN	33
3.1	DEFINICIÓN DEL ESPÉCIMEN	33
3.2	VIGA DE CIMENTACIÓN	34
3.3	MURO	35
3.4	VIGA SUPERIOR	36
3.5	SISTEMA DE POSTENSADO	36
3.6	MATERIALES	38
3.6.1	Concreto	38
3.6.2	Acero	38
4.	APLICACIÓN DE CARGA AXIAL AL ESPECIMEN Y PROPUESTA DE PROTOCOLO DE CARGA LATERAL	39
5.	MODELO DE NUMÉRICO FIBRAS POR MEDIO DEL SOFTWARE MIDAS GEN©	42
5.1	DEFINICIÓN DE MATERIALES	43
5.1.1	Modelo constitutivo del concreto	43
5.1.2	Modelo constitutivo del acero	44
5.2	DISCRETIZACIÓN DE LA SECCIÓN	45
5.3	CARGAS APLICADAS	45
5.3.1	Carga vertical	45
5.3.2	Carga lateral	46
5.4	RESULTADOS	48
5.4.1	Comparación del comportamiento de los resultados obtenidos en el modelo con otros ensayos de muros	51
6.	EVIDENCIA DEL ESPECIMEN CONSTRUIDO	56
7.	CONCLUSIONES	57

BIBLIOGRAFÍA58

ANEXOS62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Edificio con sistema industrializado tipo túnel.	21
Figura 2. Daño en los primeros pisos de una edificación con muros delgados.	23
Figura 3. Localización de daño en elementos de borde de muros delgados durante el terremoto de Chile 2010.	24
Figura 4. Modos de falla de muros. (a) Fluencia del refuerzo vertical, (b) Tracción diagonal, (c) Deslizamiento juntas de construcción.	28
Figura 5. Sistema de postensado.	29
Figura 6. Modelo de elementos por fibras.	30
Figura 7. Detalle viga de cimentación.	34
Figura 8. Detalle del refuerzo del muro.	35
Figura 9. Sección del muro.	35
Figura 10. Detalle viga superior del muro.	36
Figura 11. Detalle de postensado en el muro.	37
Figura 12. Cables de postensado, platinas y aplicación de fuerza axial con gato hidráulico.	37
Figura 13. Pieza metálica necesaria para el acople.	39
Figura 14. Protocolo de carga lateral.	41
Figura 15. Modelo Geométrico en el software.	43
Figura 16. Modelo constitutivo de Mander.	43

Figura 17. Modelo constitutivo de Menegotto-Pinto.	44
Figura 18. Discretización del muro por fibras.	45
Figura 19. Distribución de carga axial en el muro, como esfuerzo [kN/m ²].	46
Figura 20. Datos a ingresar para protocolo Paso 2.	47
Figura 21. Datos a ingresar para protocolo Paso 3.	47
Figura 22. Diagrama de interacción del muro, Carga Axial Vs Momento.	48
Figura 23. Diagrama momento curvatura para el desplazamiento de 28.5 mm.	49
Figura 24. Curva Carga – Deformación.	49
Figura 25. Estado de la fibra.	50
Figura 26. (a) Tensión posición 1 y 2. (b) Tensión posición 3. (c) Tensión posición 4 y 5. (d) Compresión posición 1. (e) Compresión posición 2. (f) Compresión posición 3,4 y 5.	50
Figura 27. Comportamiento del muro modelado en tensión.	52
Figura 28. Comportamiento del muro modelado en compresión.	52
Figura 29. Muro W1.	53
Figura 30. Muro W1-SR.	54
Figura 31. Muro SW7.	55
Figura 32. Espécimen construido y presente en el laboratorio de estructuras de la UIS.	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos del protocolo de carga lateral.	41
Tabla 2. Parámetros Geométricos del muro.	42
Tabla 3. Parámetros considerados de ensayos de muros disponibles en la literatura.	51

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden ser visualizados en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A. Modelo en midas Gen, 2019 (v1.1)

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DELGADOS EN CONCRETO REFORZADO TÍPICOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO TÚNEL.*

AUTORES: ANGIE JULIANA ARÉVALO SANJUAN
MILTON ALONSO GONZALEZ SANCHEZ**

PALABRAS CLAVE: SISTEMA TIPO TÚNEL, MUROS DELGADOS, MODELAMIENTO, ANÁLISIS NO LINEAL, MECANISMO DE DAÑO.

DESCRIPCIÓN:

En este documento se describe la configuración, modelamiento numérico y construcción de un muro delgado estructural en concreto reforzado representativo del sistema constructivo tipo túnel de la ciudad de Bucaramanga, posteriormente será ensayado bajo condiciones de carga cíclica con el objetivo de identificar el mecanismo de daño y establecer su curva de comportamiento experimental, esto como continuidad al proyecto presentado en este documento, a su vez se presentan los parámetros con los cuales el muro fue modelado en el software MIDAS GEN¹ realizando un análisis no lineal por el método de elementos finitos, con el fin de tener una posible respuesta del muro ante el ensayo experimental, resultados que fueron validados con ensayos bajo condiciones similares, realizados por otros autores. El trabajo actual se llevó a cabo con el fin de hacer un aporte al proyecto de investigación INME “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES TIPO TÚNEL EN ZONAS DE ALTA AMENAZA SÍSMICA FASE 1” código 1895, el cual está enfocado en caracterizar las edificaciones en muros delgados de la ciudad y en base a esto identificar las variables que influyen en la respuesta estructural de este tipo de sistemas estructurales ante eventos sísmicos de gran magnitud.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, PhD. En Ingeniería de la Construcción.

¹ Midas Gen, 2019 (v1.1). Licencia académica grupo de investigación INME-UIS

ABSTRACT

TITLE: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DELGADOS EN CONCRETO REFORZADO TÍPICOS DEL SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO TÚNEL.*

AUTHORS: ANGIE JULIANA ARÉVALO SANJUAN
MILTON ALONSO GONZALEZ SANCHEZ**

KEYWORDS: TUNNEL FORM SYSTEM, THIN WALLS, MODELLING, NON-LINEAR ANALYSIS MECHANISM OF DAMAGE.

DESCRIPCIÓN:

This document describes the configuration, numerical modeling and construction of a thin structural wall in reinforced concrete which represents the tunnel type construction system of the city of Bucaramanga. It is proposed to be tested in the future under cyclic loading conditions with the objective of identify the mechanism of damage and establish its experimental behavior curve. This as a continuity to the project presented in this document, which in turn presents the parameters with which the wall was modeled in the MIDAS GEN (software licensed by the Universidad Industrial de Santander) software performing a nonlinear analysis by the method of finite elements in order to have a possible response of the wall to the experimental test, results that were validated with tests under similar conditions, carried out by other authors. The current work was carried out in order to make a contribution to the INME research project "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES TIPO TÚNEL EN ZONAS DE ALTA AMENAZA SÍSMICA FASE 1" ID 1895, which is focused on characterizing buildings in thin walls of the city, and based on this identify the variables that influence the structural response of this type of structural systems to large seismic events.

* Bachelor thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, PhD. En Ingeniería de la Construcción.

INTRODUCCIÓN

Debido al alto crecimiento demográfico en nuestro país, que conlleva demanda de vivienda especialmente concentrada en zonas urbanas y a la escasez de terreno urbanizable en la ciudad de Bucaramanga es necesario optar por construcción en altura, es decir, con edificios residenciales en altura para lo cual predomina la construcción industrializada conocida como tipo túnel debido a su rapidez constructiva y consecuentes ahorros. Bucaramanga está situada en una zona de actividad sísmica alta, lo que genera incertidumbre por el desempeño de tal sistema ante un gran evento sísmico.

El sistema industrializado denominado tipo túnel debido a su aspecto, está compuesto por muros delgados (sistema resistente ante cargas verticales y laterales) y losas de un espesor muy similar al de los muros, estos dos componentes se funden simultáneamente con formaleta ubicada vertical y horizontalmente (formando un túnel). El foco de análisis de este tipo de edificaciones se centra en el desempeño de los muros pertenecientes a los primeros pisos, incluyendo sótanos, zonas que fueron establecidas como críticas según autores que analizaron tal desempeño en edificaciones que sufrieron los esfuerzos cíclicos del terremoto de Chile en el 2010².

El grupo de investigación INME de la Universidad Industrial de Santander adscrito a la escuela de Ingeniería Civil lleva a cabo el proyecto de investigación código 1895 enfocado en identificar los principales mecanismos de daño en sistemas

² JÜNEMANN R., DE LA LLERA J.C., HUBE M.A., CIFUENTES L.A., and KAUSEL E. "A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake" En: Engineering Structures. Vol 82 (2015), págs. 168-185.

estructurales de muros delgados pertenecientes a edificios altos ante acciones sísmicas, como apoyo a este proyecto el presente trabajo fue realizado y es presentado en el presente artículo.

Se busca determinar el modo de falla y la carga capaz de soportar un muro delgado rectangular en concreto reforzado representativo de un primer piso en un edificio tipo túnel de Bucaramanga. Por tanto se realizó un espécimen en el laboratorio para un futuro ensayo y un modelo numérico en el software MIDAS GEN, para con esto validar la configuración experimental y definir el sistema de instrumentación para los ensayos de muros delgados.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un ensayo de muro en concreto reforzado con sección rectangular en el marco del proyecto de investigación “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICACIONES TIPO TÚNEL EN ZONAS DE ALTA AMENAZA SÍSMICA FASE 1”. Incluye construcción del espécimen.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar mediante el método de elementos finitos el muro seleccionado, identificando el mecanismo de daño y su curva carga-deformación.
- Diseñar la configuración experimental y construir el muro a ensayar, incluyendo sistema para postensado vertical.
- Definir el protocolo de carga para la realización del ensayo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EDIFICIOS CON SISTEMA ESTRUCTURAL TIPO TÚNEL

El sistema constructivo tipo túnel, es una técnica de construcción industrializada, la cual se usa para realizar estructuras de concreto armado compuestas por dos elementos estructurales: muros de carga y losas, fundidos monolíticamente; cuyos espesores comparados con los del sistema constructivo tradicional son relativamente delgados. Los muros de carga, también llamados muros de corte o muros de pared delgada, son los principales componentes de este sistema³. Este sistema posee una configuración simétrica en planos horizontales y verticales que permiten un flujo continuo de construcción y una mejor garantía de calidad, también tiene mejor desempeño sísmico en comparación con el sistema dual y el sistema aporticado⁴.

Figura 1. Edificio con sistema industrializado tipo túnel.



Fuente: KALKAN E., Y BAHADIR Y. "Pros and Cons of Multistory RC Tunnel-Form (Box-Type) Buildings". En: *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2007.

³ RUDDY REGNAUTT. Sistema tipo túnel. [En línea]. (Recuperado en 20 de abril de 2017) Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/57845794/SISTEMA-TIPO-TUNEL>.

⁴ KALKAN E., Y BAHADIR Y. "Pros and Cons of Multistory RC Tunnel-Form (Box-Type) Buildings". En: *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2007.

La estimación de costos es altamente significativa para los ingenieros que trabajan en esta industria de la construcción (individuos o empresas), especialmente cuando tienen que tomar decisiones para implementar y/o mantener el proceso y usar los recursos de la manera más eficiente posible⁵. En la construcción de este sistema se emplean formaletas metálicas, que facilitan el sistema de encofrado, vaciado, y desencofrado al día siguiente, lo que reduce la cantidad de mano de obra, el costo y desperdicio de material⁶.

2.2 DESEMPEÑO OBSERVADO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL ANTE EVENTOS SÍSMICOS Y MECANISMOS DE FALLA

El evento sísmico presentado en Chile el 27 de febrero de 2010 permitió observar en gran manera el comportamiento de edificios multipisos ante la gran magnitud del sismo (Magnitud de 8.8 Mw), provocando daños severos, colapsos parciales y totales en edificios con sistema estructural tipo túnel de diferentes ciudades. Los daños observados se concentraron en el primer, segundo piso y primer sótano tal como se muestra en la figura 2, primando entre los daños, el aplastamiento del concreto, pandeo y fractura de las barras de acero en los bordes de los muros (figura 3), daños ocasionados por los esfuerzos cíclicos de tensión y compresión, y fueron atribuidos a diversos factores, entre ellos: alta carga axial debido al incremento de altura en edificios e irregularidades en altura en altura principalmente en los primeros pisos^{7 8}.

⁵ ILERISOY Z., AND TUNA M. "Construction cost of tunnel form buildings". En: *Gradevinar*. Vol 65. (2013). Pp 135-141.

⁶ MOLINA J. TOLOZA M. Metodología del sistema constructivo con formaleta metálica tipo manopotrable. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2008.

⁷ JÜNEMANN R., DE LA LLERA J.C., HUBE M.A., CIFUENTES L.A., and KAUSEL E. "A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake" En: *Engineering Structures*. Vol 82 (2015), págs. 168-185.

⁸ HUBE M.A., MARIHUÉN A., DE LA LLERA J.C., STOJADINOVIC B. "Seismic behavior of slender reinforced concrete walls". En: *Engineering Structures*. Vol. 80. (2014). Pp. 377-388.

Figura 2. Daño en los primeros pisos de una edificación con muros delgados.



Fuente: WESTENEK B., DE LA LLERA JC., BESA JJ., JÜNEMANN R., LÜDERS C., INAUDI JA., RIDDELL R., JORDÁN R. "Analysis and interpretation of the seismic response of RC buildings in Concepción during the February 27, 2010, Chile earthquake." En: Bull Earthquake Eng. Vol 11. (2013). Pp 69-91.

Una de las principales causas de este comportamiento fue asociado a la rigidez del sistema y sobre-resistencia en el momento, conduciendo a bajos requerimientos de desplazamiento y demanda de ductilidad, otra de las causas fue el pobre o casi inexistente confinamiento de los elementos de borde o muros demasiado delgados para ser confinados. Todo esto debido a la ausencia de requerimientos en los códigos que establecieran límites de carga axial, espesor de muros y detalles en el confinamientos, afectando la capacidad de ductilidad de los muros y de la estructura en general, y haciéndolos más propensos a fallas frágiles ^{9 10 11}.

⁹ JÜNEMANN R., DE LA LLERA J.C., HUBE M.A., CIFUENTES L.A., and KAUSEL E. "A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake" En: Engineering Structures. Vol 82 (2015), págs. 168-185.

¹⁰ CARPENTER L., NAEIM, F., LEW, M., YOUSSEF, N., ROJAS, F., SARAGONI, G., AND ADAROS, M. "Performance of tall buildings in Viña del Mar in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake." En: The Structural Design of Tall and Special Buildings. Vol 20 (2010).

¹¹ WESTENENK B., DE LA LLERA JC., BESA JJ., JÜNEMANN R., MOEHLE J., LÜDERS C., INAUDI JA., ELWOOD KJ., HWANG S-J. "Response of reinforced concrete buildings in Concepción during the Maule earthquake". En: Earthquake Spectra. 2012. 28(S1):S257–80.

En el sismo de Chile en el 2010 se observó zonas de daño localizadas en los elementos de borde de los muros, esto podría explicarse por la amplia separación del refuerzo transversal de tales elementos, en base a esto Artera C., To D. y Moehle J., comprobaron que el comportamiento dúctil de los elementos de borde no se logra solo cumpliendo las especificaciones del ACI y plantean que un mayor confinamiento mejora el comportamiento de los elementos de borde pero no produciría una respuesta dúctil¹².

Figura 3. Localización de daño en elementos de borde de muros delgados durante el terremoto de Chile 2010.



Fuente: ARTETA C., TO D., MOEHLE. "Experimental response of boundary elements of code-compliant reinforced concrete shear walls". Tenth U.S. National conference on Earthquake Engineering. Anchorage, Alaska. 2014.

El mecanismo de falla frágil accionado por flexión, no se considera rutinariamente durante el diseño sísmico, y se demostró experimentalmente que es un posible mecanismo de falla para edificaciones tipo túnel si el refuerzo vertical de los muros está diseñado y detallado incorrectamente, sin embargo, si el refuerzo se provee correctamente hay un cambio en el modo de falla de frágil a dúctil¹³.

¹² ARTETA C., TO D., MOEHLE. "Experimental response of boundary elements of code-compliant reinforced concrete shear walls". Tenth U.S. National conference on Earthquake Engineering. Anchorage, Alaska. 2014.

¹³ Kalkan E., y Bahadir Y. "Pros and Cons of Multistory RC Tunnel-Form (Box-Type) Buildings". The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2007.

2.3 CONSIDERACIÓN DE ELEMENTOS DE BORDE EN MUROS

Los muros con elementos de borde tienden a tener un mayor rendimiento sísmico, esto se debe a la mayor área confinada en comparación con los muros rectangulares. En efecto, las áreas confinadas más grandes son capaces de resistir las fuerzas de compresión crecientes cuando el muro se carga en el plano a altos niveles de desplazamiento. Además, debido a la mayor concentración de refuerzo vertical en el área confinada, los muros podrían resistir deformaciones a tracción más altas de modo que los muros podrían alcanzar capacidades de ductilidad más alta¹⁴.

2.4 RESISTENCIA Y RIGIDEZ EN MUROS DE CONCRETO REFORZADO

Para garantizar la estabilidad de las estructuras de edificios bajo fuertes movimientos sísmicos, los muros de cortante de concreto reforzado deben mantener una alta proporción de su resistencia y rigidez inicial y poseer una alta capacidad de disipación de energía. Para los muros de cortante en voladizo, el mecanismo de disipación de energía es preferiblemente por flexión el cual se produce en las bases de los muros donde se espera que se desarrollen rotulaciones plásticas. Los códigos contienen una serie de disposiciones de diseño que están destinadas a confinar la respuesta inelástica en las bases del muro y asegurar que se impidan modos de fallo no deseables, tales como cortante, el cual se produce cuando la capacidad del muro a cortante es inferior a la diseñada por flexión¹⁵.

¹⁴ EL-AZIZY O., SHEDID M., EL-DAKHAKHNI W., AND DRYSDALE R. "Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete structural walls with different end configurations.". En: Engineering Structures. Vol 101 (2015), Pp 246-263.

¹⁵ GHORBANIRENANI I., TREMBLAY R., LÉGER P., M.ASCE., AND LECLERC M. "Shake Table Testing of Slender RC Shear Walls Subjected to Eastern North America Seismic Ground Motions". En: Journal of structural engineering. Vol 138 (2012), Pp 1515-1529.

Cuando se considera una construcción resistente a sismos, debe recordarse que las partes relativamente rígidas de la estructura atraerán fuerzas mucho mayores que las partes más flexibles. Una estructura con muros de concreto reforzado será muy rígida y atraerá grandes fuerzas sísmicas. Si éstos son frágiles y fallan, el resto de la estructura no será capaz de asumir la redistribución de esfuerzos. Pero si son dúctiles (lo serán si son reforzados apropiadamente), serán muy efectivos en resistir las fuerzas sísmicas¹⁶.

2.5 TIPOS DE FALLAS CARACTERISTICAS EN LOS MUROS DE CONCRETO REFORZADO

Estás fallas han sido observadas en inspecciones post-sísmicas y su causa está relacionada a diversos factores tales como: las propiedades mecánicas del concreto y el acero, la relación altura/longitud en los muros, cantidad y distribución del refuerzo, entre otras.

2.5.1 Falla por flexión: (Figura 4 (a)). Este tipo de falla se presenta cuando la capacidad de la resistencia a la fuerza cortante (proporcionada por el refuerzo horizontal y el concreto) supera a la de flexión (generada por el refuerzo vertical y la carga axial), en este tipo de falla como se muestra en la Figura 4 se presenta un balanceo del muro en las regiones de articulación plástica, lo que genera el aplastamiento del concreto en esta zona y la cedencia o pandeo del refuerzo vertical. Es importante señalar que la falla por flexión tiende a concentrarse en la zona más débil del muro, esto en caso de que haya irregularidad en altura^{17 18}.

¹⁶ MCCORMAC J., BROWN R. Diseño de concreto reforzado. Octava edición. 2011. 548 p. ISBN: 978-607-707-231-7.

¹⁷ BARTOLOMÉ A., QUIUN D., SILVA W. "Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010". Pontificia Universidad Católica del Perú. 2011.

¹⁸ BONDARENKO S., GARCIA I. Manual de cálculo y diseño de muros estructurales de concreto armado. Trabajo de grado. Universidad de Carabobo. 2012.

2.5.2 Falla por tracción diagonal por corte: (Figura 4 (b)) Este tipo de falla se presenta cuando su capacidad resistente a fuerza cortante es inferior a la de flexión. Se caracteriza por la presencia de grietas diagonales y al igual que en una falla por flexión puede ocurrir aplastamiento del concreto en las esquinas inferiores del muro el grado de este efecto depende del confinamiento en estas zonas¹⁹.

2.5.3 Falla por adherencia: Son aquellas que se forman a lo largo de la dirección de las barras longitudinales. Se pueden inducir como consecuencia de los fenómenos de retracción o asentamiento plástico. También pueden formarse grietas longitudinales por falta de adherencia entre el hormigón y el acero de refuerzo²⁰.

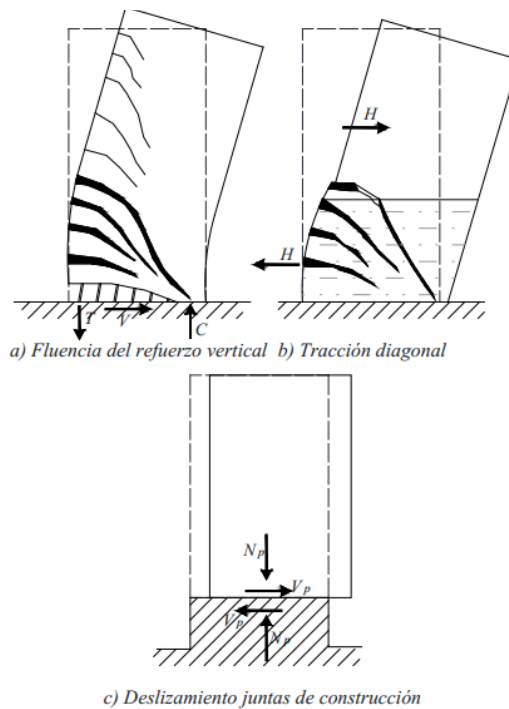
2.5.4 Falla por deslizamiento: (Figura 4 (c)) Generalmente se produce en las juntas de construcción del muro y puede ser una consecuencia de la falla por flexión cuando se conectan dos grietas producidas por esta falla, la falla por deslizamiento puede agravarse si en la zona hay traslapos del refuerzo vertical, juntas lisas o segregación del concreto. En ocasiones se produce porque para el diseño del refuerzo no se tiene en cuenta la interacción de este con los esfuerzos cortantes que se pueden presentar²¹.

¹⁹ BARTOLOMÉ A., QUIJUN D., SILVA W. "Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010". Pontificia Universidad Católica del Perú. 2011.

²⁰ BRICEÑO A., CARRERAS G. Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011. Trabajo de Grado. UCAB: Universidad Católica Andrés Bello. Octubre del 2013.

²¹ BONDARENKO S., GARCIA I. Manual de cálculo y diseño de muros estructurales de concreto armado. Trabajo de grado. Universidad de Carabobo. 2012.

Figura 4. Modos de falla de muros. (a) Fluencia del refuerzo vertical, (b) Tracción diagonal, (c) Deslizamiento juntas de construcción.



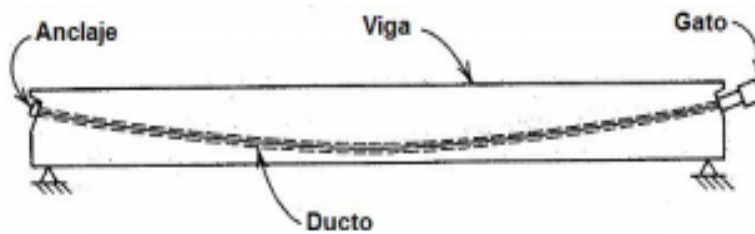
Fuente: BARTOLOMÉ A., QUIJUN D., SILVA W. “Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010”. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2011.

2.6 CONCRETO POSTENSADO

El concreto postensado está compuesto por unos cables de acero que son colocados dentro de unos ductos, los cuales pueden estar lubricados (postensado no adherido) o pueden ser rellenados con una lechada (postensado adherido), para posteriormente ser tensionados por medio de gatos hidráulicos colocados contra el miembro de concreto y posteriormente se fija el cable por medio de anclajes en sus extremos²², como se observa en la Figura 5.

²² PRIETO J. Programa para el trazado de cables en vigas pre-esforzadas continuas para puentes Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

Figura 5. Sistema de postensado.



Fuente: PRIETO J. Programa para el trazado de cables en vigas pre-esforzadas continuas para puentes Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

2.6.1 Perdidas por embutimiento de cuña. Cuando se sueltan los gatos hidráulicos y las fuerzas de postensado se transfieren al extremo del sistema de anclaje, ocurre un pequeño deslizamiento de los cables. La cuña se desliza antes de que los tendones queden amordazados firmemente por el anclaje y la magnitud de este corrimiento depende del tipo de cuña y del esfuerzo en los cables, con un valor promedio de 2,5 mm y en los cables pesados de 5 mm²³. En largas longitudes el deslizamiento de la cuña se puede despreciar, lo que permite estimar la fuerza de tensionamiento acertadamente.

2.7 REQUERIMIENTOS

Con el fin de evitar la inestabilidad fuera del plano de los muros en concreto reforzado cuando se someten a cargas sísmicas, la mayoría de los códigos internacionales imponen límites a relación altura/espesor de los muros. El actual diseño Colombiano (NSR-10 2010) que se basa en gran medida en el código ACI (Comité ACI 318 2011) permite dos métodos de diseño: 1. El muro puede ser diseñado como un miembro de compresión sometido a una combinación de acciones axiales, de flexión y de cortante. En este caso no se requieren

²³ PRIETO J. Programa para el trazado de cables en vigas pre-esforzadas continuas para puentes Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

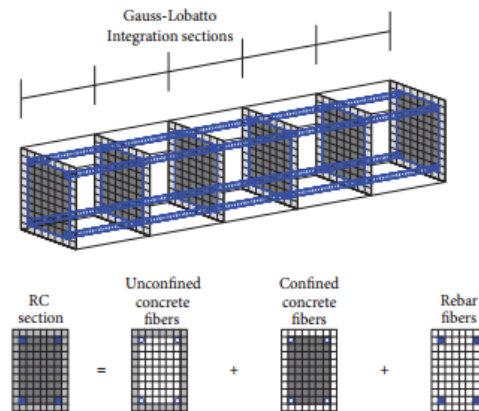
prescripciones explícitas sobre el grosor mínimo del muro, sino que se consideran implícitamente a través de un límite $h_w/b_w \leq 12$ que decide si debe realizarse un análisis de segundo orden para tener en cuenta los efectos de esbeltez. 2. Como alternativa, el muro puede ser diseñado de acuerdo con un método empírico, t en este caso el grosor debe respetar el límite²⁴.

2.8 MODELO DE FIBRAS EN EL SOFTWARE MIDAS GEN

Midas Gen permite realizar análisis y diseño de estructuras para estructuras convencionales y complejas. Este software utiliza una amplia gama de funciones especializadas de análisis de elementos finitos, así como teorías modernas de análisis estructural para obtener resultados precisos y prácticos.

2.8.1 Modelo por fibras.

Figura 6. Modelo de elementos por fibras.



Fuente: SOSA D., AREVALO D., MORA E., CORREA M., ALBUJA D., GOMEZ C. "Experimental and Analytical Study of Slender Reinforced Concrete Shear Wall under Cyclic In-Plane Lateral Load". En: Mathematical Problems in Engineering. Vol. (2017)

²⁴ ROSSO A., ALMEIDA J., BEYER K. "Stability of thin reinforced concrete walls under cyclic loads: state-of-the-art and new experimental findings.". En: Bull Earthquake Eng. Vol. 14 (2015), Pp 455-484.

Midas Gen permite discretizar la sección transversal de un elemento tipo “*beam*” (viga) en fibras tal y como se muestra en la Figura 6 las cuales se deforman axialmente; al utilizar un modelo por fibras la relación momento-curvatura de la sección puede ser trazada con gran precisión debido a que asume el modelo constitutivo del material de cada fibra y la distribución de deformaciones de la sección. También tiene la ventaja del movimiento del eje neutro con la fuerza axial²⁵.

Para el análisis por un modelo de fibras Midas Gen tiene las siguientes consideraciones:

- La sección se mantiene plana en el proceso de deformación y se supone perpendicular al eje del elemento, por consiguiente no se considera la adherencia del refuerzo y el concreto.
- El eje neutro de la sección se considera una línea recta a lo largo de toda la longitud del elemento.

Los elementos estructurales son considerados, generalmente, en el análisis de daño o modelación de estos en forma de “línea” o elemento barra, el método por modelo de fibras pretende establecer un acercamiento del refuerzo de los elementos, esto permite la estimación exacta de distribución de daño estructural y la prolongación de la inelasticidad del material a lo largo de la longitud del miembro como en el área de la sección, esto se puede representar explícitamente a través de este método²⁶.

2.8.2 Análisis Tiempo-Historia. El análisis inelástico tiempo-historia es un análisis dinámico, que considera la no linealidad material de una estructura.

²⁵ midas Gen, Analysis Manual

²⁶ SOSA D., AREVALO D., MORA E., CORREA M., ALBUJA D., GOMEZ C. “Experimental and Analytical Study of Slender Reinforced Concrete Shear Wall under Cyclic In-Plane Lateral Load”. En: Mathematical Problems in Engineering. Vol. (2017), Article ID: 4020563.

Teniendo en cuenta la gran demanda computacional de este tipo de análisis, los elementos no lineales se utilizan para representar los sectores donde se conoce y se concentra el daño de la estructura, y se supone que el resto se comporta de forma elástica.

A diferencia del análisis de historial de tiempo elástico, el análisis de historial de tiempo inelástico no se puede realizar utilizando el principio de superposición. Por ejemplo, los resultados de análisis de cargas estáticas y cargas sísmicas no pueden combinarse simplemente para representar los resultados de aquellas cargas que actúan simultáneamente. En su lugar, tales cargas (combinadas) se aplican como casos de carga individuales y la secuencia de carga o la continuidad de los casos de carga se pueden asignar para el análisis²⁷.

²⁷ midas Gen, Analysis Manual

3. CONFIGURACION DEL ESPECIMEN

A continuación se resaltarán las propiedades del material, breve explicación del diseño y detalle de cada uno de los componentes del espécimen, la construcción y la configuración del ensayo.

3.1 DEFINICIÓN DEL ESPÉCIMEN

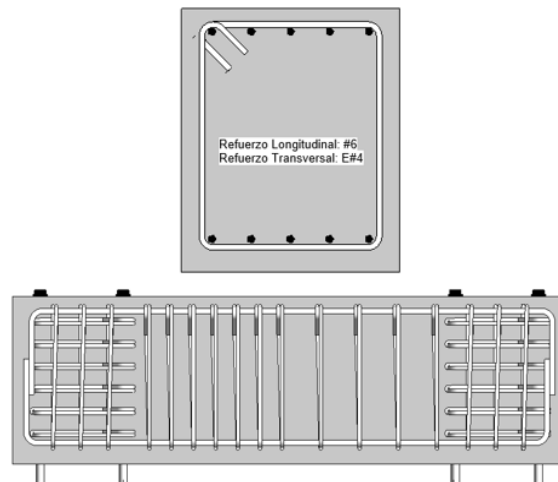
Las dimensiones y detalle del refuerzo que componen el espécimen se ven justificadas básicamente en dos fuentes, en primer lugar, el trabajo realizado previamente por el grupo de investigación INME donde se identificó el espesor y refuerzo a cortante típico de muros construidos en la ciudad de Bucaramanga, en segundo lugar, los anexos de trabajo de grado “COMPORTAMIENTO SISMICO NOLINEAL DE LOS EDIFICIOS CON SISTEMA ESTRUCTURAL DE MUROS”²⁸, donde se encuentran los planos estructurales de 6 proyectos reales realizados en la ciudad de Bucaramanga, de dichos planos se extrajo el detalle y despiece de los elementos de borde, los cuales son los que mayormente aportan resistencia al momento y carga axial, para la selección de la configuración de estos elementos se consideró las dimensiones y espesor del espécimen que fue definido previamente, como característico de este sistema en Bucaramanga.

²⁸ LOPÉZ J., MORENO J. Evaluación experimental del comportamiento biaxial de muros en concreto reforzado. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017.

3.2 VIGA DE CIMENTACIÓN

Para el diseño de la viga de cimentación fue considerado el máximo momento que teóricamente el muro según su configuración puede soportar, esto tomando como referencia el diagrama de interacción del muro definido, partiendo de esto, se modeló el elemento en el software SAP2000 obteniendo los diagramas de momento y cortante para posteriormente diseñar. La longitud, base y altura del elemento fueron 2 m, 0.5 m y 0.6 m respectivamente. Considerando que el elemento debía soportar una carga cíclica se asignó igual área de acero en la parte superior e inferior de la viga para el mismo momento crítico, este refuerzo lo componen 5 barras No. 6 (19.1 mm) en ambas partes de la viga. El refuerzo a cortante del elemento consistió en estribos No. 4 cerrados, ubicados en grupos cada 140 mm, 100 mm y 80 mm, optimizando y tomando como referencia el diagrama de cortante (Figura 7). La viga fue fijada a las platinas del suelo por medio de cuatro pernos de 1" en cada extremo, zonas en las que fue previsto un esfuerzo cortante considerable, por tanto, estas secciones fueron confinadas con estribos del diámetro ya mencionado.

Figura 7. Detalle viga de cimentación.

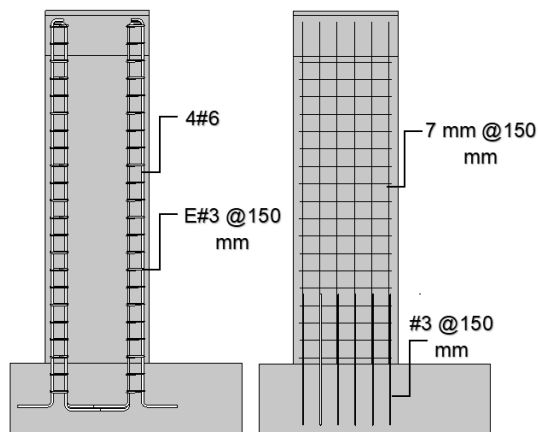


Fuente: Autores.

3.3 MURO

Fue definido un muro de sección rectangular con dos capas de refuerzo en malla electrosoldada lo que limita el desplazamiento fuera del plano y aumenta la estabilidad del muro cuando este se encuentra bajo deformaciones inelásticas, la longitud, altura y espesor del espécimen fueron de 0.9m, 2.65 m y 0.15 m respectivamente, garantizando la esbeltez del muro. La malla electrosoldada cuenta con un diámetro de 7 mm y con espaciamiento de 150 mm en las dos direcciones, todas las barras verticales fueron traslapadas con barras No. 3 (9.5mm) ancladas a la viga cimentación (Figura 8).

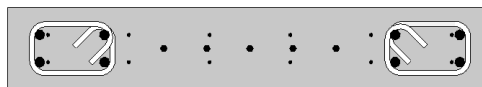
Figura 8. Detalle del refuerzo del muro.



Fuente: Autores.

Los elementos de borde se componen de 4 barras No. 6 (19.1 mm), confinadas por estribos No. 3 (9.5 mm) cada 15 centímetros (Figura 9).

Figura 9. Sección del muro.

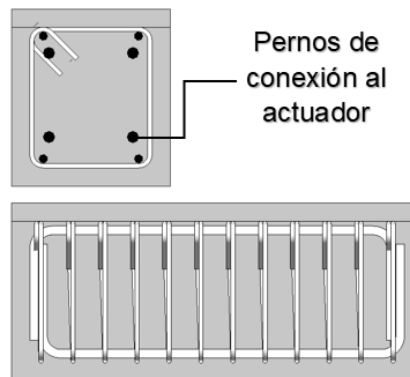


Fuente: Autores.

3.4 VIGA SUPERIOR

El diseño de la viga superior estuvo influenciado por la carga soportada en la parte superior de la viga producto del tensionamiento de los cables de postensado y su interacción con la parte superior del muro, al igual que con la viga de cimentación, este elemento se modeló en SAP2000 y se obtuvieron diagramas de momento y cortante para posteriormente diseñar. La longitud, base y altura del elemento son 0.9 m, 0.35 m y 0.39 m respectivamente. El refuerzo longitudinal lo componen 2 barras No. 6 (19.1 mm) tanto en la parte superior como inferior de la viga y refuerzo transversal consiste en estribos No. 3 separados cada 70 mm. En la viga fueron embebidos cuatro tubos de 1 ¼ " con el fin de conectar la viga y el actuador para realizar el ensayo (Figura 10).

Figura 10. Detalle viga superior del muro.



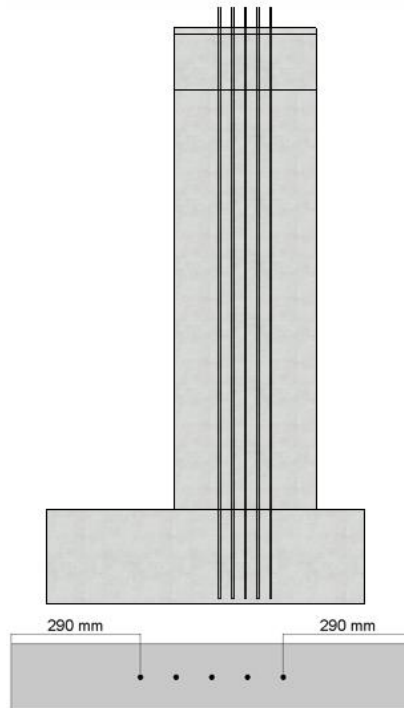
Fuente: Autores.

3.5 SISTEMA DE POSTENSADO

Se implementó un sistema de postensado no adherido, por medio del cual fue aplicada la fuerza axial al muro al momento de tensionar los cables por medio de un gato hidráulico (Figura 12). Este sistema está compuesto por 5 cables de ½" separados cada 80 mm que inician desde la base de la viga de cimentación hasta salir verticalmente por la viga superior, las platinas en la parte inicial del cable fueron

pre-instaladas y quedaron embebidas (Figura 11). Esta carga axial busca representar el efecto de los pisos superiores de la edificación.

Figura 11. Detalle de postensado en el muro.



Fuente: Autores.

Figura 12. Cables de postensado, platinas y aplicación de fuerza axial con gato hidráulico.



Fuente: Autores.

3.6 MATERIALES

El concreto y el acero son los materiales que componen cada parte del espécimen, en cuanto al acero se implementó tanto barras corrugadas como malla electrosoldada.

3.6.1 Concreto. Realizando los ensayos de granulometría, gravedades específicas, pesos unitarios (el tamaño máximo nominal del agregado utilizado para el concreto fue de 3/4") se obtuvieron los datos necesarios para diseñar el concreto basándonos en la metodología del ACI. La resistencia nominal a compresión diseñada fue de 28 MPa. El concreto fue mezclado en el laboratorio siguiendo una proporción aproximada de 1:2:2, realizando la fundida del espécimen en tres etapas (una por cada elemento). 6 cilindros de concreto fueron preparados y ensayados bajo compresión, 2 cilindros por cada etapa. Los cilindros se ensayaron a los 7 y 28 días después de la fecha de fundición. La resistencia a la compresión evaluada a los 28 días (promedio de 3 cilindros) fue de 34.1 MPa, la cual es 22% superior al valor definido en el diseño.

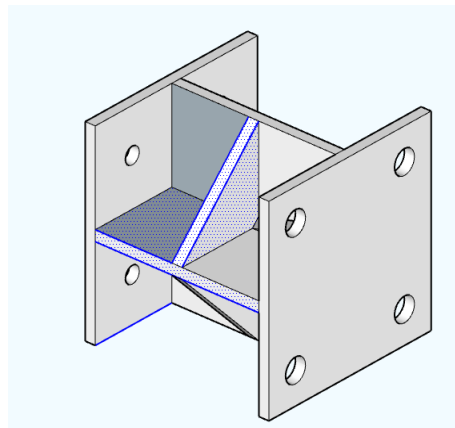
3.6.2 Acero. El acero de cada uno de los elementos se calculó teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente donde se describe en cada uno de los elementos del espécimen donde se tiene en cuenta una resistencia a la fluencia de 420 MPa.

4. APLICACIÓN DE CARGA AXIAL AL ESPECIMEN Y PROPUESTA DE PROTOCOLO DE CARGA LATERAL

Inicialmente el muro fue sometido a una carga axial constante que corresponde aproximadamente al 15% de la resistencia nominal a compresión de la sección transversal del muro ($0.15 \cdot A_g \cdot f_c$), esto se hizo por medio del sistema de postensado explicado anteriormente, considerando las pérdidas en un 18% por la corta distancia de los cables se estima que la carga axial a la que está sometido el muro es de 574 kN.

En el laboratorio de estructuras de la escuela de Ingeniería Civil se encuentra disponible un actuador hidráulico controlado por desplazamiento con una carrera máxima de 508 mm y una capacidad máxima de 500 kN, por medio de este equipo se podrá aplicar la carga cíclica lateral al muro. Para utilizar este equipo es necesario hacer un acople del actuador a la viga superior del muro, ya que inicialmente éste fue diseñado para un actuador diferente, este acople se hará por medio de una pieza metálica mostrada en la Figura 13, esta se encuentra disponible en el laboratorio.

Figura 13. Pieza metálica necesaria para el acople.



Fuente: Autores.

El muro estará sometido a una velocidad constante de 10 mm/min, el desplazamiento en el muro irá incrementando al paso del tiempo. Los ciclos de desplazamientos fueron diseñados basados en la fluencia del desplazamiento horizontal del muro (metodología aplicada por otros autores en los diferentes ensayos realizados). Se realizó la adecuación de la metodología nombrada, con los parámetros del muro construido. La curvatura de fluencia fue estimada con la ecuación (1), donde $\varepsilon_{sy} = 0.0021$ es la deformación última del acero y $l_w = 900 \text{ mm}$ es la longitud del muro.

$$\varphi_y = 1.5 \text{ to } 2.0 \frac{\varepsilon_{sy}}{l_w} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación 1, tenemos que en promedio la curvatura de fluencia es $\varphi_y = 4.1 \times 10^{-6}$, partiendo de este parámetro el desplazamiento horizontal de fluencia puede ser estimado con la ecuación 2, donde $h_w = 2650 \text{ mm}$ es la altura del muro.

$$\delta_y = \frac{h_w^2 \varphi_y}{3} \quad (2)$$

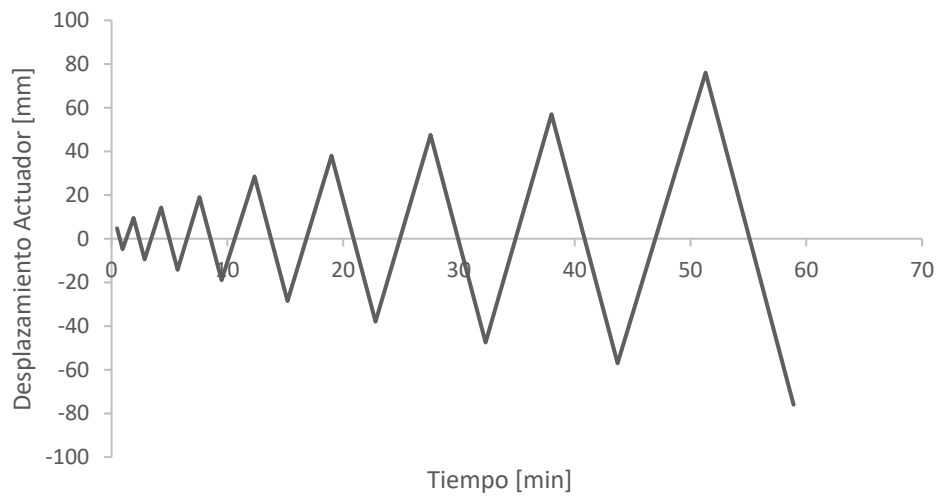
Por medio de la anterior ecuación se obtiene que $\delta_y = 9.5 \text{ mm}$. Este desplazamiento se va amplificando teniendo en cuenta lo que se denomina como factores de ductilidad, los cuales están dados por $\Delta_{aplicado}/\delta_y$. Teniendo en cuenta la literatura los factores de ductilidad escogidos son 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6 y 8^{29 30 31}. El protocolo de carga es mostrado en la Figura 14 y sus datos se encuentran en la Tabla 1.

²⁹ HUBE M.A., MARIHUÉN A., DE LA LLERA J.C., STOJADINOVIC B. "Seismic behavior of slender reinforced concrete walls". En: Engineering Structures. Vol. 80. (2014). Pp. 377-388.

³⁰ ALARCÓN C., HUBE M.A., DE LA LLERA J.C. "Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries". Engineering Structures. Vol 73 (2014) 13-23.

³¹ ALARCÓN C. Influence of axial load in the seismic behavior of reinforced concrete walls with nonseismic detailing. Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2013.

Figura 14. Protocolo de carga lateral.



Fuente: Autores.

Tabla 1. Datos del protocolo de carga lateral.

Desplazamiento H (mm)	Tiempo (min)
4.75	0.475
-4.75	0.95
9.5	1.9
-9.5	2.85
14.25	4.275
-14.25	5.7
19	7.6
-19	9.5
28.5	12.35
-28.5	15.2
38	19
-38	22.8
47.5	27.55
-47.5	32.3
57	38
-57	43.7
76	51.3
-76	58.9

Fuente: Autores.

5. MODELO DE NUMÉRICO FIBRAS POR MEDIO DEL SOFTWARE MIDAS GEN©

Con el objetivo de estimar el comportamiento del muro en el ensayo propuesto se realizó un modelo de fibras utilizando el software MIDAS GEN, la tabla 2 muestra un resumen de los parámetros geométricos del modelo realizado.

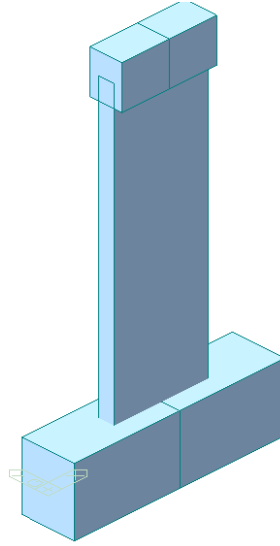
Tabla 2. *Parámetros Geométricos del muro.*

Parámetros Geométricos del muro			
hw [mm]	2650		
lw [mm]	900		
tw [mm]	150		
Refuerzo			
ϕV [mm]	7	SV [mm]	150
ϕH [mm]	7	SH [mm]	150
E.B. Ref Long	8 # 6	E.B. Ref Trans	# 3 @ 15 [cm]

Fuente: Autores.

Tal y como se muestra en la Figura 15 se modeló el espécimen igual a como fue construido, este está conformado por una viga de cimentación, el muro y una viga superior, la cual es necesaria para la aplicación de la carga tanto lateral como vertical. Con respecto a la carga vertical el aplicar esta en la viga superior permite la distribución casi uniforme de esta carga en el muro, debido a que la rigidez de esta viga es mayor.

Figura 15. Modelo Geométrico en el software.



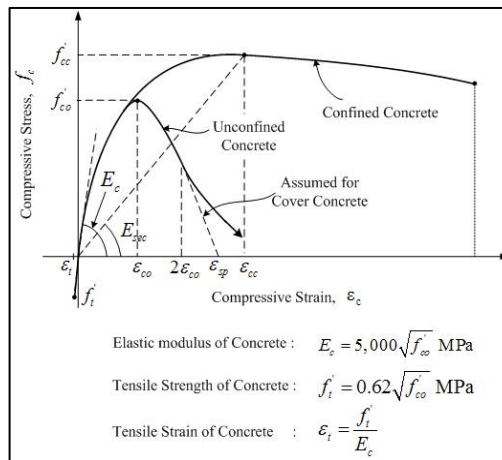
Fuente: Autores.

5.1 DEFINICIÓN DE MATERIALES

El software ofrece una variedad de modelos constitutivos para el acero y el concreto, estos fueron seleccionados y asignados a la geometría del modelo.

5.1.1 Modelo constitutivo del concreto.

Figura 16. Modelo constitutivo de Mander.

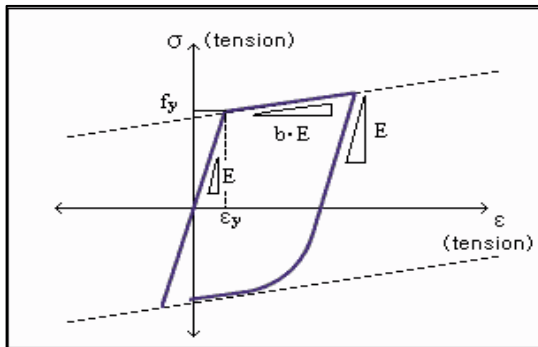


Fuente: midas Gen, Analysis Manual

Dentro de las opciones que el programa ofrece para modelar este material se escogió *Mander Model* el cual trabaja tanto con concreto confinado como con concreto no confinado como es nuestro caso, tiene el comportamiento no lineal cíclico. El modelo Mander se basa en la curva de tensión deformación de un solo eje, sugerida por Popovic (1973)³², este modelo representa el comportamiento uniaxial no lineal para cada fibra de hormigón obtenida en la discretización de la sección transversal. En el modelo no se consideró el confinamiento que aporta el refuerzo transversal a los elementos de borde, se asignó un solo tipo de concreto a toda la sección³³.

5.1.2 Modelo constitutivo del acero. Dentro de las opciones que el programa ofrece para modelar este material se escogió *Menegotto-Pinto Model* el cual incluye efectos de endurecimiento por esfuerzo isotrópico³⁴.

Figura 17. Modelo constitutivo de Menegotto-Pinto.



Fuente: midas Gen, Analysis Manual

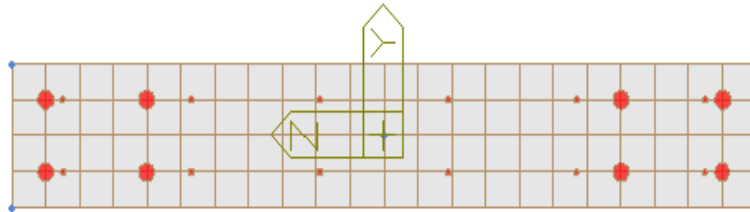
³² AHMAD, S., PILAKOUTAS, K., KHAN, Q.U.Z. et al. "Stress-Strain Model for Low-Strength Concrete in Uni-Axial Compression". En: Arabian Journal for Science and Engineering, 40 (2014). 313 - 328.

³³ midas Gen, Analysis Manual

³⁴ midas Gen, Analysis Manual

5.2 DISCRETIZACIÓN DE LA SECCIÓN

Figura 18. Discretización del muro por fibras.



Fuente: Autores.

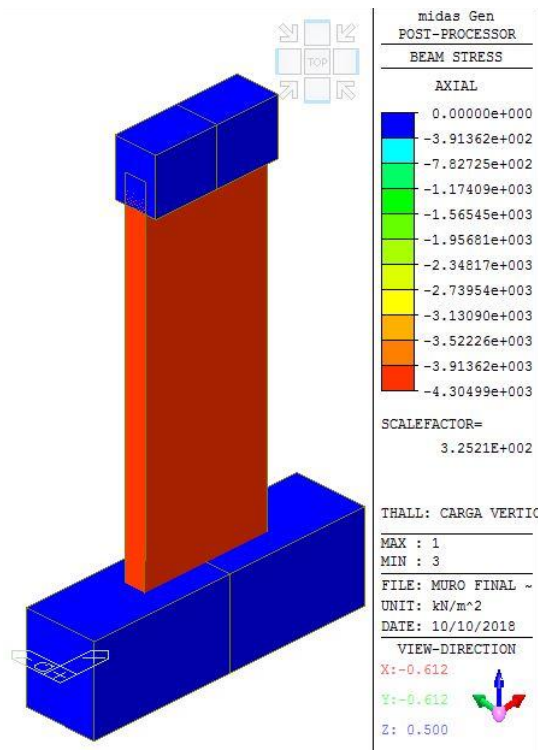
En el modelo realizado la sección del muro se divide en 88 fibras, las cuales 22 divisiones se distribuyen alrededor del eje local Z de la sección y 4 divisiones en el eje local Y, a esta sección se le asigna el material correspondiente. Se ubica el refuerzo que consta de 4 Barras # 6 para cada elemento de borde y barras de 7 mm de diámetro cada 150 mm, a estos elementos se les asignó el material definido previamente. La Figura 18 muestra la sección discretizada con sus respectivos materiales.

5.3 CARGAS APLICADAS

Siguiendo el protocolo de carga propuesto, el muro modelado se cargó axialmente y a su vez se asignó el protocolo de carga lateral controlado por desplazamiento.

5.3.1 Carga vertical. Tal y como se explicó en la configuración del ensayo, el muro está sometido bajo una carga vertical constante de 574 kN la cual se supone que se encuentra uniforme en la longitud del muro. Esta carga fue introducida en el modelo cargando la viga superior para garantizar la uniformidad de su distribución en el muro (Figura 19).

Figura 19. Distribución de carga axial en el muro, como esfuerzo [kN/m²].



Fuente: Autores.

5.3.2 Carga lateral. Para esta carga fue definido un protocolo el cual está compuesto por desplazamientos aplicados de forma cíclica en la parte superior del muro, para poder lograr esto, se ingresaron los desplazamientos por la opción de carga dinámica, tiempo-historia, ésta permite ingresar cada ciclo de carga como casos individuales (denominados “Pasos”) que pueden ir acumulando los resultados y manteniendo el desplazamiento del ciclo anterior, en total se ingresaron 19 casos de carga partiendo con la carga vertical y seguida de los 9 ciclos contemplados en el protocolo. En las Figuras 20 y 21 se observa el ingreso de 2 casos consecutivos del protocolo; el mismo proceso se repite con los siguientes 17 casos mencionados anteriormente variando únicamente la casilla de Load Case con el nombre del caso anterior al que se está agregando y la casilla de máximo desplazamiento con el que le corresponda al caso correspondiente.

Figura 20. Datos a ingresar para protocolo Paso 2.

The screenshot shows the 'Add/Modify Time History Load Cases' dialog box. The 'Name' field is 'Paso 2'. Under 'Analysis Type', 'Nonlinear' is selected. Under 'Analysis Method', 'Static' is selected. Under 'Time History Type', 'Transient' is selected. 'Geometric Nonlinearity Type' is set to 'None'. 'Increment Steps' is 100 and 'Step Number Increment for Output' is 1. In the 'Order in Sequential Loading' section, 'Subsequent to' is checked, and the dropdown menu is set to 'TH : Paso 1'. Two checkboxes are checked: 'Cumulate D/V/A Results' and 'Keep Final Step Loads Constant'. Under 'Static Loading Control', 'Displacement Control' is selected. In the 'Control Option' section, 'Master Node Control' is selected with 'Master Node' set to 6 and 'Master Direction' set to DX. 'Maximum Displacement' is -0.00475 m. 'Output Option' has 'Cumulate Load Increment History for Output' unchecked. 'Time Integration Parameters' shows 'Newmark Method' with 'Gamma' at 0.5 and 'Beta' at 0.25, and 'Constant Acceleration' selected. 'Nonlinear Analysis Control Parameters' has 'Perform Iteration' checked.

Figura 21. Datos a ingresar para protocolo Paso 3.

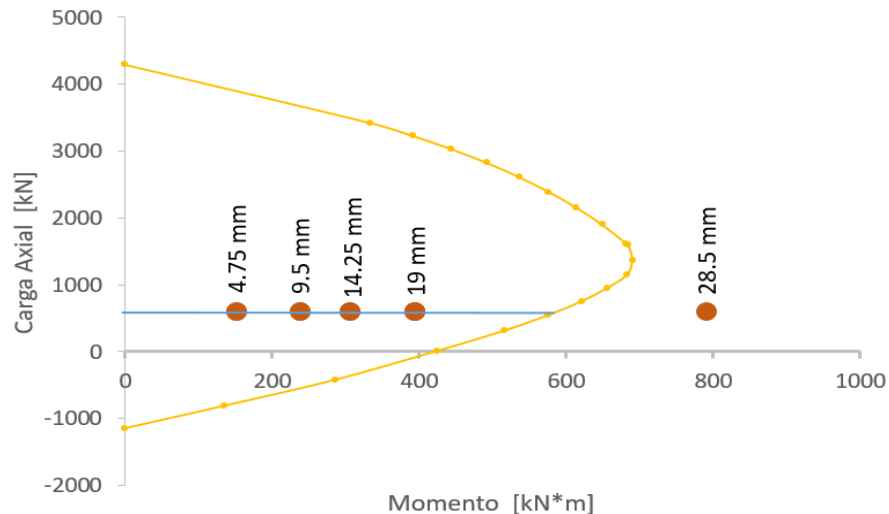
The screenshot shows the 'Add/Modify Time History Load Cases' dialog box. The 'Name' field is 'Paso 3'. Under 'Analysis Type', 'Nonlinear' is selected. Under 'Analysis Method', 'Static' is selected. Under 'Time History Type', 'Transient' is selected. 'Geometric Nonlinearity Type' is set to 'None'. 'Increment Steps' is 100 and 'Step Number Increment for Output' is 1. In the 'Order in Sequential Loading' section, 'Subsequent to' is checked, and the dropdown menu is set to 'TH : Paso 2'. Two checkboxes are checked: 'Cumulate D/V/A Results' and 'Keep Final Step Loads Constant'. Under 'Static Loading Control', 'Displacement Control' is selected. The 'Control Option' section is partially visible.

Fuente: Autores.

5.4 RESULTADOS

En la Figura 22 se presenta el diagrama de interacción calculado a partir de la sección del muro, se puede observar que el momento resistente del muro es de 690 kN*m, también se presentan los valores de momento producto de los desplazamientos aplicados en el modelo, sobre una línea situada en el valor de carga axial aplicada. Debido a que el momento resistente en el modelo es mayor al estimado por el diagrama de interacción, un punto se encuentra por fuera de este, cuyo desplazamiento equivale al límite (28.5 mm).

Figura 22. Diagrama de interacción del muro, Carga Axial Vs Momento.

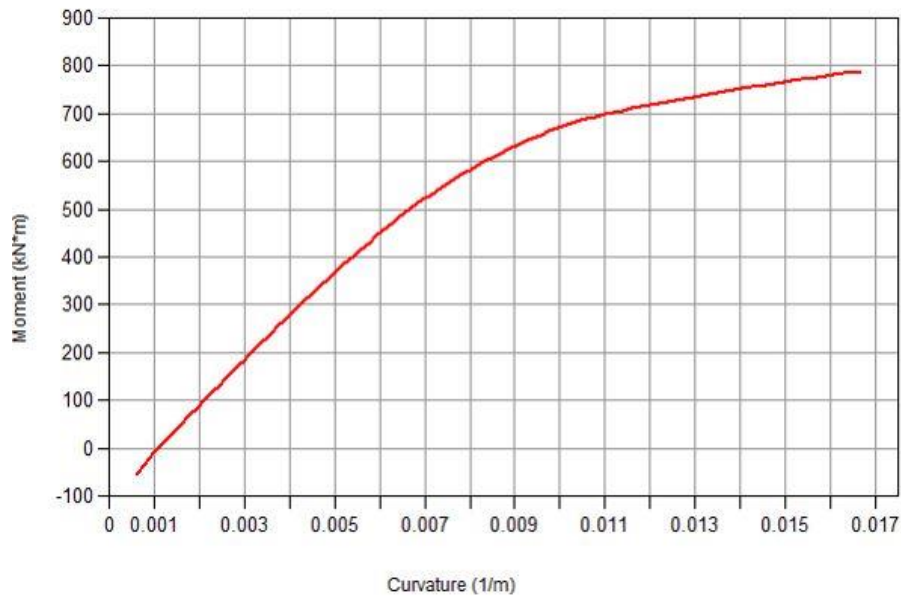


Fuente: Autores.

Enfocándonos en la sección transversal discretizada del muro podremos observar el comportamiento que éste tiene a lo largo de los ciclos de carga, por medio del modelo realizado se pudo apreciar que el muro supera su momento resistente cuando el desplazamiento aplicado es 28.5 mm, por esta razón los resultados presentados a continuación serán para éste ciclo crítico.

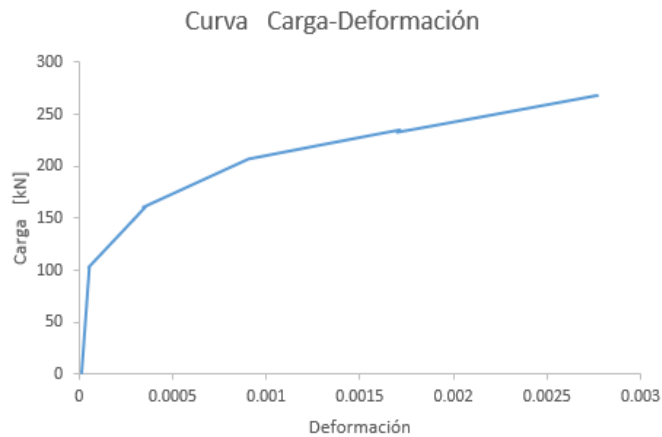
El diagrama momento curvatura (Figura 23) producto del desplazamiento del ciclo crítico nombrado anteriormente evidencia que el momento resistente fue superado. El valor de carga límite también puede ser apreciado en la Figura 24 la cual describe la curva de carga-deformación del muro, teniendo una magnitud de 267.52 kN.

Figura 23. Diagrama momento curvatura para el desplazamiento de 28.5 mm.



Fuente: Autores.

Figura 24. Curva Carga – Deformación.



Fuente: Autores.

Figura 25. Estado de la fibra.

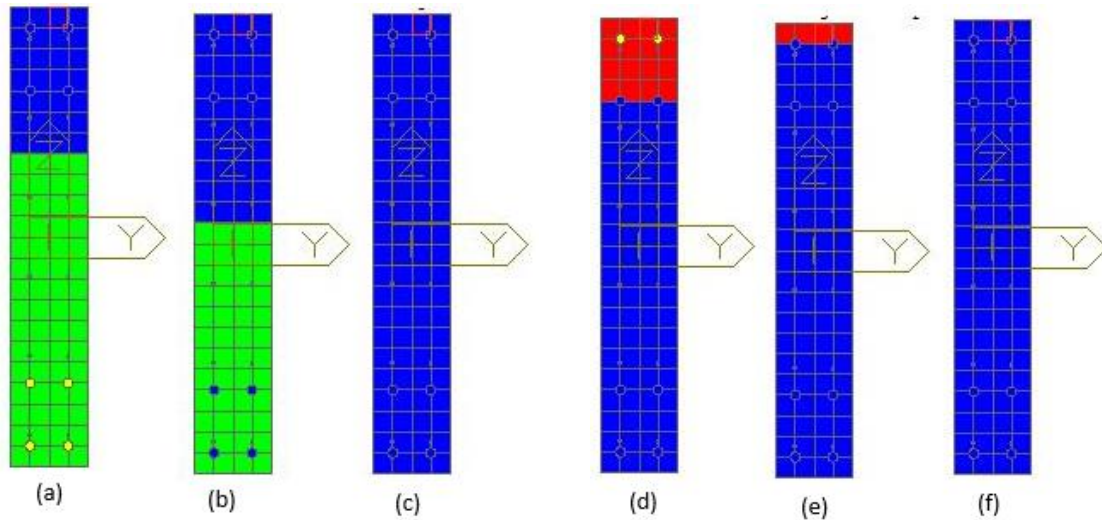
Status	
Green	Crack
Blue	Elastic
Red	Crushing
Yellow	Yielding

Fuente: Autores.

La Figura 26 presenta los resultados que refleja el comportamiento de la sección transversal del muro, tanto en tensión como en compresión. Se puede apreciar dicho comportamiento en 5 posiciones a lo largo de la altura del muro, las cuales son: Posición 1 [0 hw], Posición 2 [$\frac{1}{4}$ hw], Posición 3 [$\frac{1}{2}$ hw], Posición 4 [$\frac{3}{4}$ hw], Posición 5 [hw], siendo hw la altura del muro.

La sección transversal sometida a flexión evidencia la fisuración del concreto y la fluencia del acero, en la posición 1 y 2 el 68% de la sección presenta fisuración, y las barras de acero dentro de esta área entran en fluencia; en la posición 3 el 63% de la sección presenta fisuración y el acero no llega a la fluencia; en la posición 4 y 5 la sección en su totalidad se conserva en el rango elástico.

Figura 26. (a) Tensión posición 1 y 2. (b) Tensión posición 3. (c) Tensión posición 4 y 5. (d) Compresión posición 1. (e) Compresión posición 2. (f) Compresión posición 3,4 y 5.



Fuente: Autores.

La sección transversal sometida a compresión evidencia aplastamiento del concreto y la fluencia del acero, en la posición 1 el 18% de la sección sufre aplastamiento del concreto por efectos de compresión, a su vez el acero fluye; en la posición 2 el 5% de la sección sufre aplastamiento pero no se presenta fluencia en el acero; en las posiciones 3,4 y 5 la sección en su totalidad se mantiene en el rango elástico.

5.4.1 Comparación del comportamiento de los resultados obtenidos en el modelo con otros ensayos de muros

Con el objetivo de validar el modelo realizado, se realizó una comparación con 3 diferentes muros que fueron ensayados por diferentes autores, los cuales cuentan con características similares al modelado, entre ellas el espesor, geometría, la relación de esbeltez, la relación de carga axial (ALR), la consideración de los elementos de borde, los diferentes parámetros de cada muro se pueden observar en la Tabla 3, los ensayos realizados en los muros contemplados en la tabla se realizaron bajo carga cíclica controlada por desplazamiento, lo que también resulta común con la configuración experimental propuesta en el presente artículo.

Tabla 3. Parámetros considerados de ensayos de muros disponibles en la literatura.

Muro	AUTORES	W1-SR ³⁵	W1 ³⁶	SW7 ³⁷
tw [mm]	150	150	100	100
hw/lw	2.9	2.2	2.3	2.5
ALR	0.15*Agf'c	0.1*Agf'c	0.15*Agf'c	0.24*Agf'c
Sección	Rectangular	Rectangular	Rectangular	Rectangular
E. Borde	Si	Si	Si	Si

Fuente: Autores.

³⁵ ABDULRIDHA A., PALERMO D. "Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall". En: Engineering Structures. Vol. 147 (2017), Pp. 77-89.

³⁶ ALARCON C., HUBE M.A., DE LA LLERA J.C. "Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries". Engineering Structures. Vol 73 (2014) 13-23.

³⁷ ZHANG Y., WANG Z. "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Subjected to High Axial Loading". En: ACI Structural Journal. Title no. 97-S75, 2000.

Dado que no el modelo no permite observar el comportamiento del muro a lo largo de su longitud en la vista frontal, se realizó una interpolación gráfica entre las secciones localizadas en las diferentes posiciones nombradas anteriormente para obtener la estimación de tal comportamiento, se puede observar en las Figuras 27 y 28.

Figura 28. Comportamiento del muro modelado en compresión.

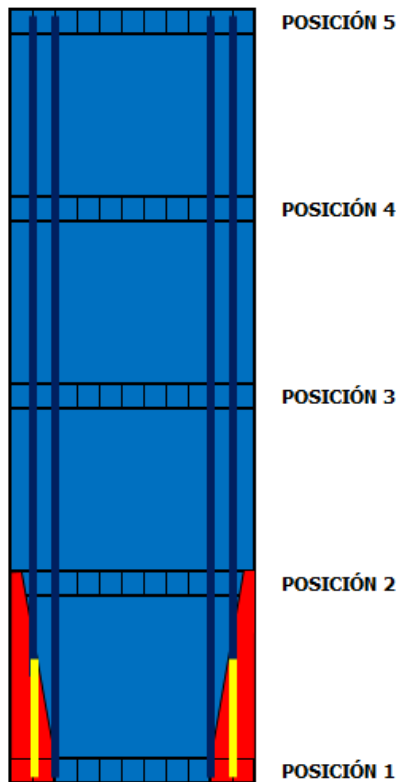
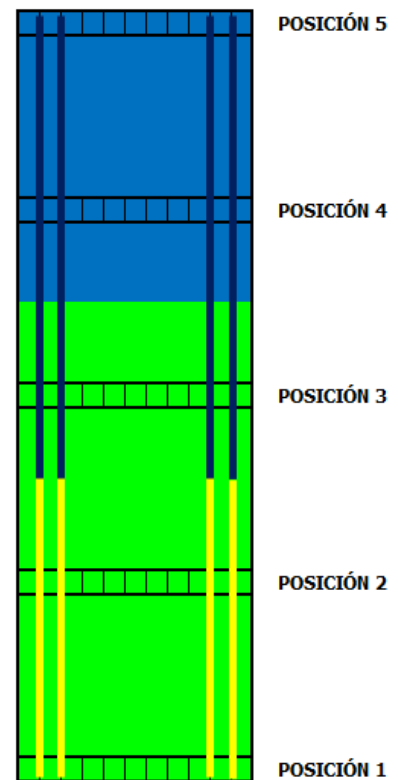


Figura 27. Comportamiento del muro modelado en tensión.



Fuente: Autores.

El mecanismo de falla característico en este tipo de muros bajo la carga aplicada, es una falla por flexión, la cual genera el aplastamiento del concreto en los talones o esquinas inferiores del muro y las fisuras a lo largo de la altura del muro indican que hay una falla por tracción diagonal, producto del esfuerzo cortante al que fueron sometidos los especímenes. En ambos casos es común encontrar el refuerzo longitudinal bajo fluencia y pandeo (donde se presenta el aplastamiento del

concreto) como consecuencia de los esfuerzos cíclicos a compresión y tensión. Esto no solo se presenta en muros de edificios de gran altura, el mismo mecanismo de falla ha sido observado en muros representativos de edificios de baja altura, los cuales han sido ensayados bajo condiciones similares de carga³⁸.

Figura 29. Muro W1.



Fuente: ALARCON C., HUBE M.A., DE LA LLERA J.C. "Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries". Engineering Structures. Vol 73 (2014) 13-23.

En las figuras 27 y 28 podemos observar el comportamiento que tiene el muro en el instante en que supera el momento resistente (a un desplazamiento de 28.5 mm) tanto en el concreto como en los elementos de borde, la malla de refuerzo no es

³⁸ CARRILLO, J., SÁNCHEZ-CRUZ, M., VIVIESCAS, Á. "Strains on steel reinforcements in lowrise concrete walls during shake table tests." En: Ingeniería e Investigación, Vol. 34, No. 1, April, 2014, pp. 36 – 41.

mostrada en estas figuras ya que se comporta de manera similar al acero de los elementos de borde y se tiene una mayor visibilidad de las posiciones para hacer la respectiva comparación.

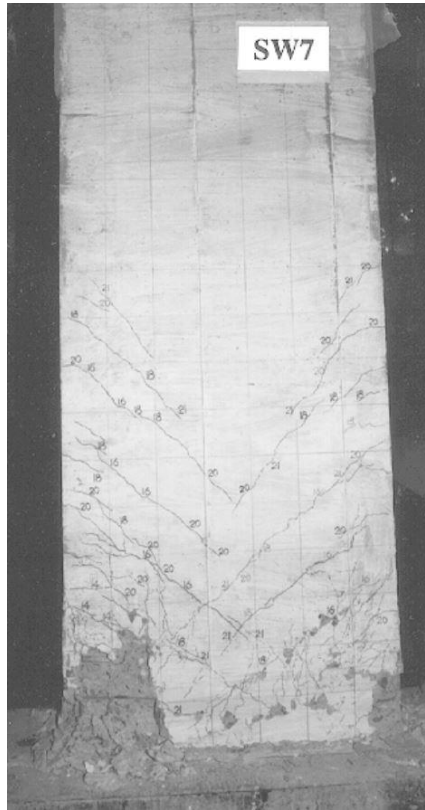
Figura 30. Muro W1-SR.



Fuente: AHMAD, S., PILAKOUTAS, K., KHAN, Q.U.Z. et al. "Stress-Strain Model for Low-Strength Concrete in Uni-Axial Compression". En: *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40 (2014). 313 – 328.

En las Figuras 29, 30 y 31 mostradas anteriormente se puede apreciar en los muros W1-SR y SW7 que debido a la carga aplicada se presenta una cantidad de grietas significativas mayormente en la parte inferior del muro, y de las cuales a lo largo de la altura del espécimen éstas aparecieron cerca del borde de la zona de compresión lo cual es muy similar al comportamiento del muro modelado (Figura 26) teniendo aún la parte superior de este en estado elástico. Las barras de acero del refuerzo vertical (malla electrosoldada y elementos de borde) entran en su estado de fluencia según lo descrito por los autores en el artículo de cada imagen.

Figura 31. Muro SW7.



Fuente: ABDULRIDHA A., PALERMO D. "Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall". En: Engineering Structures. Vol. 147 (2017), Pp. 77-89.

En las figuras 30 y 31 podemos observar más claramente que el comportamiento de los muros a compresión es muy similar al del muro modelado (Figura 27) donde el aplastamiento del concreto se da en la parte inferior del muro, en mayor cantidad en las esquinas para las cuales se desprendió una gran cantidad de concreto y el concreto de la parte interior del muro se deteriora significativamente.

6. EVIDENCIA DEL ESPECIMEN CONSTRUIDO

Se muestra evidencia del espécimen construido y disponible en el laboratorio de estructuras de la Universidad Industrial de Santander. El muro se encuentra cargado axialmente tal y como se describió en este documento.

Figura 32. *Especimen construido y presente en el laboratorio de estructuras de la UIS.*



Fuente: Autores.

7. CONCLUSIONES

- El equipo disponible en el laboratorio está en capacidad de realizar el ensayo, teniendo en cuenta su extensión máxima y carga máxima. Se aclara que es necesario utilizar el acople para el actuador, el cual también se encuentra disponible en el laboratorio.
- El modelo numérico realizado es consistente con el comportamiento real de un muro bajo las condiciones de carga aplicada, presentando en cada paso, la carga a la que fue sometido y el estado de cada fibra para la sección discretizada.
- El mecanismo de falla característico en muros bajos las condiciones de carga dadas, está dado por: (i) falla por flexión teniendo como consecuencia el aplastamiento del concreto en las esquinas inferiores del muro y el pandeo del refuerzo vertical. (ii) falla por tracción diagonal evidenciando fisuras diagonales a lo largo de la altura del muro.
- Los resultados aquí obtenidos sirven para compararse con un futuro ensayo al muro que se dejó construido ya que se tuvo en cuenta en detalle cada uno de los componentes de este, teniendo en cuenta que la carga vertical constante ya fue aplicada. Se aclara que los resultados experimentales pueden diferir con lo descrito en este documento debido a la influencia del sistema de postensado implementado.

BIBLIOGRAFÍA

- ABDULRIDHA A., PALERMO D. "Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall". En: Engineering Structures. Vol. 147 (2017), Pp. 77-89.
- AHMAD, S., PILAKOUTAS, K., KHAN, Q.U.Z. et al. "Stress-Strain Model for Low-Strength Concrete in Uni-Axial Compression". En: Arabian Journal for Science and Engineering, 40 (2014). 313 - 328.
- ALARCÓN C. Influence of axial load in the seismic behavior of reinforced concrete walls with nonseismic detailing. Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2013.
- ALARCON C., HUBE M.A., DE LA LLERA J.C. "Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries". Engineering Structures. Vol 73 (2014) 13-23.
- ARTETA C., TO D., MOEHLE. "Experimental response of boundary elements of code-compliant reinforced concrete shear walls". Tenth U.S. National conference on Earthquake Engineering. Anchorage, Alaska. 2014.
- BARTOLOMÉ A., QUIJUN D., SILVA W. "Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010". Pontificia Universidad Católica del Perú. 2011.

- BONDARENKO S., GARCIA I. Manual de cálculo y diseño de muros estructurales de concreto armado. Trabajo de grado. Universidad de Carabobo. 2012.
- BRICEÑO A., CARRERAS G. Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011. Trabajo de Grado. UCAB: Universidad Católica Andrés Bello. Octubre del 2013.
- CARPENTER L., NAEIM, F., LEW, M., YOUSSEF, N., ROJAS, F., SARAGONI, G., AND ADAROS, M. "Performance of tall buildings in Viña del Mar in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake." En: The Structural Design of Tall and Special Buildings. Vol 2.
- CARRILLO, J., SÁNCHEZ-CRUZ, M., VIVIESCAS, Á. "Strains on steel reinforcements in lowrise concrete walls during shake table tests.". En: Ingeniería e Investigación, Vol. 34, No. 1, April, 2014, pp. 36 – 41.
- EL-AZIZY O., SHEDID M., EL-DAKHAKHNI W., AND DRYSDALE R. "Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete structural walls with different end configurations.". En: Engineering Structures. Vol 101 (2015), Pp 246-263.
- GHORBANIRENANI I., TREMBLAY R., LÉGER P., M.ASCE., AND LECLERC M. "Shake Table Testing of Slender RC Shear Walls Subjected to Eastern North America Seismic Ground Motions". En: Journal of structural engineering. Vol 138 (2012), Pp 1515-1529.

- HUBE M.A., MARIHUÉN A., DE LA LLERA J.C., STOJADINOVIC B. "Seismic behavior of slender reinforced concrete walls". En: Engineering Structures. Vol. 80. (2014). Pp. 377-388.
- ILERISOY Z., AND TUNA M. "Construction cost of tunnel form buildings". En: Gradevinar. Vol 65. (2013). Pp 135-141.
- JÜNEMANN R., DE LA LLERA J.C., HUBE M.A., CIFUENTES L.A., and KAUSEL E. "A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake" En: Engineering Structures. Vol 82 (2015), págs. 168-185.
- KALKAN E., Y BAHADIR Y. "Pros and Cons of Multistory RC Tunnel-Form (Box-Type) Buildings". En: The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2007.
- LOPÉZ J., MORENO J. Evaluación experimental del comportamiento biaxial de muros en concreto reforzado. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017.
- MCCORMAC J., BROWN R. Diseño de concreto reforzado. Octava edición. 2011. 548 p. ISBN: 978-607-707-231-7.
- midas Gen, Analysis Manual.
- MOLINA J. TOLOZA M. Metodología del sistema constructivo con formaleta metálica tipo manopotrable. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2008.
- PRIETO J. Programa para el trazado de cables en vigas pre-esforzadas continuas para puentes Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

- ROSSO A., ALMEIDA J., BEYER K. “Stability of thin reinforced concrete walls under cyclic loads: state-of-the-art and new experimental findings.”. En: Bull Earthquake Eng. Vol. 14 (2015), Pp 455-484.
- RUDDY REGNAUTT. Sistema tipo túnel. [En línea]. (Recuperado en 20 de abril de 2017) Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/57845794/SISTEMA-TIPO-TUNEL> .
- SOSA D., AREVALO D., MORA E., CORREA M., ALBUJA D., GOMEZ C. “Experimental and Analytical Study of Slender Reinforced Concrete Shear Wall under Cyclic In-Plane Lateral Load”. En: Mathematical Problems in Engineering. Vol. (2017), Article ID: 4020563.
- WESTENEK B., DE LA LLERA JC., BESA JJ., JÜNEMANN R., LÜDERS C., INAUDI JA., RIDDELL R., JORDÁN R. “Analysis and interpretation of the seismic response of RC buildings in Concepción during the February 27, 2010, Chile earthquake.” En: Bull Earthquake Eng.
- WESTENENK B., DE LA LLERA JC., BESA JJ., JÜNEMANN R., MOEHLE J., LÜDERS C., INAUDI JA., ELWOOD KJ., HWANG S-J. “Response of reinforced concrete buildings in Concepción during the Maule earthquake”. En: Earthquake Spectra. 2012. 28(S1):S257–80.
- ZHANG Y., WANG Z. “Seismic Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Subjected to High Axial Loading”. En: ACI Structural Journal. Title no. 97-S75, 2000.

ANEXOS

Anexo A. Modelo en midas Gen, 2019 (v1.1)

El modelo numérico realizado y en el cual nos basamos para las respectivas comparaciones, se encuentra adjunto en el CD y puede ser visualizado en la base de datos de la Biblioteca UIS.