
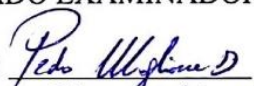
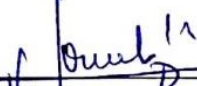


**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ACERO TRANSVERSAL DE
CONFINAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE BORDE EN MUROS
DE CORTE**

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su contenido con el resultado: VEINTE (20) PUNTOS.

JURADO EXAMINADOR:

Firma: 	Firma: 	Firma: 
Nombre: <u>Eduardo López</u>	Nombre: <u>PEDRO MAGLIORE</u>	Nombre: <u>VINICIO BENAVIDES</u>

REALIZADO POR

López V., Raúl E.



PROFESOR GUÍA

Ing. Eduardo López

FECHA:

Junio 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser el que me regenera las fuerzas cuando éstas se acaban.

Agradezco también a mi madre y a mi hermana Layla por haber entendido en estas últimas semanas el hecho de no haber estado tan cerca de ellas debido a la etapa de culminación de este trabajo.

A mi hermana Celina por ser quien es y haberme regalado desde hace tiempo a mi tutor de este Trabajo Especial de Grado.

A mi hermano Eduardo por haber colaborado conmigo de diversas maneras durante la realización de este trabajo.

A la Universidad Católica Andrés Bello por la buena influencia y formación que significaron estos años dentro de ella.

Por último, a mi padre y tutor Eduardo López, por su disposición para resolver prácticamente todos los problemas que surgieron durante la elaboración de este trabajo haciendo siempre uso de sus vastos conocimientos.

Raúl Eduardo López Villavicencio.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
SINOPSIS.....	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1. EL PROBLEMA	9
1.1. Planteamiento del Problema.....	9
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo General.....	9
1.2.2. Objetivos Específicos.....	9
1.3. Alcance y limitaciones	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Ductilidad	11
2.2. Muros de corte.....	11
2.3. Concreto confinado	12
2.4. Curva tensión deformación de Mander	13
2.5. Terminología técnica	16
CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO	18
3.1. Clasificación de la Investigación.....	18
3.2. Obtención de informacion básica	18
3.3. Modelado de muro	19
3.4. Análisis de los resultados	19
3.5. Recomendaciones	19
CAPITULO 4. DESARROLLO	20
4.1. Ejemplo de curva Tensión-Deformación según modelo teórico de Mander.....	20
4.2. Ductilidad según deformación en la base.....	23

4.3. Comportamiento no lineal de muros.....	24
4.3.1. Características de los muros estudiados	26
4.3.2. Modelado de muros	29
4.3.3. Definición de materiales	30
4.3.4. Manejo de la multicapa.....	37
4.3.5. Análisis estático no lineal. "Pushover"	41
4.4. Gráficas comparativas.....	50
4.5. Tensiones de compresión según el número de ramas en los elementos de borde	55
CAPITULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS	57
CAPITULO 6. CONCLUSIONES	59
CAPITULO 7. RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLAS|

Tabla 1. Características del muro 1.....	26
Tabla 2. Características del muro 2.....	26
Tabla 3. Incrementos porcentuales de ductilidad en muro de esbeltez $\frac{h_w}{l_w} = 4.67$	51
Tabla 4. Incrementos porcentuales de ductilidad en muro de esbeltez $\frac{h_w}{l_w} = 7.00$	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas esfuerzo-deformación del concreto con y sin confinar.....	13
Figura 2. Relación de f'_{cc} y f'_c	15
Figura 3. Vista de muro en planta	20
Figura 4. Relación de f'_{cc} y f'_c	21
Figura 5. Curva tensión-deformación del concreto confinado según Mander	23
Figura 6. Rotación última y de cedencia en la base para configuración de ramas 8x3	24
Figura 7. Ventana de la herramienta multicapa del SAP2000.....	25
Figura 8. Muro 1 (10 pisos)	27
Figura 9. Muro 2 (15 pisos)	28
Figura 10. Modelaje muro 1	29
Figura 11. Paso 1 definición de materiales.....	30
Figura 12. Paso 2 definición de materiales.....	31
Figura 13. Paso 3 definición de materiales.....	31
Figura 14. Paso 4 definición de materiales.....	32
Figura 15. Paso 5 definición de materiales.....	32
Figura 16. Paso 6 definición de materiales.....	33
Figura 17. Paso 7 definición de materiales.....	34
Figura 18. Vista del muro en planta, ramas 8x3	34
Figura 19. Paso 8 definición de materiales.....	35
Figura 20. Paso 9 definición de materiales.....	36
Figura 21. Paso 1 manejo de la multicapa.	37
Figura 22. Paso 2 manejo de la multicapa.	38
Figura 23. Paso 3 manejo de la multicapa.	39
Figura 24. Paso 3 manejo de la multicapa.	41

Figura 25. Paso 1 análisis de pushover.....	42
Figura 26. Paso 2 análisis de pushover.....	43
Figura 27. Paso 3 análisis de pushover.....	44
Figura 28. Paso 4 análisis de pushover.....	45
Figura 29. Nodos o juntas del muro.	46
Figura 30. Paso 5 análisis de pushover.....	47
Figura 31. Ejemplo 1 de medición de ductilidad.	48
Figura 32. Ejemplo 2 de medición de ductilidad.	49
Figura 33. Curvas del pushover para diferentes grados de confinamiento, esbeltez: 4.67.	51
Figura 34. Curvas del pushover para diferentes grados de confinamiento, esbeltez: 7.00.	52
Figura 35. Curvas del pushover para diferentes esbelteces.	54
Figura 36. Tensiones de compresión en los elementos de borde para ramas 8x3	55
Figura 37. Tensiones de compresión en el muro para ramas 6x2.	56
Figura 38. Falla por deficiencias en el acero transversal de confinamiento.....	64
Figura 39. Falla por ausencia de acero transversal de confinamiento.....	64
Figura 40. Falla debida al bajo grado confinamiento.....	65

SINOPSIS

Es necesario que el diseñador de estructuras de edificios establezca los criterios de cálculo a la hora de proceder al modelaje y así determinar el comportamiento estructural cuando se va a proceder al diseño de éstos. Para tener buenos criterios, previamente se debe tener una serie de conocimientos que abarquen conceptualmente los detalles de cada uno de ellos, de manera que se pueda elegir adecuadamente entre dos o mas opciones que pudieran ir surgiendo durante esta etapa determinante y clave para lo que será la estructura global.

En este trabajo se tratará un tema referente a la influencia del acero transversal de confinamiento de los elementos de borde en muros de corte, dirigido básicamente a la ductilidad del muro. Estos aceros están compuestos por ramas en dos direcciones, y la configuración de estas ramas, entendiéndose configuración por cantidad y posición, será un factor que varíe la forma en que este acero transversal proporcione una ductilidad global para la estructura.

Es entonces, el objetivo de este Trabajo Especial de Grado determinar cómo variará la ductilidad de un muro de corte de acuerdo al número o posición de estas ramas de las ligaduras y que haga que el diseñador detecte, o tenga un conocimiento más amplio respecto a lo que significa poner una rama más, o una rama menos, tomando en cuenta que un ligero cambio en este arreglo pueda influir considerablemente en el miembro, por lo que se quiere que no solo se cumpla con el mínimo acero requerido en cada sentido según el Capítulo 18 de la norma ACI 318-14, sino que se quiere mostrar un camino que permita que el calculista pueda ser un poco más minucioso a la hora de definir esta configuración del acero transversal de confinamiento en estos muros.

INTRODUCCIÓN

La determinación del efecto del acero transversal de confinamiento en los elementos de borde de los muros de corte es básicamente sobre la ductilidad de los mismos ya que el concreto como material carece de esa propiedad por sí solo, siendo este efecto el principal objetivo del presente Trabajo Especial de Grado, de manera que se pueda apreciar como aumenta la ductilidad a medida que vamos incrementando rama a rama, y poder conocer si existe una cantidad de acero la cual si se excede, no encontraremos mejora alguna, siendo este límite(si existiese) un dato importante desde el punto de vista económico y de optimización tanto de cálculo como de comportamiento de la estructura.

Este objetivo se pretende lograr mediante el uso de un programa especializado, haciendo un proceso iterativo a través de un análisis no lineal, por medio de la herramienta “multicapa” del programa de análisis estructural SAP2000, la cual permite utilizar elementos tipo Shell dándole propiedades no lineales a cada uno de los materiales que contemplan esas capas, en este caso al concreto(confinado y no confinado) y al acero de refuerzo, para que posteriormente, utilizando la técnica del Pushover se pudieran ver los resultados que permitiesen concluir si se cumple o no la hipótesis planteada.

Hay que destacar que este trabajo se apoya en el modelo teórico de Mander de tensión-deformación de concreto confinado. Tomando en cuenta que el muro posee diferentes áreas, se usarán curvas de concreto confinado y no confinado según sea el caso ya que solo los elementos de borde de los muros a evaluar son los únicos que llevan este acero transversal de confinamiento y es ahí donde se irá variando el número de ramas para determinar la influencia de la ductilidad en ellos.

Para un mayor alcance de investigación, se evaluarán dos muros con diferentes esbelteces para posteriormente comparar resultados y ver si los mismos se pueden extrapolar a otros casos o ser base para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 1. EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

El comportamiento de los muros de corte en el diseño sismorresistente involucra el uso de factores de reducción de respuesta que son función de la ductilidad del muro. Las formas de falla de estos muros pueden ser por compresión, tracción o corte. En este Trabajo Especial De Grado se dirigirá el estudio al comportamiento a flexocompresión donde el acero de confinamiento de los elementos de borde juegan un papel sumamente importante, y definen la ductilidad final del muro, excluyéndose la posibilidad de falla por corte, esto se puede determinar con un análisis no lineal que contemple curvas de esfuerzo deformación del acero confinado y sin confinar, y se pueda en el caso confinado establecer distintas cuantías para establecer los beneficios que arroja en términos de ductilidad.

Es entonces el objetivo de este trabajo, realizar un estudio de las posibles variaciones de ese acero transversal de confinamiento para desarrollar las curvas de pushover que permitan calcular factores de ductilidad de estos muros, con la idea de comparar con las especificaciones normativas referidas a ese concepto y establecer criterios para muros que por su poco espesor pudieran no estar contemplados en las normas y que se estén usando activamente en la construcción de viviendas de interés social en edificaciones venezolanas.

1.2. Objetivos

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio en el rango no lineal de deformaciones de muros de corte para determinar la ductilidad de los mismos, basado en la variación del acero transversal de confinamiento de los elementos de borde.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Detallar los procedimientos que corresponden al modelaje de muros con distintos niveles de cuantía de acero de confinamiento.

- Determinar la influencia del acero transversal de los elementos de borde en la tensión por compresión alcanzada en el concreto.
- Determinar la influencia del acero transversal de confinamiento en la ductilidad, según la esbeltez del muro.

1.3. Alcance y limitaciones

El alcance es elaborar el procedimiento para el modelaje y análisis no lineal de concreto confinado y no confinado basado en los estudios de Mander, J.B, M.J.N. Priestley, R. Park. Modelo teórico de tensión-deformación del concreto confinado, aplicado a elementos de borde de muros de corte.

La limitación de este Trabajo Especial de grado está en el estudio de muros rectos, con altura máxima de 50 metros con falla controlada a flexocompresión.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ductilidad

Para minimizar el daño y para asegurar la supervivencia de edificaciones con moderada resistencia con respecto a fuerzas laterales, las estructuras deben ser capaces de mantener una elevada porción de su resistencia inicial cuando un sismo de gran escala genera grandes deformaciones en las mismas. Estas deformaciones pueden llegar más allá del límite elástico. Esa habilidad de la estructura o de sus componentes, o de sus materiales de ofrecer resistencia en el rango inelástico, es lo que conocemos como ductilidad. Es la capacidad de soportar grandes deformaciones y la capacidad de absorber energía por medio de ciclos de histéresis.

El método más general para medir la ductilidad en muros de corte es el de medir la capacidad rotacional de la rótula plástica en la base; el valor de la ductilidad viene dado por la fórmula $\mu_{\phi} = \phi_u / \phi_y$, donde ϕ_u es la rotación de falla mientras que ϕ_y es la rotación de cedencia. Más adelante se realizará un ejemplo con este método, sin embargo, el método que se utilizará en este trabajo para medir la ductilidad será el de medir la deformación de rotura entre la de cedencia en la curva arrojada por el método del “pushover”, el cual será explicado más adelante. La razón por la que se eligió ese método es porque al medir la ductilidad según el “pushover”, implica en análisis de todo el muro y no solo en la sección de su base, lo que nos proporcionará resultados más precisos.

2.2. Muros de corte

Son componentes estructurales que, al ser localizados adecuadamente, aportan una rigidez importante a la edificación. Forman un eficaz sistema para resistir fuerzas laterales producidas por un sismo, los mismos pueden actuar en conjunto con las columnas como también existen edificios sostenidos únicamente por sistema de muros.

Para edificaciones de hasta 20 pisos, el uso de un sistema de muros de corte podría ser opcional, pero cuando se habla de edificios de más de 20 pisos, su uso empieza a ser imperativo desde el punto de vista tanto económico como de control de desplazamiento lateral. Se diferencian de las columnas básicamente porque en planta, su relación entre la dimensión más pequeña entre la más grande es menor a 0,40.

El objetivo del diseño en muros de corte es buscar la falla por flexión, ya que la falla por corte es una falla frágil, mientras que, por otro lado, garantizando la falla por flexión, estaríamos en presencia de una falla dúctil.

2.3. Concreto confinado

Se le denomina concreto confinado a los tramos de la estructura que contienen un refuerzo transversal ya sea por ligaduras o zunchos, los cuales, entre otras funciones, ejercen una presión de confinamiento para que en esos sectores se evite el expandimiento del concreto, por lo que la elección de que zona será o no confinada en la estructura será elegida estratégicamente de manera que se coloque este acero transversal donde realmente se requiera. Las variables de este acero transversal son el espaciamiento entre ligaduras, área del acero colocado y las ramas en cada dirección, siendo esta última una variable que se tratara con ahínco en el presente Trabajo especial de Grado.

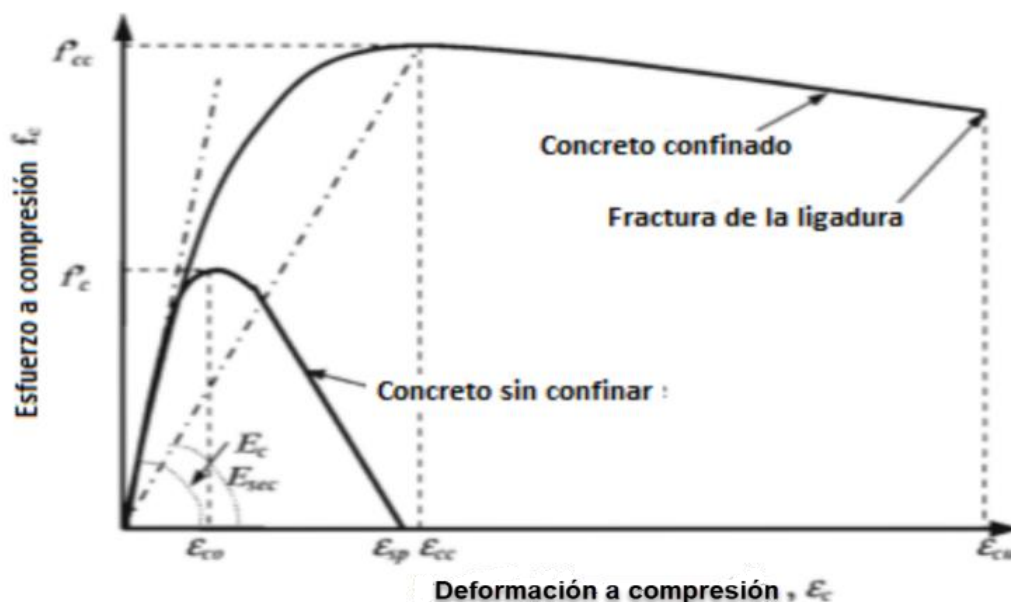


Figura 1. Curvas esfuerzo-deformación del concreto con y sin confinar.

Fuente: Mander, J.B., M.J.N. Priestley, y R. Park (1984)

El acero transversal con un corto espaciamiento entre ligaduras (alrededor de 10cm) en conjunto con el acero longitudinal de refuerzo, al trabajar para contener la expansión lateral del concreto, permiten aumentar tanto los esfuerzos como las deformaciones a compresión antes de llegar a la falla.

2.4. Curva tensión deformación de Mander

La curva de tensión deformación de Mander, calcula la tensión de compresión y la deformación de rotura en función del acero de confinamiento en elementos verticales, tanto para secciones circulares como rectangulares, que son estas últimas las que se trabajarán en el presente trabajo.

La herramienta del programa de análisis estructural SAP2000, la cual permite trabajar los materiales del muro capa a capa, juega un papel imprescindible en el proceso experimental, ya que en ella podemos definir la manera en que trabajará cada material, y es ahí donde se estableció que el acero estaría sometido a un análisis no lineal.

A continuación, se expondrán las fórmulas las cuales respaldan la teoría de Mander.

$$f = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$$

Donde,

$$\varepsilon'_{cc} = \left\{ 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) + 1 \right\} \varepsilon'_c$$

$$x = \varepsilon / \varepsilon'_{cc}$$

$$E_{sec} = f'_{cc} / \varepsilon'_{cc}$$

$$r = E / (E - E_{sec})$$

El termino ε'_{cc} es el valor de la deformación para un esfuerzo f'_{cc} en el concreto confinado, por lo que ε'_c es la deformación correspondiente para f'_c , estos dos últimos son valores conocidos.

La consecución del término f'_{cc} consta de un procedimiento que será explicado a continuación, cabe acotar que el mismo varía si se trabaja con secciones circulares.

Para conseguir el valor de f'_{cc} debemos recurrir a la siguiente figura:

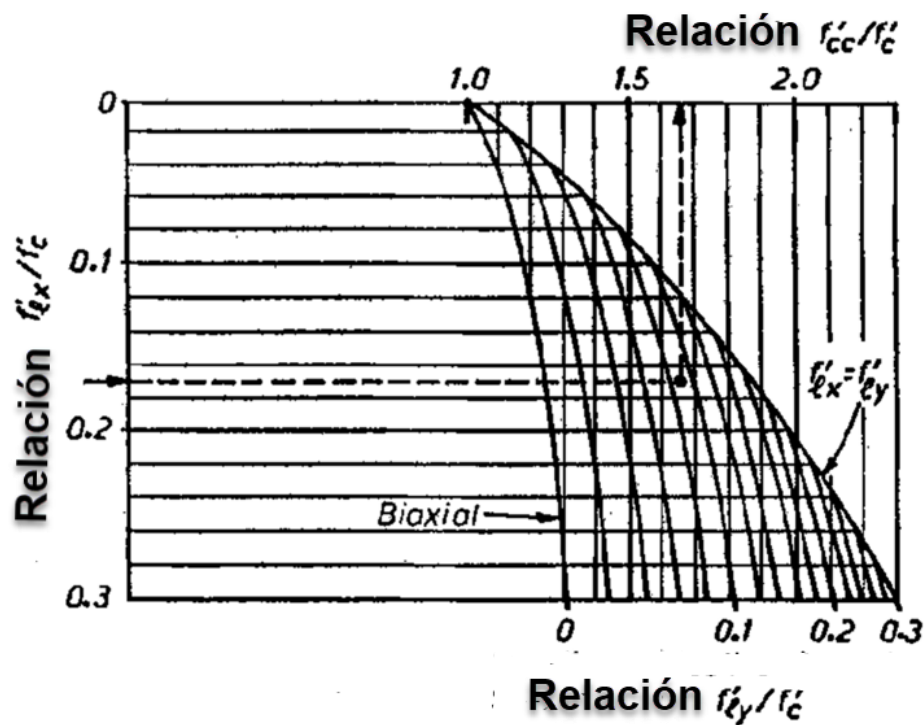


Figura 2. Relación de f'_{cc} y f'_c

Fuente: T. Paulay y M.J.N Priestley, 1992

El termino f'_{cc} no es más que la resistencia máxima del concreto confinado, por lo que el mínimo valor que encontraremos en esta relación será 1.

Para poder conseguir esa relación se debe conseguir el valor de f'_{lx} y f'_{ly} .

$$f'_{lx} = k_e f l_x$$

$$f'_{ly} = k_e f l_y$$

$$f l_x = \rho_x f_{yh}$$

$$f l_y = \rho_y f_{yh}$$

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{sdc}$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{sbc}$$

Donde “s” es la separación longitudinal entre ligaduras, A_{sx} el área total de acero transversal en dirección “x”, A_{sy} el área total de acero transversal en dirección “y”, b_c la separación centro a centro de ligaduras en dirección “y”, y d_c la separación centro a centro de ligaduras en dirección “x”.

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}$$

$$A_{cc} = b_c d_c$$

$$A_e = \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i^2)}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)$$

Donde s' es la distancia longitudinal cara a cara de las ligaduras, y “w” sería la distancia cara a cara entre ramas en el lado largo del elemento confinado.

También es importante resaltar que f_l es la presión lateral en el concreto confinado ejercida por el acero de confinamiento.

El coeficiente k_e mide la efectividad del concreto confinado.

2.5. Terminología técnica

Análisis no lineal estático (Pushover): Es un método de análisis no lineal donde se aplica una carga lateral a la estructura modelada monolíticamente (trabajando la estructura como un todo), dicha carga va incrementando mientras que la estructura va pasando de su rango elástico al inelástico hasta llegar a la falla. La ductilidad en el presente trabajo fue medida a través de la curva (carga aplicada vs. Deformación) arrojada por el Pushover, dada por la relación entre el punto de falla de la estructura y su punto de cedencia.

Elementos de borde especiales en muros de corte: Para muros cuya relación de altura entre su longitud es mayor a 2, la norma ACI2014 exige que haya elementos de borde en los mismos cuando $c \geq \frac{l_w}{600(\frac{1.5\delta_u}{h_w})}$, c correspondiendo a la profundidad del eje neutro, l_w y h_w longitud y altura del muro respectivamente y δ_u siendo el

desplazamiento lateral para el sismo de diseño. Se deberá revisar todas las combinaciones de carga y si para alguna de ellas es necesaria el elemento de borde, entonces el mismo será colocado.

También se requerirán elementos de borde en caso de que el esfuerzo máximo a compresión en la fibra extrema sobrepase el $0.2 \cdot f'_c$.

El elemento de borde se debe extender horizontalmente desde la fibra extrema en compresión hasta una distancia al menos igual al mayor valor entre $c - 0.1l_w$ y $c/2$, donde “c” corresponde a la mayor profundidad del eje neutro calculada para la fuerza axial mayorada y la resistencia nominal a momento congruente con el desplazamiento de diseño δ_u .

CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se verán descritas las etapas que conforman la metodología empleada:

3.1. Clasificación de la investigación

Hay distintos tipos de investigación y a continuación se señalarán los que conforman el presente trabajo:

Investigación Explicativa

La investigación explicativa se orienta a establecer las causas que originan un fenómeno determinado. Se trata de un tipo de investigación cuantitativa que descubre el por qué y el para qué de un fenómeno.

Este trabajo busca explicar cómo aumenta la ductilidad de un muro de corte según el aumento del número de ramas en las ligaduras en su zona de confinamiento.

Investigación Proyectiva

Este tipo de investigación se ocupa del cómo deberían ser las cosas para alcanzar un fin y funcionamiento adecuado, teniendo como objetivo diseñar propuestas dirigidas a resolver determinadas situaciones.

Se busca en el presente trabajo optimizar la colocación de ramas en los sectores confinados de los muros de corte.

3.2. Obtención de información básica

A través de un software de análisis estructural, se aplicó un análisis no lineal mediante la técnica del Pushover, con la cual se pudo hallar la ductilidad del muro.

3.3. Modelado del muro

En el software de análisis estructural se incrementó el número de ramas de ligaduras de confinamiento de los elementos de borde, partiendo desde un mínimo razonable hasta llegar a la separación mínima.

3.4. Análisis de los resultados

Una vez que se obtienen las curvas para cada número de ramas, se procede a fijar un criterio único para poder hallar un valor de ductilidad en cada caso, para que posteriormente se puedan comparar resultados y ver en qué medida aumenta la ductilidad según se aumentaban ramas y si existe un punto en el que una rama más no signifique ninguna mejora sobre el muro.

3.5. Recomendaciones

Una vez interpretados todos los resultados, se procederá a hacer recomendaciones para el modelado de muros de corte, específicamente en la zona confinada de estos, y comparando los resultados obtenidos con los exigidos en la Norma venezolana.

CAPITULO 4. DESARROLLO

El presente trabajo especial de grado se basa primordialmente en las curvas de tensión deformación de Mander, conceptos que se podrán plasmar en este trabajo gracias a la herramienta que nos permite establecer cómo será el comportamiento de la estructura, en este caso de un muro de corte, herramienta que nos brinda el programa de análisis estructural SAP2000, así como nos permite evaluar el comportamiento de este muro en su rango no lineal.

Por lo anterior expuesto es de suma importancia exponer un ejemplo de un caso de una sección confinada del muro con las fórmulas que fueron mostradas en el marco teórico para poder explicar de la mejor manera en que se basa el programa de análisis estructural, para dar resultados en función del número de ramas que se tengan en la zona confinada del muro.

4.1. Ejemplo de curva Tensión-Deformación según modelo teórico de Mander

El siguiente muro de ejemplo consta de elementos de borde confinados de 1.20x0.30m con un acero longitudinal del 1%, el mismo tendrá 8 ramas en el sentido largo, y 3 en el sentido corto, todas las ligaduras son de ½”, excediendo el mínimo requerido en la norma ACI 318-14 artículo 18.12.7.5.

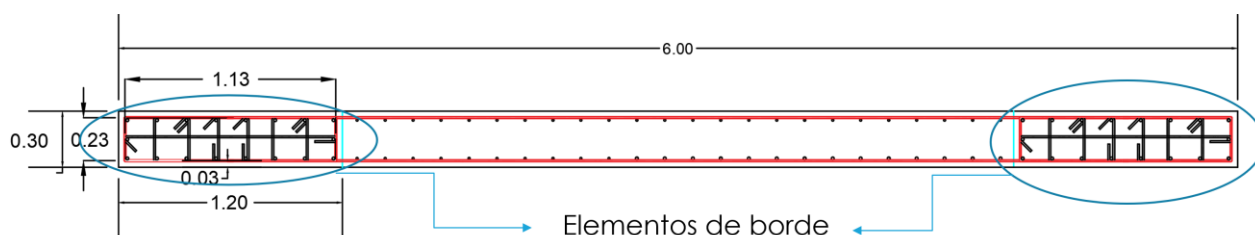


Figura 3. Vista de muro en planta

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD 2017.

$$Ae = \left(110 * 23 - \sum_{i=1}^n \frac{(13.4125^2)}{6} \right) \left(1 - \frac{10 - 1.27}{2 * 110} \right) \left(1 - \frac{10 - 1.27}{2 * 23} \right)$$

$$fl_y = 1.65 * 10^{-2} * 4200$$

$$Ae = 1805.2 \text{ cm}^2$$

$$fl_x = 69.57 \text{ kg/cm}^2$$

$$Acc = 110 * 23$$

$$ke = \frac{1805.2}{2530}$$

$$Acc = 2530 \text{ cm}^2$$

$$ke = 0.71$$

$$\rho_x = \frac{1.27 * 8}{10 * 23}$$

$$f'l_x = 0.71 * 38.8$$

$$\rho_x = 9.23 * 10^{-3}$$

$$f'l_x = 27.54 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho_y = \frac{1.27 * 3}{10 * 23}$$

$$f'l_y = 0.71 * 69.57$$

$$\rho_y = 1.65 * 10^{-2}$$

$$f'l_y = 49.39 \text{ kg/cm}^2$$

$$fl_x = 9.23 * 10^{-3} * 4200$$

$$fl_x = 38.8 \text{ kg/cm}^2$$

Con estos valores de $f'l_x$ y $f'l_y$ podremos entrar en la siguiente gráfica:

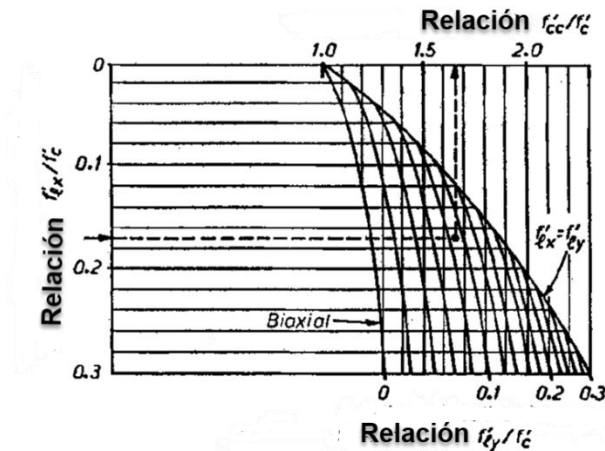


Figura 4. Relación de f'_{cc} y f'_c

Fuente: T. Paulay y M.J.N Priestley, 1997

$$f'_y / f'_c = \frac{49.39}{280} = 0.17 \quad y \quad f'_x / f'_c = \frac{27.54}{280} = 0.098$$

Haciendo uso de la figura 4, podemos encontrar que la relación entre f'_{cc} y f'_c es de aproximadamente 1.57, con un $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, finalmente obtenemos un valor de

$$f'_{cc} = 1.57 * 280 = 440 \text{ kg/cm}^2.$$

Con el valor de f'_{cc} procedemos a dejar el esfuerzo del concreto “f” en función de la deformación, lo que permitirá graficar la curva del concreto confinado con la fórmula que se señalará a continuación, para las condiciones expuestas anteriormente.

$$f = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$$

$$\varepsilon'_{cc} = \left\{ 5 \left(\frac{440}{280} - 1 \right) + 1 \right\} \varepsilon'_c$$

El término ε'_c es la deformación para el pico de máxima resistencia en la curva del concreto sin confinar para 280 kg/cm^2 , la cual es $\varepsilon'_c = 2.09 \times 10^{-3}$.

$$\varepsilon'_{cc} = 8.06 \times 10^{-3}$$

$$E_{sec} = 440 / 8.06 \times 10^{-3} = 51617 \text{ kg/cm}^2$$

$$r = E / (E - E_{sec}) = \frac{2.1 * 10^6}{2.1 * 10^6 - 51617} = 1.0267$$

$$x = \varepsilon / \varepsilon'_{cc} = \frac{\varepsilon}{8.06 \times 10^{-3}}$$

$$f = \frac{440 * \left(\frac{\varepsilon}{8.06 \times 10^{-3}} \right)^{1.0267}}{1.0267 - 1 + \frac{\varepsilon}{8.06 \times 10^{-3}}}$$

$$f = \frac{56048 * \varepsilon}{0.0267 + \frac{\varepsilon}{8.06 \times 10^{-3}}}$$

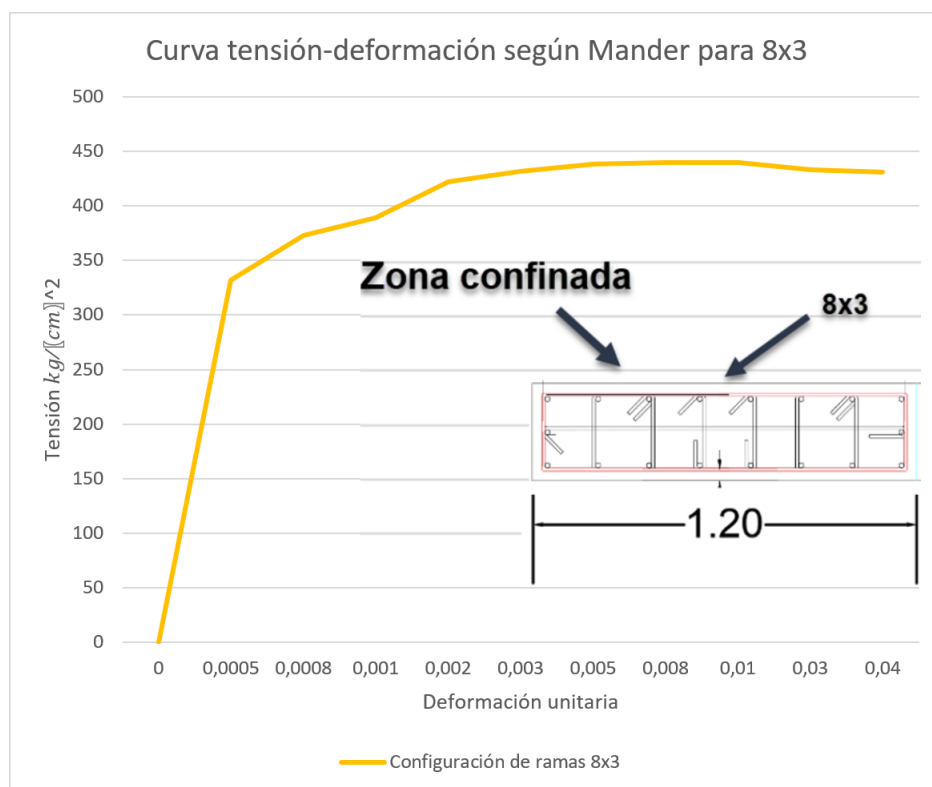


Figura 5. Curva tensión-deformación del concreto confinado según Mander

Fuente: Elaboración propia en Excel.

4.2. Ductilidad según deformación en la base

En este trabajo se medirá la ductilidad por medio de la curva del “pushover”, aunque en el marco teórico se dijo que la manera general de medir la ductilidad en estos muros es mediante la deformación en la base del muro. A continuación, un breve ejemplo de esta medición:

Una vez corrido el análisis en el programa, si se recurre a la opción “Display – Show Deformed Shape” para el caso de “pushover”, se puede obtener el desplazamiento

en cada junta según el paso de “pushover” en el que nos encontremos. Si previamente se ve cual es el paso en el que se llega al punto de falla y el punto de cedencia, se podría ver la deformación en la base en los extremos, lo que permitiría obtener la rotación de cedencia y la del punto de falla. Así fue como se encontraron las deformaciones para poder aplicar este método a manera de ejemplo.

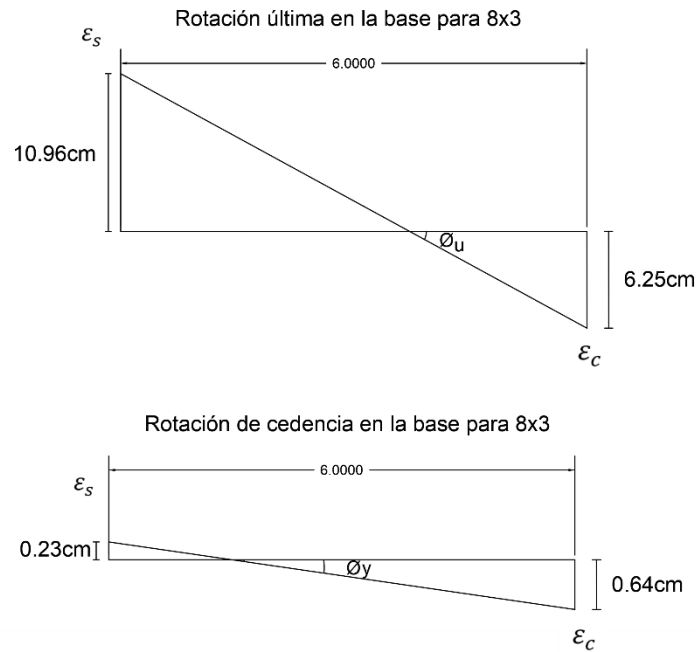


Figura 6. Rotación última y de cedencia en la base para configuración de ramas 8x3

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD 2017

Por relación de triángulos

$$\phi_y = 0.0831^\circ, \phi_u = 1.65^\circ$$

$$\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$$

$$\mu_\phi = 1.65 / 0.0831 = 19.81$$

4.3. Comportamiento no lineal de los muros

Con la herramienta “multilayer” (multicapa) del SAP2000, se pudo determinar cómo sería el comportamiento de cada material, mientras que para el acero de refuerzo trabaja en la no linealidad en el sentido horizontal(S11) a lo largo del muro, el concreto haría lo mismo en el sentido vertical (S22) como se puede apreciar en la siguiente figura.

Hay que destacar que cada zona del muro tiene su respectiva configuración de capa, por lo que tendremos 3 diferentes en cada muro.

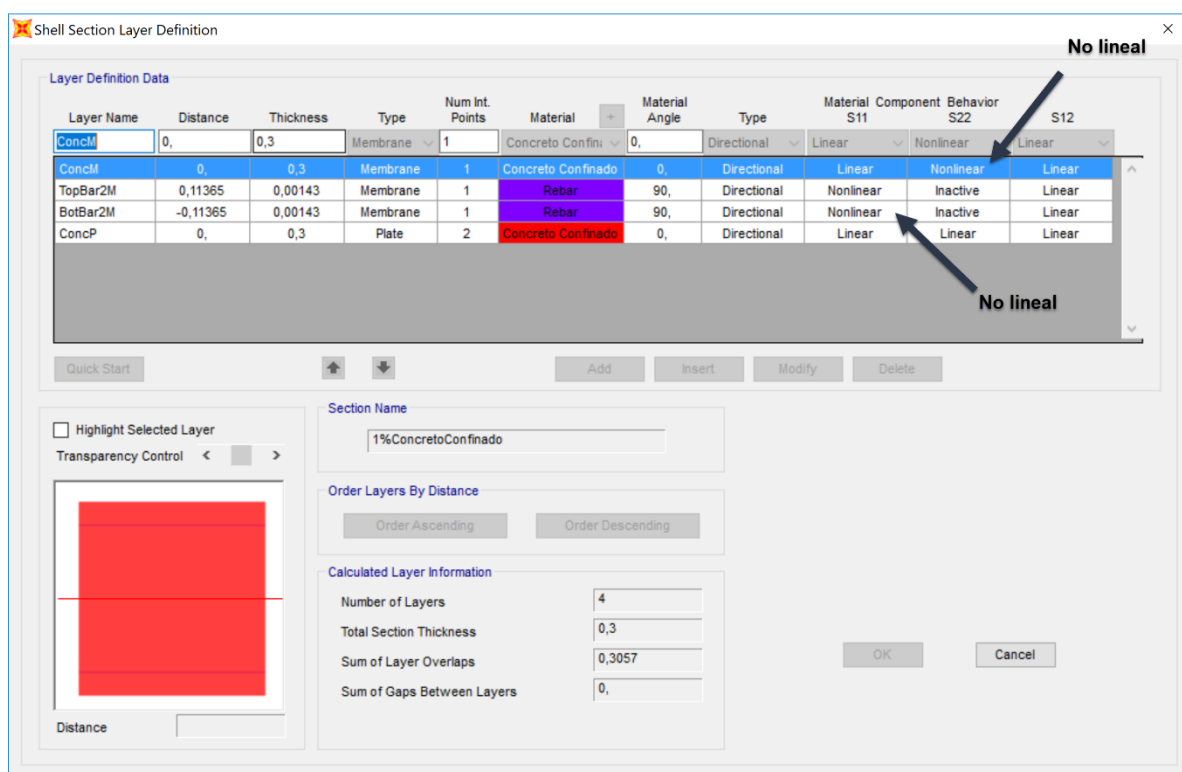


Figura 7. Ventana de la herramienta multicapa del SAP2000.

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la imagen anterior la manera en que se estableció la no linealidad del acero y del concreto en sus respectivas direcciones. Esta herramienta no es la que nos permite variar el número de ramas, la cual será mostrada más adelante.

4.3.1. Características de los muros estudiados.

Procedemos a indicar las características de los muros que fueron estudiados en este trabajo. Ambos con un concreto de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y con un acero de refuerzo de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Muro 1	
Pisos	10
Altura total(m)	28
Base(m)	6
Altura zona confinada(m)	11,2
Ancho zona confinada (m)	1,2 c/u
Relación de esbeltez	4,67

Tabla 1. Características del muro 1

Fuente: Elaboración propia en Excel

Muro 2	
Pisos	15
Altura total(m)	42
Base(m)	6
Altura zona confinada(m)	16,8
Ancho zona confinada (m)	1,2 c/u
Relación de esbeltez	7

Tabla 2. Características del muro 2

Fuente: Elaboración propia en Excel

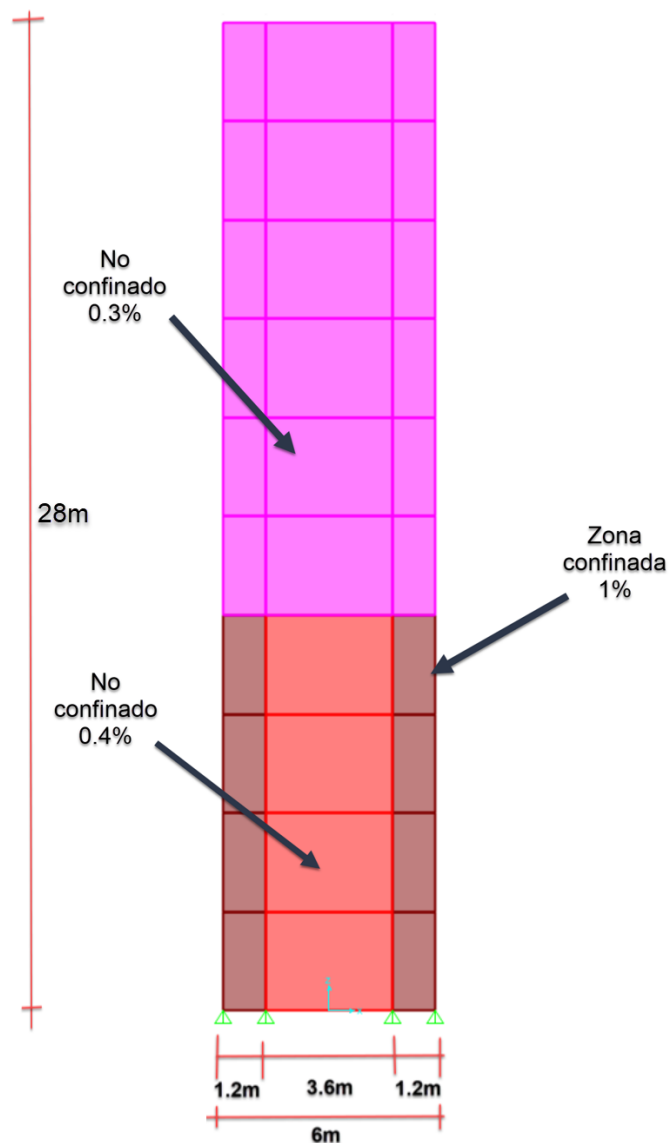


Figura 8. Muro 1 (10 pisos)

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la imagen anterior se puede apreciar donde se encuentra la zona confinada del muro y hasta que altura llega la misma. También se observa que a partir del 5to piso el porcentaje de acero no confinado cambia con respecto a la zona no confinada de los primeros 4 pisos.

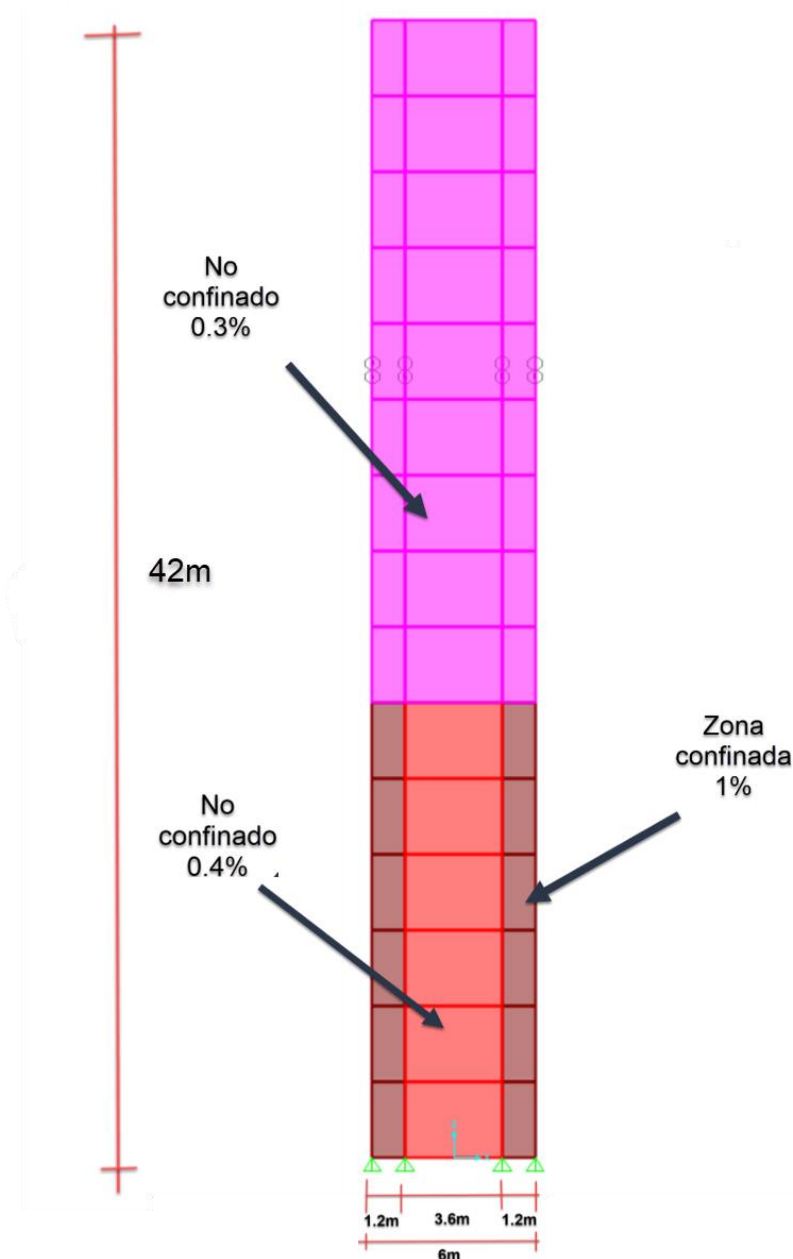


Figura 9. Muro 2 (15 pisos)

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En el anterior muro (muro 2) se aprecia la mayor altura respecto al primero, la altura de la zona confinada es proporcional a la del primero (40%) de la altura de manera que la comparativa de resultados de ductilidad sea lo más objetiva posible. En ambos muros se tienen los mismos porcentajes de acero para cada zona.

4.3.2. Modelado de los muros

Como bien se ha recalcado durante el trabajo, el análisis con el que se procederá a determinar la ductilidad de los respectivos muros será por medio de la técnica del “pushover”, la cual se expondrá a en este capítulo. En todos los modelos que se realizaron en este trabajo se usaron ligaduras de $\frac{1}{2}$ ” separadas cada 10cm de centro a centro.

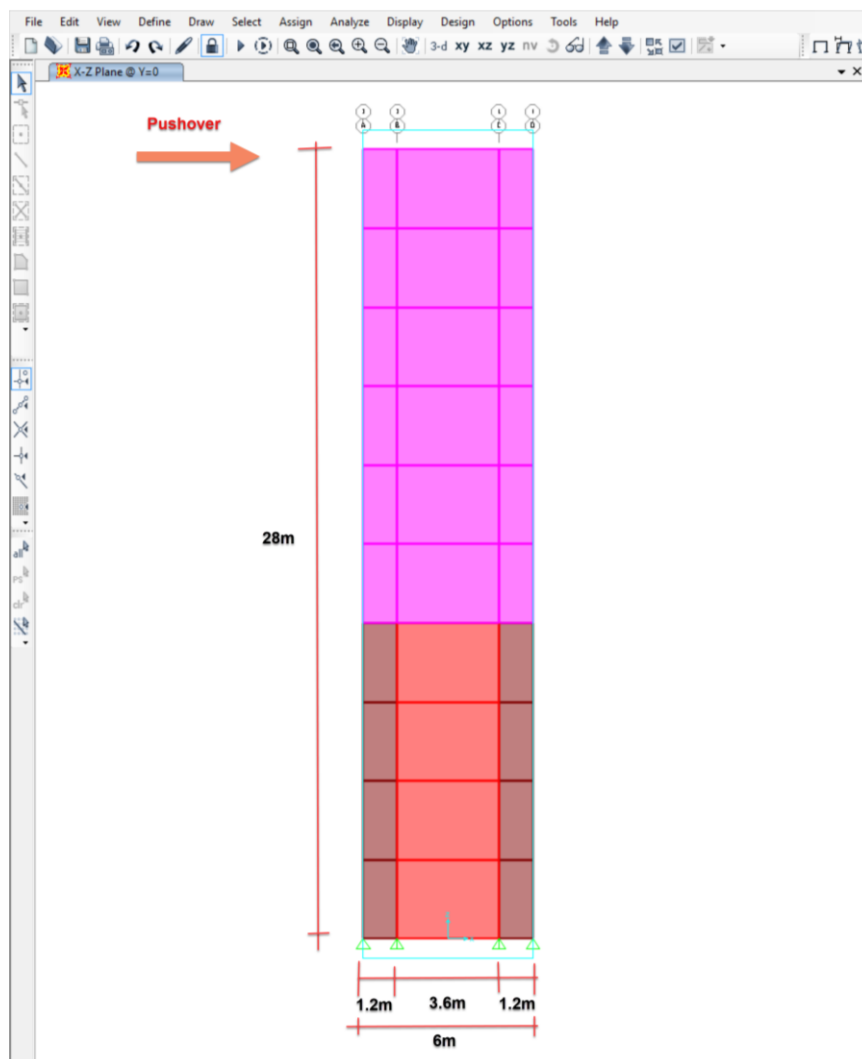


Figura 10. Modelaje muro 1

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Como se aprecia en la figura 7, el “pushover” se resume a una carga aplicada en el tope de la estructura, y la misma va incrementado gradualmente hasta que la estructura llegue a su punto de falla. La curva arrojada por este método, que no es más que la carga aplicada vs. la deformación en el tope, permite determinar la ductilidad de la estructura evaluada como un todo, y posteriormente se observará como influye el hecho de cambiar el número de ramas en la ductilidad global.

4.3.3. Definición de materiales

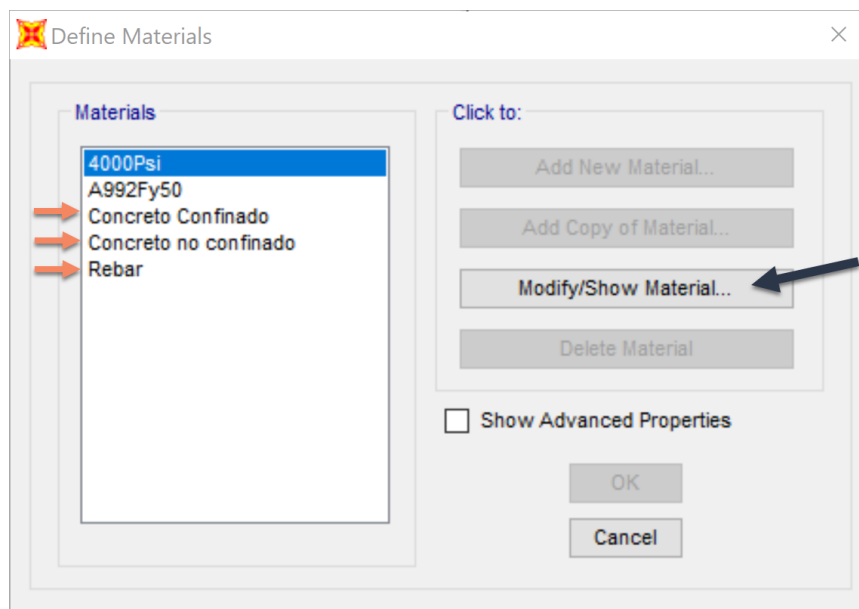


Figura 11. Paso 1 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la ventana anterior de la figura 11, se tiene la lista de materiales definidos, de los cuales solo se usarán concreto confinado, concreto no confinado y acero de refuerzo “rebar”, los demás son predeterminados del programa en sí. Se selecciona concreto confinado (para este ejemplo) y se oprime el botón señalado (flecha negra).

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Concreto Confinado

Material Type: Concrete

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2402,7697

Mass per Unit Volume: 245,0143

Units

Kgf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,535E+09

Poisson, U: 0,2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 1,056E+09

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 2800000

Expected Concrete Compressive Strength: 2800000

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 12. Paso 2 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Se selecciona propiedades avanzadas.

Material Property Options

Material Name: Concreto Confinado

Material Notes: Modify/Show...

Options

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Display Color:

☐ Material Properties are Temperature Dependent

Modify/Show Material Properties...

OK Cancel

Figura 13. Paso 3 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Se oprime botón de modificación señalado en rojo.

The 'Material Property Data' dialog box contains the following fields and sections:

- Material Name:** Concreto Confinado
- Material Type:** Concrete
- Symmetry Type:** Isotropic
- Modulus of Elasticity:** E = 2,535E+09
- Poisson:** U = 0,2
- Coeff of Thermal Expansion:** A = 9,900E-06
- Shear Modulus:** G = 1,056E+09
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 2402,7697
 - Mass per Unit Volume: 245,0143
- Units:** Kg, m, C
- Other Properties for Concrete Materials:**
 - Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 2800000
 - Expected Concrete Compressive Strength: 2800000
 - ☐ Lightweight Concrete
 - Shear Strength Reduction Factor: (empty)
- Advanced Material Property Data:**
 - Nonlinear Material Data...** (highlighted in red)
 - Material Damping Properties...
 - Time Dependent Properties...
 - Thermal Properties...
- Buttons:** OK, Cancel

Figura 14. Paso 4 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Ahora se procede a entrar en la sección de análisis no lineal del material seleccionado, en este caso concreto confinado.

The 'Nonlinear Material Data' dialog box contains the following fields and sections:

- Material Name:** Concreto Confinado
- Material Type:** Concrete
- Hysteresis Type:** Takeda
- Drucker-Prager Parameters:**
 - Friction Angle: 0,
 - Dilatational Angle: 0,
- Units:** Kg, m, C
- Stress-Strain Curve Definition Options:**
 - ☒ Parametric
 - ☐ User Defined
 - Mander** (highlighted in red)
 - Convert To User Defined
- Parametric Strain Data:**
 - Strain At Unconfined Compressive Strength, f_c : 2,219E-03
 - Ultimate Unconfined Strain Capacity: 5,000E-03
 - Final Compression Slope (Multiplier on E): -0,1
- Buttons:** Show Stress-Strain Plot..., OK, Cancel

Figura 15. Paso 5 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Esta parte es una parte clave en este trabajo (figura 15), el programa pide en que basará las curvas de esfuerzo-deformación del material y es aquí donde se le indica la opción de Mander como se aprecia en la figura, a continuación, se mostrará una curva de esfuerzo deformación que no será la definitiva, ya que no se le ha indicado el número de ramas. En la siguiente figura se seleccionará la opción de modificación de la data de Mander.

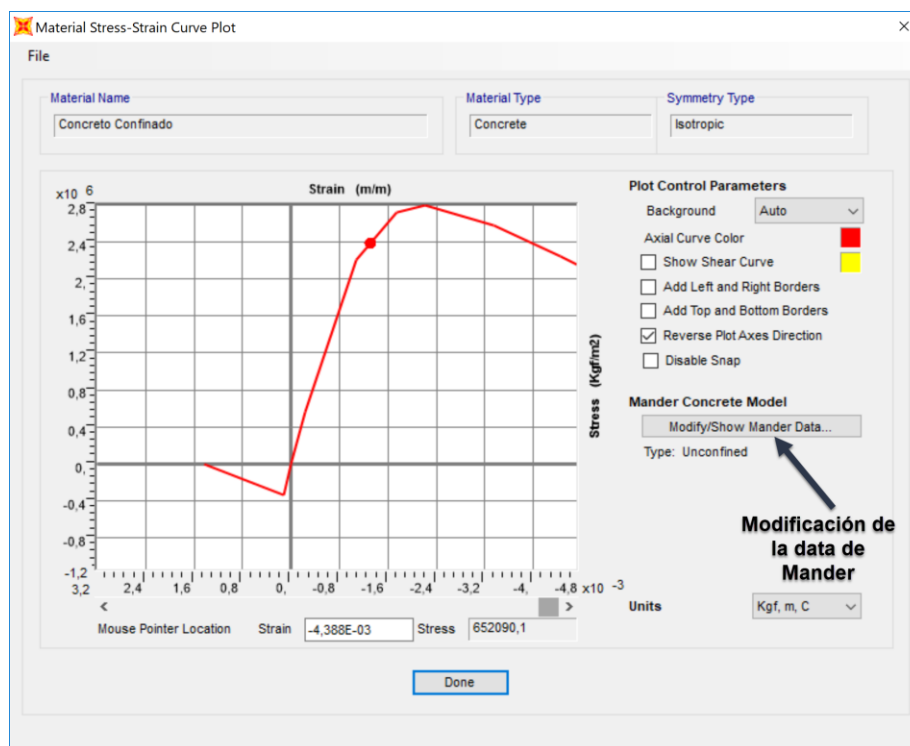


Figura 16. Paso 6 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Figura 17. Paso 7 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la ventana anterior, figura 17, es donde se procede a establecer los parámetros que corresponden a la teoría de Mander. Es importante destacar que absolutamente en todas las ligaduras de todos los modelos se usaron barras de ½" separadas cada 10cm. En este ejemplo, se colocó el número máximo de ramas que caben en la zona de confinamiento, 8 en el sentido largo, 3 en el sentido corto como se puede apreciar, mientras que también se le indica la distancia centro a centro de la perimetral, teniendo una zona de confinamiento de 1.2x0.3m, con los respectivos recubrimientos requeridos, nos queda una separación centro a centro de 1.1m en el sentido largo, y 0.23m en el sentido corto, como se aprecia en la siguiente figura.

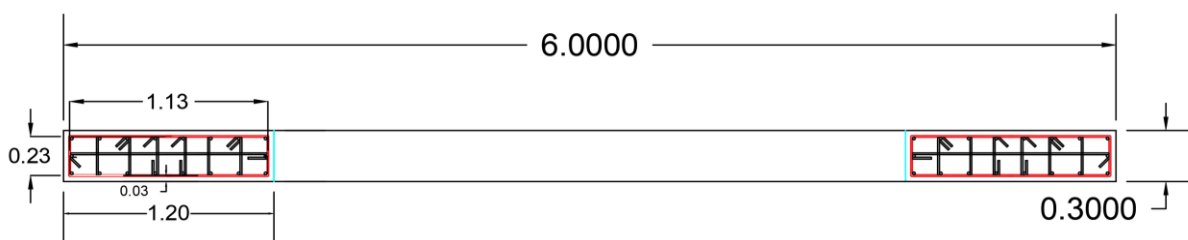


Figura 18. Vista del muro en planta, ramas 8x3

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

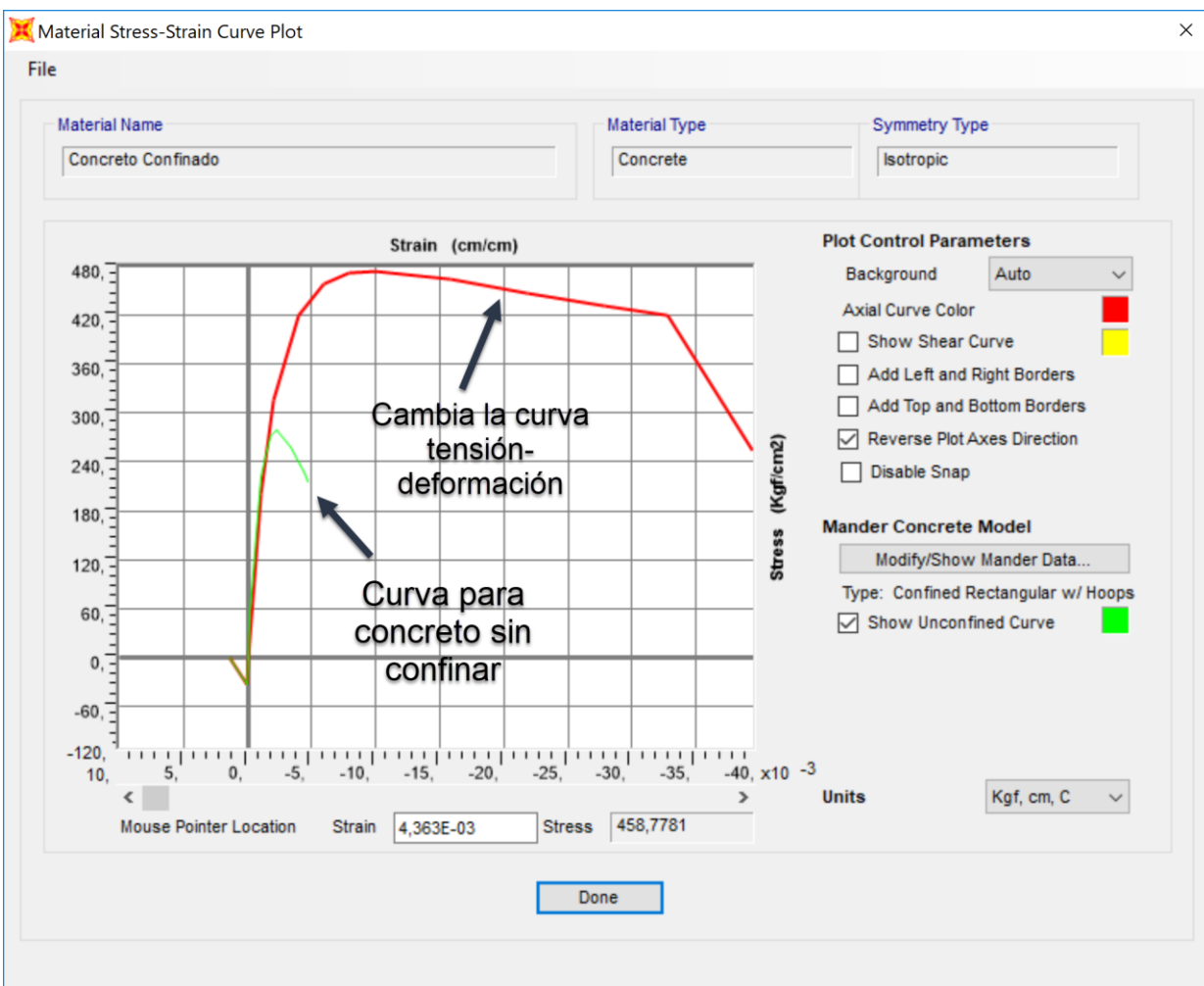


Figura 19. Paso 8 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Ahora se tiene la curva del concreto confinado que es la que adoptará el modelo para la zona confinada a la hora de hacer el “pushover”. Sin embargo, aquí no termina el trabajo en lo que respecta a la definición del material, en este caso del concreto confinado, ya que la opción de la figura 18 el programa no la adopta para el modelo, a menos que se seleccione la opción de “Convert to user defined” (convertir a curva definida por usuario), opción que toma los valores de la gráfica anterior (figura 18) y solo así el programa la toma en cuenta a la hora de hacer el análisis final.

Nonlinear Material Data

Edit

Material Name
Concreto Confinado

Material Type
Concrete

Hysteresis Type
Takeda

Drucker-Prager Parameters
Friction Angle: 0,
Dilatational Angle: 0,

Units
Kgf, cm, C

Stress-Strain Curve Definition Options
☐ Parametric
☒ User Defined

Convert To User Defined

User Stress-Strain Curve Data
 Number of Points in Stress-Strain Curve: 15

	Strain	Stress	Point ID
1	-0,0392	-234,6598	
2	-0,0327	-400,4417	-E
3	-0,0317	-402,6877	
4	-0,0261	-416,3199	
5	-0,0205	-431,7856	
6	-0,0149	-448,2188	
7	-9,309E-03	-458,9167	-C
8	-7,447E-03	-456,0109	
9	-5,585E-03	-442,8867	
10	-3,724E-03	-405,4499	
11	-1,862E-03	-302,1929	
12	-9,309E-04	-190,6625	

Plot
 Order Rows
 Show Plot...

Plotea la curva anterior de Mander

OK **Cancel**

Figura 20. Paso 9 definición de materiales.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En el caso del concreto no confinado, simplemente se selecciona la opción de “unconfined” en la figura 17. Para el caso del acero de refuerzo(rebar), en la figura 15, en vez de colocar Mander (no aparecerá esa opción por el hecho de tratarse del acero) se seleccionará la opción Park.

4.3.4. Manejo de la multicapa

En esta sección se explicará la manera de operar la herramienta multicapa del programa SAP2000.

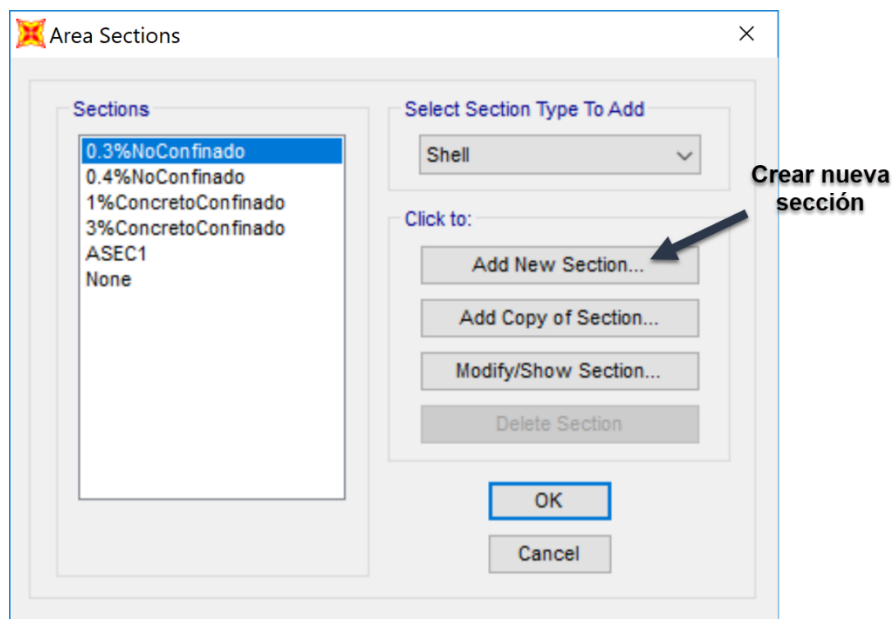


Figura 21. Paso 1 manejo de la multicapa.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la figura 20 se observan las secciones que fueron utilizadas en el trabajo, ya que cada muro constaba de 3 secciones diferentes, 0.3% y 0.4% de concreto no confinado, y 1% de concreto confinado, las demás que aparecen no fueron utilizadas. Para crear una nueva, hay que dirigirse a la opción mostrada “crear nueva sección”.

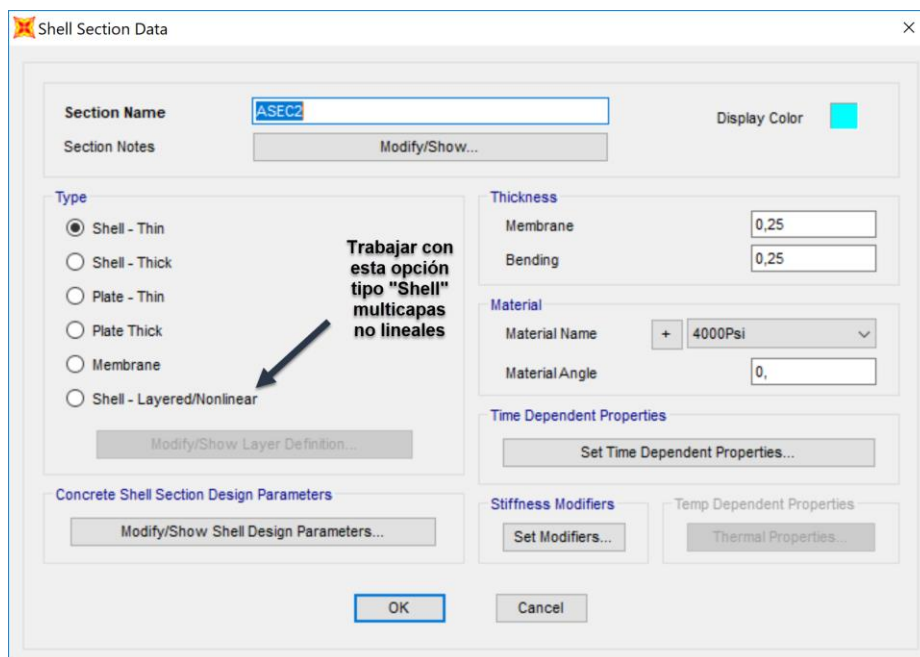


Figura 22. Paso 2 manejo de la multicapa.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Se trabaja con la opción tipo Shell en su opción no lineal, significa que el miembro estructural tendrá rigidez tanto en su plano como fuera de su plano. Esta opción tipo Shell multicapa no lineal (Layered/nonlinear), es un apartado clave en lo que respecta a los objetivos de este Trabajo Especial de Grado.

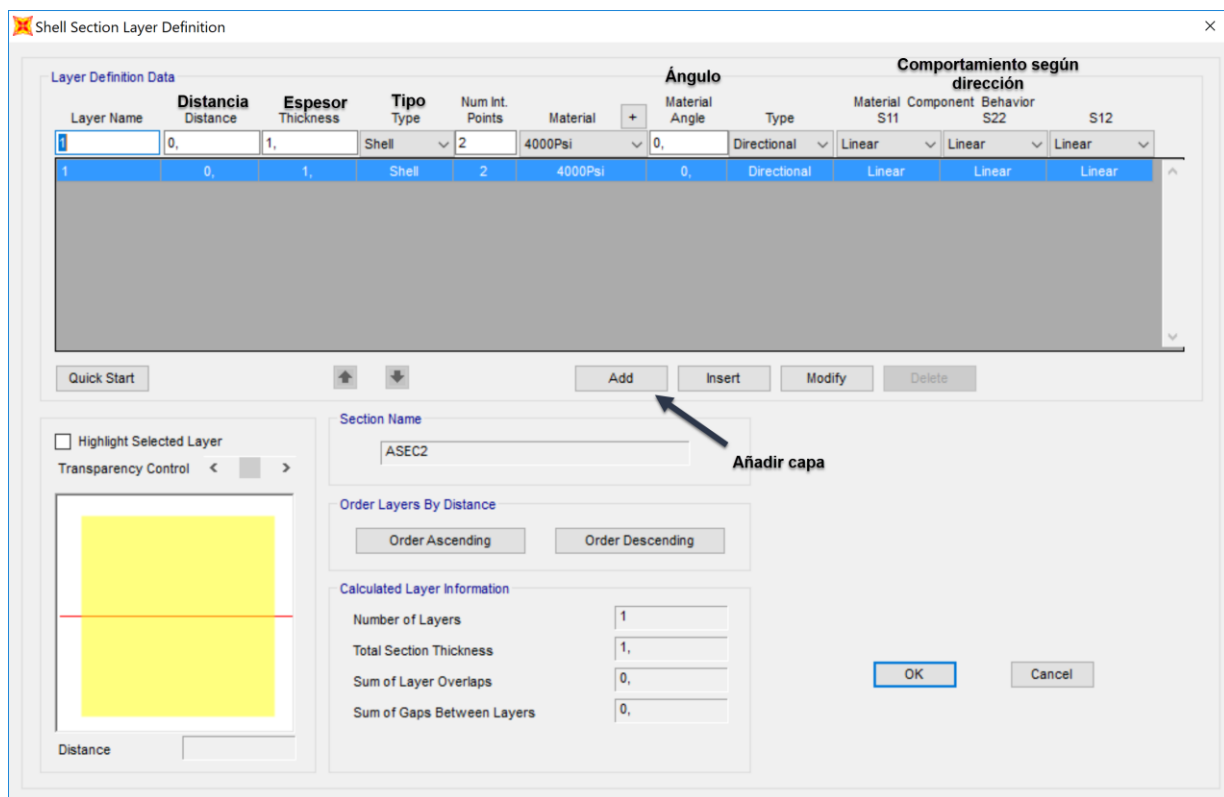


Figura 23. Paso 3 manejo de la multicapa.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Aparece una ventana en la se puede observar una serie de columnas, a continuación, se resaltan las mas importantes para que se pueda conseguir el modelaje deseado:

Distancia: solo aplica para los aceros, y es la distancia a la cual estarán estos del eje que se aprecia en la figura inferior izquierda de la imagen anterior (figura 22)

Espesor: este será el espesor del material que se esté introduciendo. Para el muro se tendrá un espesor de 0.3m mientras que el espesor equivalente del acero variará según el porcentaje de este en cada sección, la manera en que se haya este espesor equivalente será explicada más adelante.

Tipo: esto va a determinar la manera en que se comporta el material, puede ser tipo membrana o tipo “plate”. Si el material tiene un comportamiento tipo membrana,

quiere decir que el mismo trabajará solo en su plano, mientras que tipo “plate” quiere decir que solo trabajará fuera de su plano.

Material: aquí es donde se elegirá el material que se haya definido previamente en definición de materiales.

Ángulo: se rota el ángulo 90 grados en el caso del acero para hacer coincidir el eje local de las barras de refuerzo con la dirección axial de las barras.

Comportamiento según dirección: En esta casilla se define cual es la dirección de comportamiento lineal o no lineal según los ejes locales del elemento, si es en el plano se aplica la no linealidad en la capa tipo membrana, si es fuera del plano sería en la capa tipo plate.

Espesor equivalente de acero: como se ve en la figura 23, la imagen no muestra cada cabilla sino una línea delgada que representa a una plancha equivalente de acero la cual corresponde a la misma área de acero que habría en esas cabillas, esto, porque es la manera que el acero trabaje como un Shell tipo membrana.

Así, por ejemplo, para una sección de elemento de borde de 1.2x0.3 m, el 0.4% de acero longitudinal corresponde a 10.32 cm^2 de acero, que en dos caras son 5.16 cm^2 cada una, la plancha equivalente de 1 m de longitud tendría un espesor de $5.16 \text{ cm}^2 / 100 \text{ cm} = 0.0516 \text{ cm}$ ó 0.000516 m como se muestra en la casilla Thickness de la figura 23.

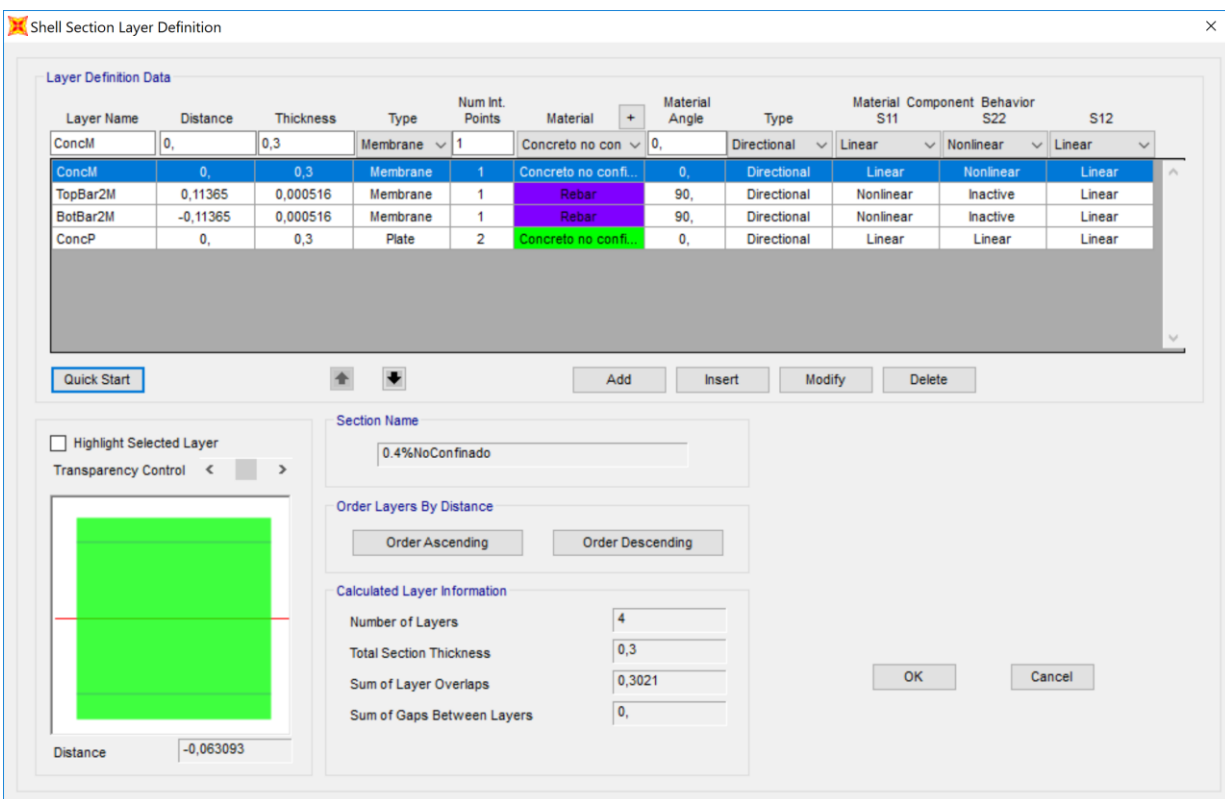


Figura 24. Paso 3 manejo de la multicapa.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

4.3.5. Análisis estático no lineal. Pushover

Ahora que están definidos los materiales y aclarado el tema del manejo de la herramienta multicapa, el siguiente paso para el modelado de los muros es el del “pushover”.

Una vez mas se recalca que el objetivo de esta técnica es llevar la estructura hasta su punto de falla por medio de una carga (en este caso en el tope) que incrementa gradualmente, lo que dará una curva de carga aplicada vs. deformación, con lo que podremos determinar la ductilidad de la estructura evaluada como un todo y no solo a partir de una sección de esta.

Para crear el caso de carga del “pushover” previamente debemos crear un caso que contenga las cargas gravitacionales, ya el que “pushover” comenzaría a partir de este caso gravitacional.

Se va a la opción “define - load cases” (casos de carga) y seleccionamos la opción que aparece en la siguiente imagen.

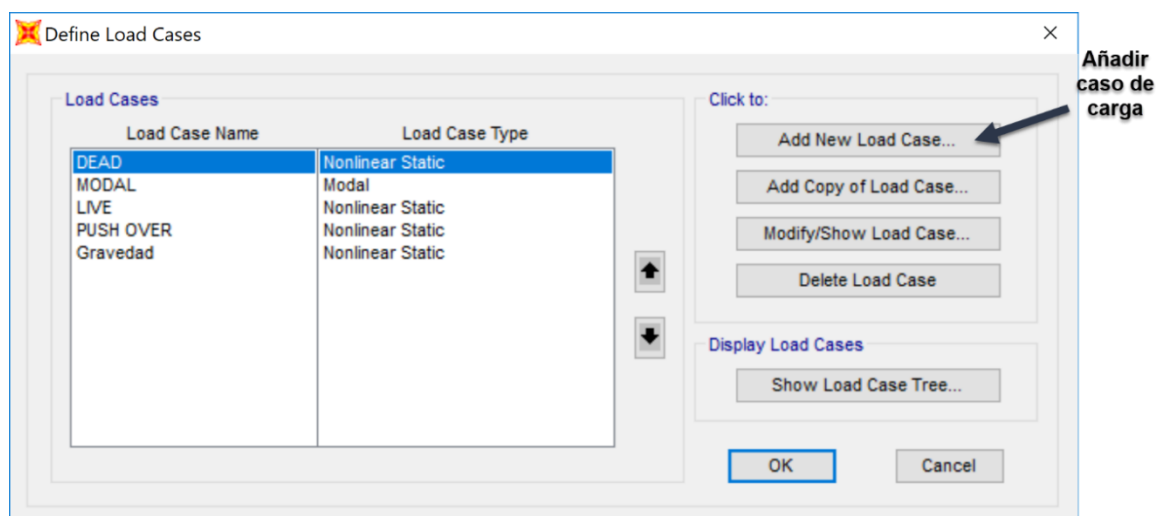


Figura 25. Paso 1 análisis de pushover.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name
 Gravedad [Set Def Name] [Modify/Show...]

Initial Conditions
☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☐ Continue from State at End of Nonlinear Case
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case
 All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1.0
Load Pattern	LIVE	0.25

[Add] [Modify] [Delete]

Analysis Type
☐ Linear
☒ Nonlinear
☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters
☒ None
☐ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Mass Source
 Previous

Other Parameters
 Load Application: Full Load [Modify/Show...]
 Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
 Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Figura 26. Paso 2 análisis de pushover.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

El caso de gravedad no parte desde ningún otro caso de carga, sino que lo podríamos denominar un “caso base”, en este caso tendremos carga permanente y carga variable (dead y live). Es importante señalar que el tipo de análisis es no lineal como se aprecia en la parte superior derecha. Se asumió que el muro corresponde a un edificio de vivienda y se le aplicó un factor de escala de 1 y 0.25 a la carga permanente y a la carga variable, respectivamente, lo cual no tendrá demasiada importancia en lo que a análisis de resultados se refiere. Una vez creado el caso de carga gravitacional, procedemos a crear el caso de carga del “pushover”.

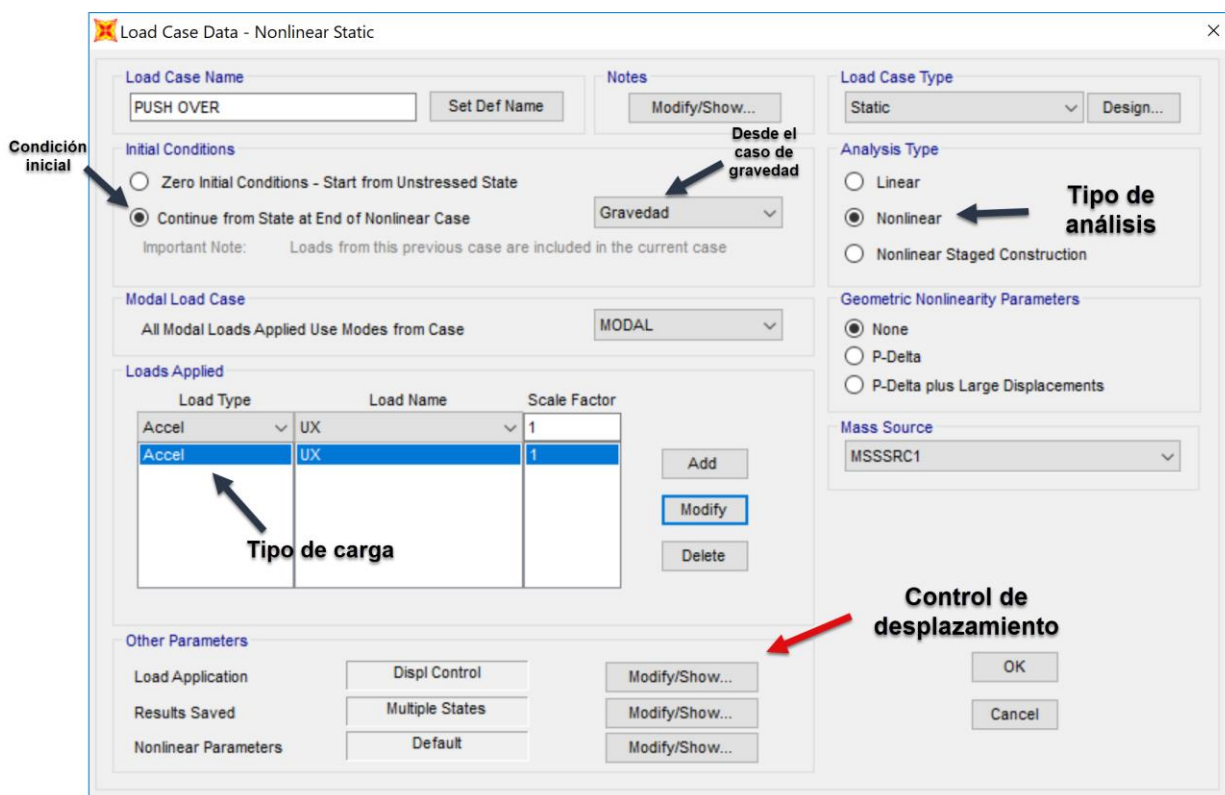


Figura 27. Paso 3 análisis de pushover.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Es necesario que la condición inicial del pushover tenga como caso base el caso gravitacional, como se aprecia en la parte superior derecha que para la condición inicial de este caso fue escogido el caso “Gravedad” previamente creado. El tipo de carga se modifica a tipo aceleración y el tipo de análisis, como en el de gravedad, es no lineal.

Es importante tener en cuenta el control de desplazamiento en este caso de carga, ya que, si es muy pequeño, no encontraremos el punto de falla en la curva final, y si es muy grande, la escala no ayudará desde lo visual, por lo que es probable que se tenga que tantear las primeras veces para cada muro hasta que se consigue el control de desplazamiento mas adecuado.

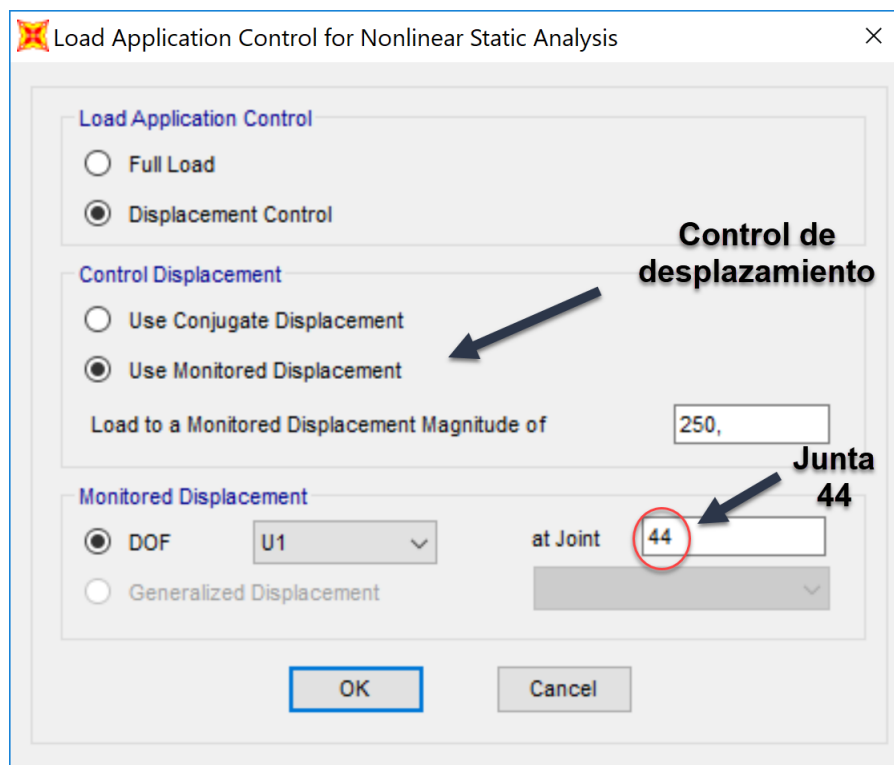


Figura 28. Paso 4 análisis de pushover.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la figura 27 se observa que se elige la opción de control de desplazamiento, y se le colocó para este caso específico un control de 250cm en el tope. Para que sea en el tope se tuvo que elegir la junta 44 y como se apreciará en la siguiente figura, es la junta superior derecha del muro.

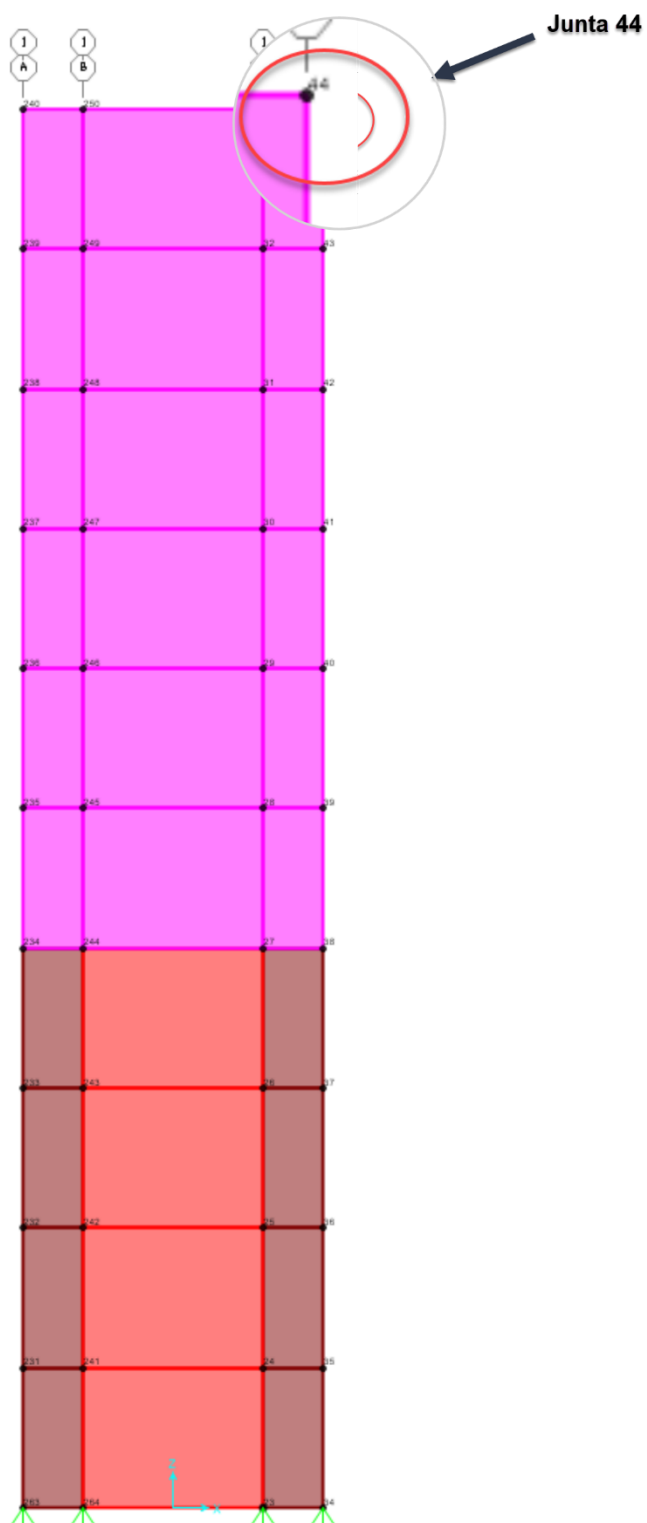


Figura 29. Nodos o juntas del muro.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

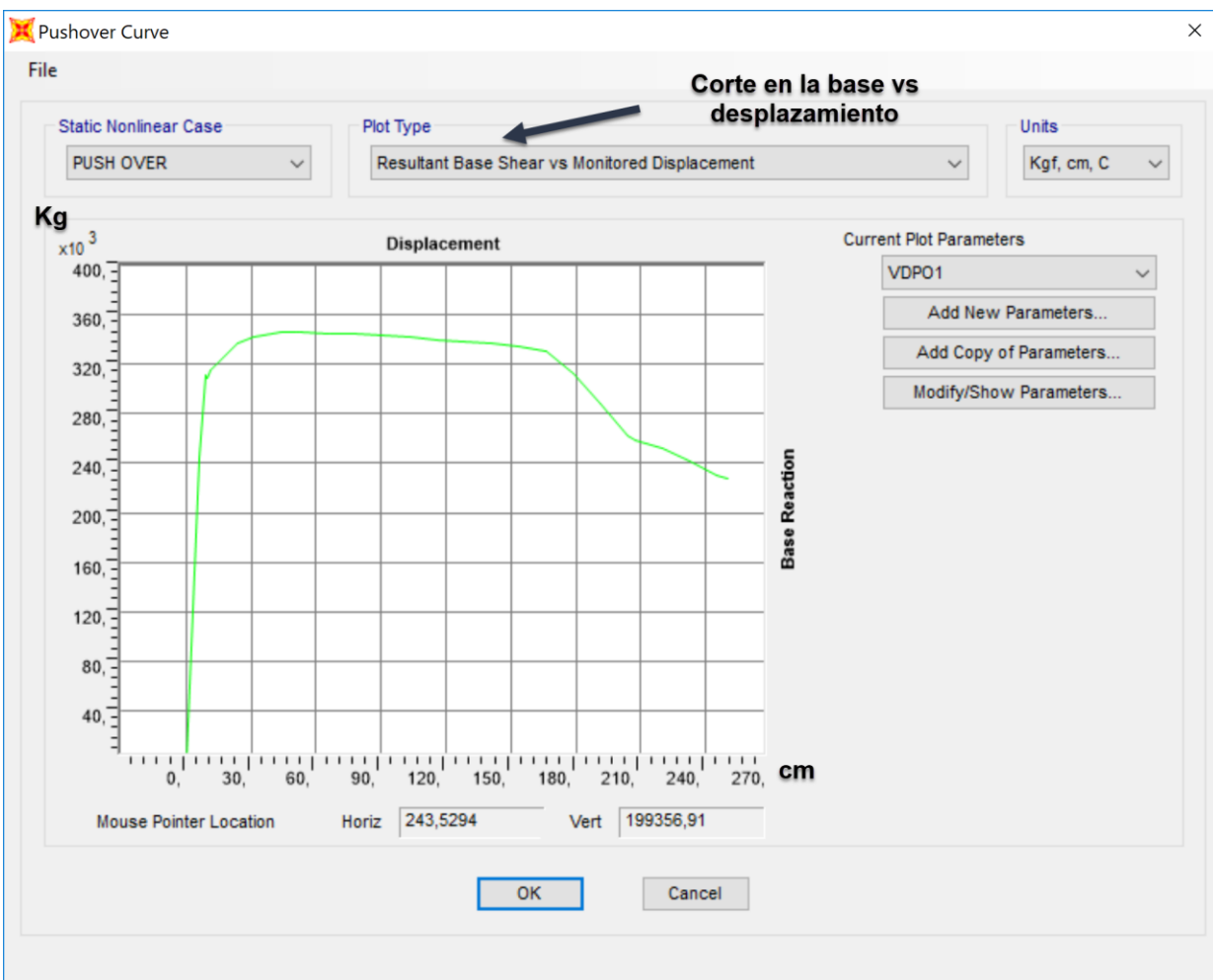


Figura 30. Paso 5 análisis de pushover.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Finalmente, una vez corrido el programa, se puede ver la curva del “pushover”, mediante la cual se podrá determinar la ductilidad de cada muro evaluado según su esbeltez y el número de ramas que posea.

Con las curvas halladas mediante el “pushover” como se explicó anteriormente, se procederá a medir que tanto aumenta la ductilidad del muro cuando se sube el número de ramas de las ligaduras.

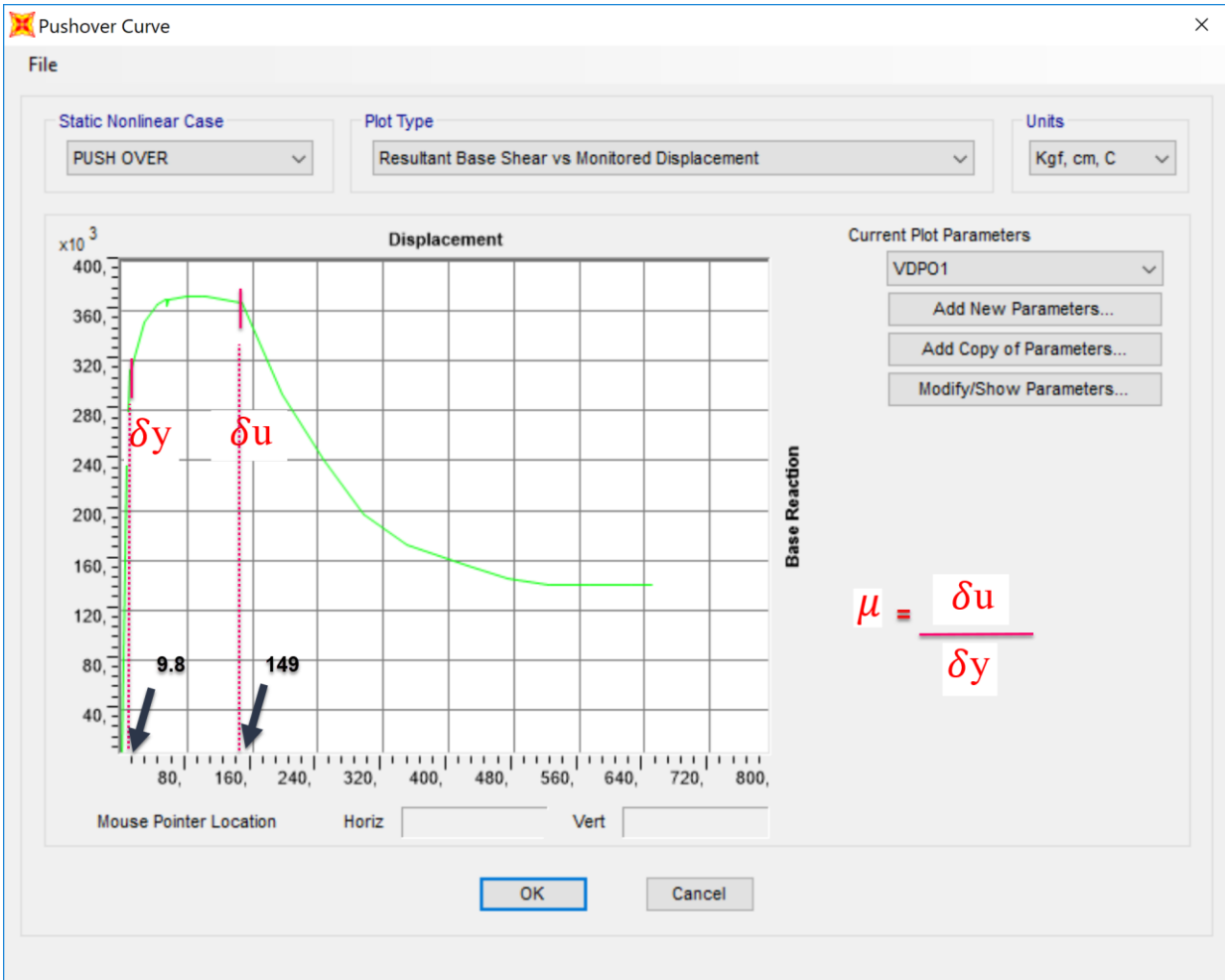


Figura 31. Ejemplo 1 de medición de ductilidad.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la imagen anterior se aprecia cómo se calculó la ductilidad en cada uno de los casos; en este ejemplo que es un muro con 6 ramas en el sentido largo y 3 en el sentido corto (6x3) separadas 10cm centro a centro longitudinalmente, se tiene un valor de:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{149}{9.8} = 15.2$$

Se procede a hacer el mismo procedimiento ahora para un muro con ramas 8x3:

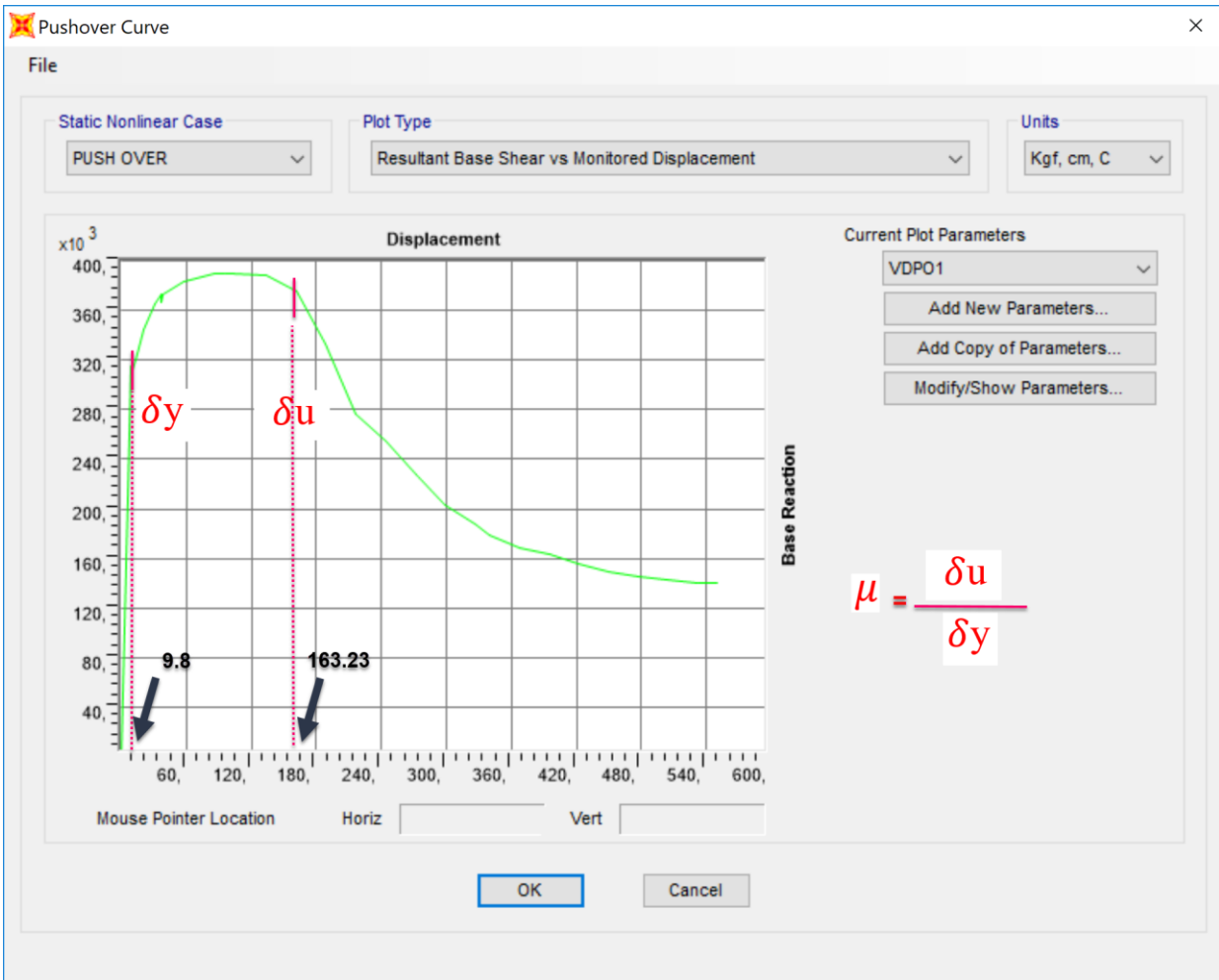


Figura 32. Ejemplo 2 de medición de ductilidad.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

Para este caso de un muro de ramas 8x3 obtenemos un valor de:

$$\mu = \delta_u / \delta_y = \frac{163.23}{9.8} = 16.65$$

Incremento de ductilidad entre el muro de 8x3 y el de 6x3:

$$\square = \frac{16.65}{15.2} = 1.095, \text{ la ductilidad ha incrementado un } 9.5\%$$

4.4. Gráficas comparativas

Es importante destacar que, por norma ACI 318-14 el área de acero requerido en el sentido largo es de 7.1cm^2 , y en el sentido corto es de 1.94cm^2 , lo que se cubriría con 6 ramas en el sentido largo y 2 ramas en el sentido corto, tomando en cuenta que todas las ligaduras que se modelaron en este trabajo son de $\frac{1}{2}$ ". El acero requerido en cada sentido mencionado anteriormente se puede obtener del mayor de las siguientes dos fórmulas:

$$Ash = sbc * 0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$$

$$Ash = sbc * 0.09 * \frac{f'_c}{f_{yt}}$$

Exportando los datos de la curva del "pushover" del programa SAP200 a la herramienta de cálculo Excel, se obtuvieron las siguientes gráficas.

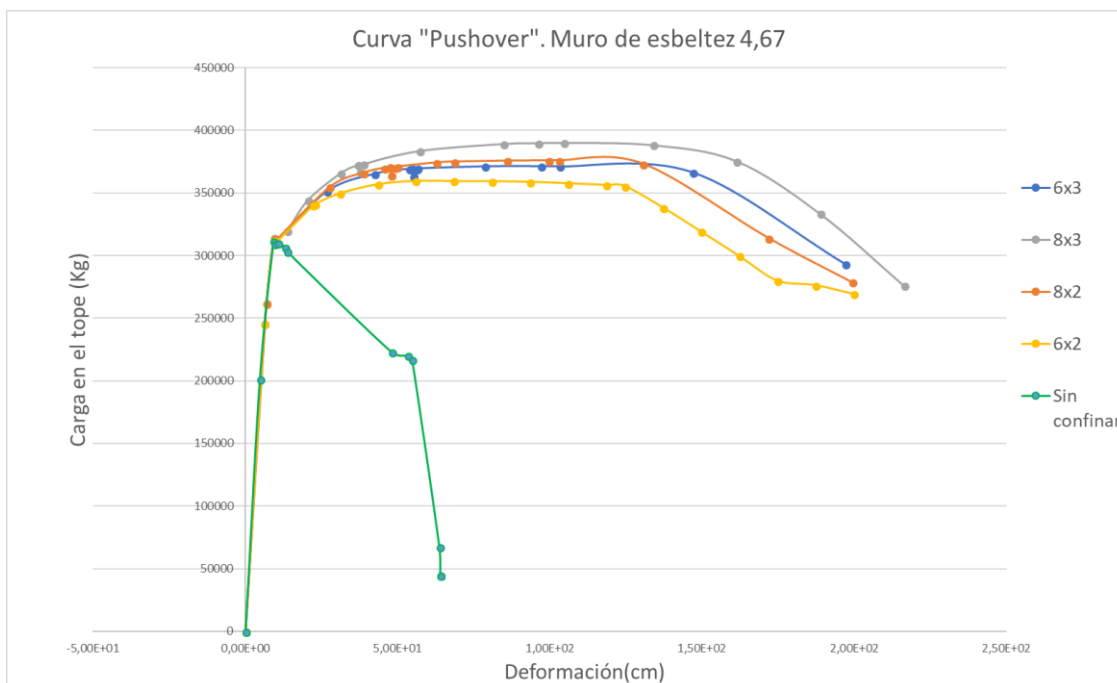


Figura 33. Curvas del pushover para diferentes grados de confinamiento, muro de esbeltez 4.67.

Fuente: Elaboración propia en EXCEL.

En el muro de menor esbeltez ($\frac{h_w}{l_w} = 4.67$) se obtuvieron las siguientes ductilidades:

$$\mu_{6x2} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{124.65}{9.26} = 13.46$$

$$\mu_{6x3} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{146.92}{9.26} = 15.86$$

$$\mu_{8x2} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{130.52}{9.26} = 14.1$$

$$\mu_{8x3} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{161.35}{9.26} = 17.42$$

$$\mu_{SC} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{12.9}{9.26} = 1.39$$

SC: sin confinar

A continuación, se presentan los incrementos de ductilidad según número de ramas:

Muro de esbeltez 4,67		
Ramas	Relación de ductilidad	Incremento(%)
6x2 a 6x3	1,178660249	17,9
6x2 a 8x2	1,047091857	4,7
6x3 a 8x2	0,888374626	-11,2
6x3 a 8x3	1,098216717	9,8
6x2 a 8x3	1,294424388	29,4

Tabla 3. Incrementos porcentuales de ductilidad en muro de esbeltez $\frac{h_w}{l_w} = 4.67$.

Fuente: Elaboración propia en EXCEL.

La relación entre el arreglo más dúctil(8x3) y el muro sin elementos de borde confinados, en el muro de esbeltez 4.67 es de:

$$17.42/1.39 = 12.53 \text{ veces}$$

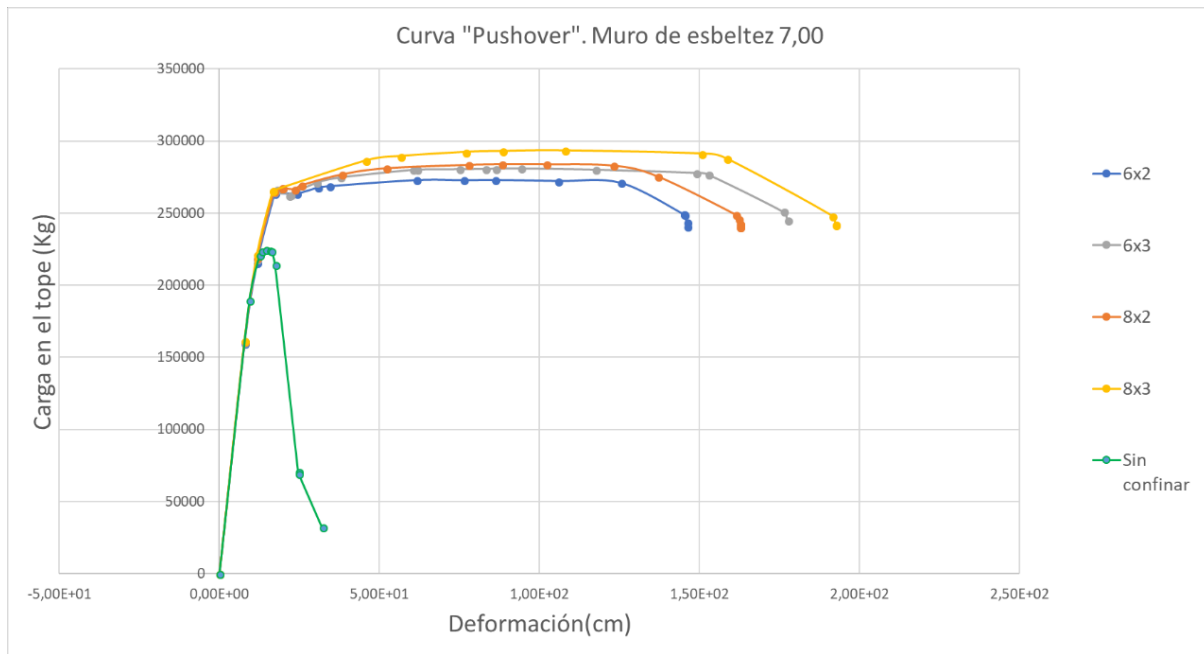


Figura 34. Curvas del pushover para diferentes grados de confinamiento, muro de esbeltez 7.00.

Fuente: Elaboración propia en EXCEL.

En el muro de mayor esbeltez ($\frac{h_w}{l_w} = 7.00$) se obtuvieron las siguientes ductilidades:

$$\mu_{6x2} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{125.39}{16.6} = 7.55$$

$$\mu_{6x3} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{148.78}{16.6} = 8.96$$

$$\mu_{8x2} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{136.84}{16.6} = 8.24$$

$$\mu_{8x3} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{158.57}{16.6} = 9.55$$

$$\mu_{sc} = \frac{\delta_u}{\delta_y} = \frac{16.36}{12.59} = 1.3$$

SC: sin confinar

Igual que en el muro anterior, se presentan los respectivos incrementos de ductilidad:

Muro de esbeltez 7		
Ramas	Relación de ductilidad	Incremento(%)
6x2 a 6x3	1,186538001	18,7
6x2 a 8x2	1,091315097	9,1
6x3 a 8x2	0,919747278	-8,0
6x3 a 8x3	1,065801855	6,6
6x2 a 8x3	1,264614403	26,5

Tabla 4. Incrementos porcentuales de ductilidad en muro de esbeltez $\frac{h_w}{l_w} = 7.00$.

Fuente: Elaboración propia en EXCEL.

La relación entre el arreglo más dúctil (8x3) y el muro sin elementos de borde confinados, en el muro de esbeltez 7.00 es de:

$$9.55/1.3 = 7.34 \text{ veces}$$

4.5. Tensiones de compresión según número de ramas en los elementos de borde

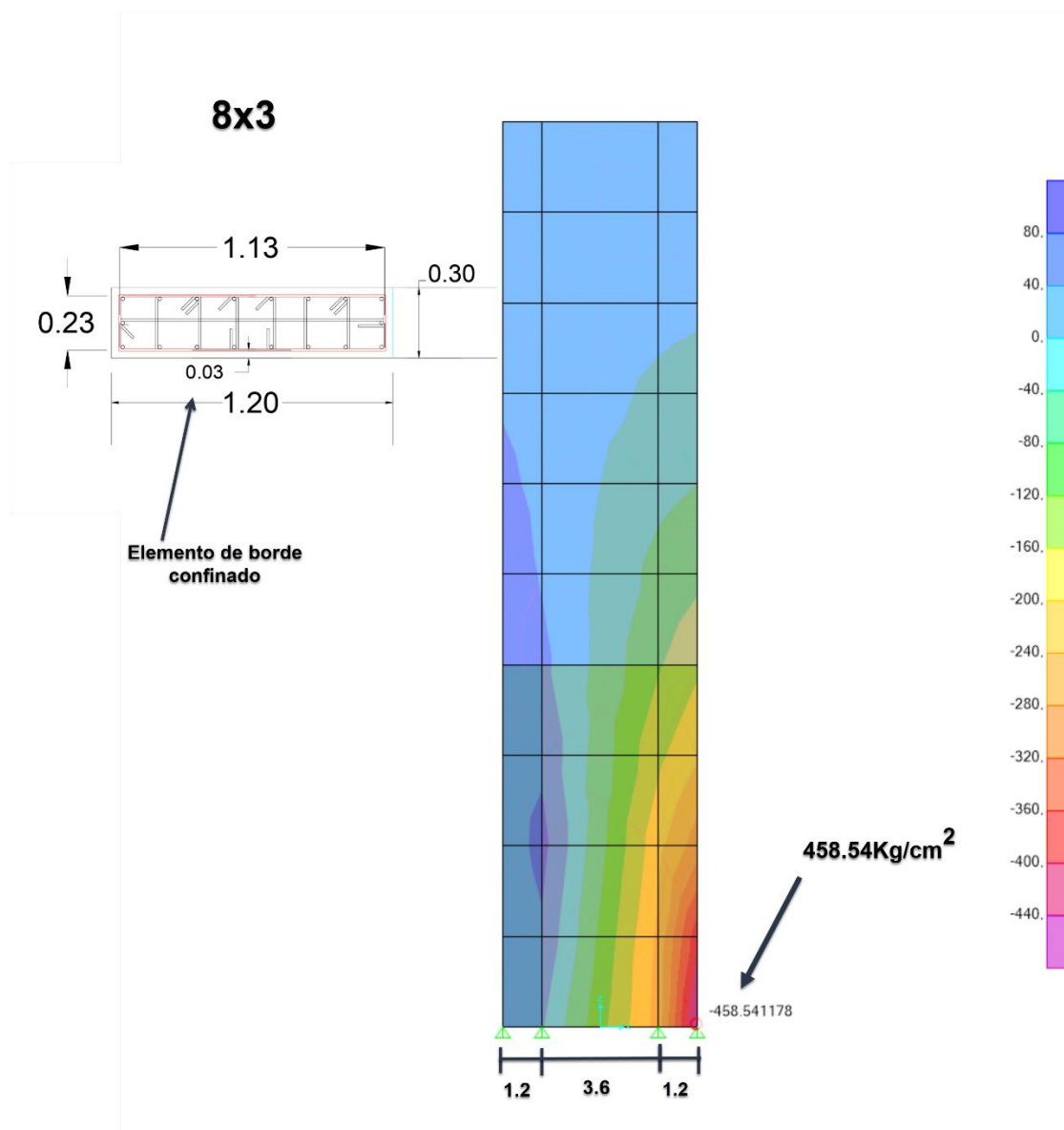


Figura 36. Tensiones de compresión en los elementos de borde para ramas 8x3

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

En la figura anterior se ve como con una configuración de ramas de 8x3, el muro es capaz de llegar a soportar un esfuerzo actuante de $458.5 \frac{kg}{cm^2}$, mientras que en la

figura 35 se ve como el muro con un grado de confinamiento menor, 6x2, cumpliendo con lo requerido en la norma, desarrolla una tensión límite de 404.5 kg/cm^2 , un 11.8% menos de resistencia.

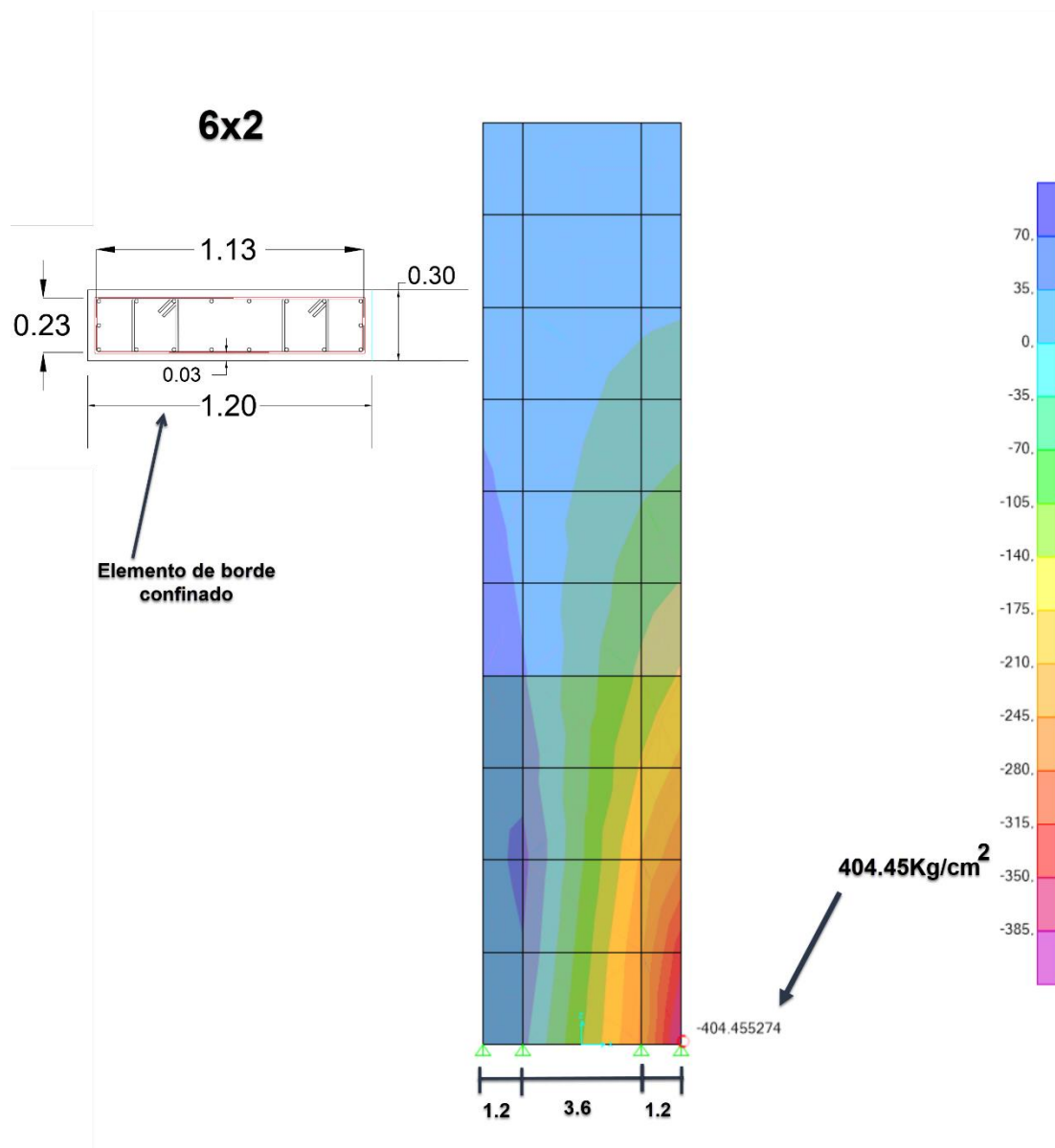


Figura 37. Tensiones de compresión en el muro para ramas 6x2.

Fuente: Elaboración propia en SAP2000.

CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizó de forma incremental el beneficio en la ductilidad de los muros estructurales en función de las ramas de las ligaduras, siendo la separación y área de las mismas un factor constante (10cm y barras de $\frac{1}{2}$ ”), realizándose con la técnica del pushover y las multicapas no lineales en elementos tipo Shell con resultados de ductilidad que dependen de los arreglos en dos direcciones ortogonales de ligaduras obteniéndose incrementos porcentuales de ductilidad que son favorables siempre que el equilibrio de esas ramas en dos direcciones sea el adecuado. Se partió de una cantidad mínima de ligaduras que satisfacen el mínimo acero de confinamiento de la Norma ACI 318-14 para elementos de bordes especiales y en la mayoría de los casos en los que se aumenta este número de ramas se obtienen incrementos importantes de ductilidad siempre que se coloquen de manera que el lado corto tenga la mayor cantidad de ramas posibles, y por supuesto cumpliendo con lo mínimo requerido en el lado largo.

Se observó como el hecho de que el concreto este confinado, cambia de una manera radical el comportamiento del muro, y comparando los dos extremos que sería este caso sin confinar, con la mejor configuración de ramas evaluada que sería la de 8x3, se pueden obtener incrementos de ductilidad desde 7 a 12 veces. Sin embargo, al comparar la ductilidad entre la configuración de ramas 6x2 (mínimo requerido por la norma ACI 318-14) y el muro sin confinar, se pueden obtener incrementos de ductilidad entre 6 y 9 veces.

No necesariamente a mayor número de ramas en los elementos de borde encontraremos un mejor comportamiento en los muros de corte, se apreció como al aumentarlas de una manera equilibrada, se obtenían aumentos de ductilidad satisfactorios, mientras que, si se aumentaba solo en un sentido, este aumento no iba a ser tan notable. El incremento de una configuración de ramas de 6x2 a una de 6x3 ronda el 18%, y cabe destacar que ambas configuraciones cumplen con lo mínimo que exige la Norma ACI 318-14 para elementos de bordes especiales.

Un ejemplo que recalca aún mas la afirmación de que no necesariamente se consigue un mejor comportamiento con el aumento de ramas en las ligaduras, es que

para los dos muros evaluados, en los casos de las configuraciones de ramas de 6x3 a 8x2, se halló que para 6x3 teniendo un total de 9 ramas, se obtuvo una ductilidad mayor que para 8x2(10 ramas), por lo que buscar un mejor equilibrio con una relación menor entre el número de ramas en el sentido largo y el sentido corto, siempre que en el sentido largo se cumpla con lo mínimo exigido, puede tener una repercusión considerable en la optimización del diseño de la zona confinada de estos muros tratados en este trabajo, consiguiendo mejores resultados con menos material.

También se analizó las tensiones de compresión máximas alcanzadas en el instante de la rotura de un mismo muro y se evidencia que para mejor arreglo de ligaduras se alcanzan tensiones mayores de compresión en el elemento. Esto permite inducir que el nivel de tensiones en elemento de borde es una variable determinante en la cantidad de ramas a ser colocadas.

Para el muro más esbelto, con misma cantidad de acero longitudinal, mismo espesor e igual cantidad de ramas se obtuvieron ductilidades menores, consiguiendo un valor de $\mu_{8x3} = 9.55$, mientras que para el muro de menor esbeltez $\mu_{8x3} = 17.42$.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

Al realizar un estudio de pushover en los dos tipos de muros de corte presentados, incrementando el acero transversal de confinamiento aumentando el numero de ramas en las ligaduras, observándose como mejora la ductilidad en la mayoría de los casos, se puede concluir que es mas beneficioso para la estructura tener un equilibrio de ramas en ambos sentidos, lo que conlleva a que se coloque el máximo numero posible en el sentido corto, siempre que se cumpla con el mínimo requerido en el sentido largo, ya que el comportamiento dado por un número total determinado de ramas en ambos sentidos distribuidos de una manera desequilibrada, o sea, descuidando el sentido corto y colocando de más en el sentido largo, puede verse mejorado colocando incluso un numero de ramas menor pero de una manera más equilibrada.

Dada una configuración de ramas, por ejemplo, 6x2, al aumentarla en cualquier sentido, ya sea 7x2 ó 6x3, siempre aumentará la ductilidad de la estructura, y si este aumento se realiza en el sentido corto, el aumento es aún más considerable.

El incremento de ductilidad que representa el hecho de que este tipo de muros analizados en este trabajo tengan elementos de borde confinados, es tan drástico que permite concluir que se justifica lo expuesto en la norma ACI 318-14 referente al acero transversal de confinamiento en muros de corte, ya que con el acero transversal de confinamiento mínimo requerido según la norma antes mencionada, se obtienen aumentos de ductilidad desde 6 hasta 9 veces, respecto del valor que se obtiene cuando el muro no tiene ningún tipo de confinamiento.

Al comparar los dos extremos de configuraciones de ramas que fueron evaluadas en este trabajo, las cuales son 6x2 y 8x3, el incremento puede llegar a ser hasta de un 29%, esto podría significar que el calculista proceda a aumentar el factor de reducción de respuesta, lo que permitiría diseñar con fuerzas sísmicas de menor magnitud.

La norma ACI 318-14 al exigir una determinada cantidad de acero para cada sentido, lo que se traduce en número de ramas, está dirigido claramente a aumentar la ductilidad del muro, pero no para cuantificar la mejora. El procedimiento descrito en este trabajo requiere el empleo de diversas técnicas tales como el pushover, manejar a

criterio la herramienta multicapa tipo Shell que permite establecer que los materiales trabajen en su rango no lineal, la consecución de curvas del concreto confinado a partir del número de ramas que este posea (Mander), entre otras, nos permite (el procedimiento) determinar cuantitativamente el valor de la ductilidad según el número de ramas, con un margen de error razonable, lo cual permite concluir que es un procedimiento a tener en cuenta da una herramienta al calculista para determinar la configuración de las ramas de las ligaduras de la zona confinada de un muro de corte.

La configuración de ramas juega un papel muy importante en la tensión por compresión en el elemento de borde del muro, la norma solo toma en cuenta que, si la tensión por compresión es mayor a $0.2 \cdot f'_c$ se considera que son elementos de bordes especiales, pero para tensiones de compresión que excedan considerablemente ese límite anterior, el muro podría requerir aún más acero de confinamiento que el contemplado en el artículo 18.12.7.5, como si lo hace para las columnas en el artículo 18.12.7.4 que depende del nivel de compresión máxima actuante.

Por último, basados de en la comparación de muros de distintas esbelteces, se puede concluir que, para mayor esbeltez de muro, con misma cantidad de acero longitudinal, misma configuración de ramas y para el mismo espesor, se obtendrá menor ductilidad.

CAPITULO 7. RECOMENDACIONES

- A la hora del diseño tener en cuenta el arreglo de las ramas de las ligaduras en la zona confinada del muro ya que ligeras modificaciones podrían tener una repercusión muy considerable y beneficiosa para la estructura en términos de ductilidad, ya que incluso cumpliendo con lo mínimo requerido en la norma ACI 318-14, es posible mejorar notablemente el comportamiento a la hora de un sismo con solo modificar la posición de una de las ramas, cambiando, por ejemplo, de una configuración de 8x2(10 ramas) a una configuración de 7x3(10 ramas).
- Si se quiere conseguir la ductilidad máxima al diseñar un muro de corte, cuya falla está controlada por flexión, se recomienda no exceder la separación de 15cm entre centro y centro de ligaduras, mientras que si se colocan separaciones menores a 15cm no se consiguen aumentos sustanciales de ductilidad.
- Proponer una fórmula que contemple aumentar el grado de confinamiento cuando la tensión por compresión sobrepase un determinado porcentaje de f'_c , como lo hace la norma ACI 318-14 en el artículo 18.12.7.4(c). para las columnas con la siguiente fórmula:

$$Ash = sbc * 0.2 * k_f * k_n * \frac{P_u}{f_{yt} * A_{ch}}$$

- Si se va a trabajar con muros de corte en una región en la que se necesite diseñar una estructura sismorresistente, es recomendable que estos muros tengan el espesor suficiente como para poder desarrollar una zona de confinamiento que permita ofrecer el nivel de ductilidad que requiera la estructura, ya que, se ha demostrado en este trabajo que un muro sin elementos de bordes confinados puede perder su ductilidad a flexión hasta 7 veces.
- Se recomienda limitar la flexibilidad del muro debido a la esbeltez con el aumento del espesor, ya que se detectó al comparar muros de igual configuración de sus secciones transversales, pero a distintas alturas, una pérdida importante de ductilidad. El ACI 318-14 indica un espesor mínimo en función de la altura de

entrepiso ($\frac{h_u}{16}$) y no de la altura total, que normalmente se determina por resistencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*. Estados Unidos.
- American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia: Structural Engineering Institute.
- Comisión Fondonorma. (2001). *COVENIN 1756-1:2001. Edificaciones Sismorresistentes. Parte 1: Articulado*. Caracas.
- Filaj. E, Seranaj. A, Leka. E. (2016). *Confined concrete behavior influencing factors. International Research Journal of Engineering and Technology*. Albania.
- López. E. (2011). *Seminario Técnico SIDETUR. Proyecto De Edificios Con Muros Estructurales Asistidos Por El Computador*. Caracas.
- Mander, JB. (2008). *Material Stress-Strain Curves. SAP2000 Manual*. California.
- Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. New York: MC Graw-Hill.
- Park, R. P. (1988). *Estructuras de Concreto Reforzado*. Christchurch, Nueva Zelanda: Limusa.
- T. Paulay y MJN Priestley. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York: Wiley Interscience.

ANEXOS



Figura 38. Falla por deficiencias en el acero transversal de confinamiento.

Fuente: Patricio Bonelli-José Restrepo (2011)



Figura 39. Falla por ausencia de acero transversal de confinamiento.

Fuente: Patricio Bonelli-José Restrepo (2011).



Figura 40. Falla debida al bajo grado confinamiento.

Fuente: Patricio Bonelli-José Restrepo (2011).

