

**ANÁLISIS PUSHOVER EN MUROS DE CORTE: ESTADO DEL ARTE Y  
APLICACIÓN**

**DIEGO ANDRÉS GARCÍA MURCIA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2015**

**ANÁLISIS PUSHOVER EN MUROS DE CORTE: ESTADO DEL ARTE Y  
APLICACIÓN**

**DIEGO ANDRÉS GARCÍA MURCIA**

**Trabajo de Grado modalidad de investigación para optar por el título de  
Ingeniero Civil**

**Director:  
JOSÉ MIGUEL BENJUMEA ROYERO  
Ingeniero Civil, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2015**

## **DEDICATORIA**

*A mis Padres: Evelio García Quiroga y Nohemí Murcia.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco primeramente a Dios por la vida y por la oportunidad de lograr esta meta. La Gloria sea para Ti Señor.*

*A mis Padres, por todo su esfuerzo, apoyo y Amor comprensión en este largo camino. Son ustedes mi mayor orgullo y ejemplo de vida.*

*A mi Director de Proyecto, el Ingeniero José Miguel Benjumea Royero, por toda su ayuda y paciencia en la realización de este trabajo, y para quien deseo todo el éxito en esta nueva etapa de su profesión. Toda mi admiración para usted estimado profesor.*

*A mi compañera de vida, Jessicka Nuñez, por todo el cariño brindado y por la ilusión que me regala cada día. Tu apoyo ha sido valioso en todo momento Amor.*

*A Esperanza Prada y Nelson Amaya, por su ayuda incondicional en los primeros semestres de mi carrera.*

*Finalmente, a todos mis amigos, que con fe y buena energía, desearon este momento para mi vida.*

*A todos Gracias,*

*Dios lo bendiga.*

**Diego Andrés García Murcia**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	13
1. ANÁLISIS PUSHOVER.....	15
1.1 DESARROLLO DEL ANALISIS PUSHOVER .....	16
1.1.1 Limitaciones y alcances del análisis “pushover” . .....	16
2. MUROS ESTRUCTURALES DE CONCRETO REFORZADO.....	19
2.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS.....	19
3. TÉCNICAS DE MODELACIÓN DE MUROS ESTRUCTURALES DE CONCRETO ARMADO.....	21
3.1 MACRO-MODELOS .....	21
3.1.1 Modelos con elementos tipo barra (“frame element”). .....	21
3.1.2 Análisis no lineal de muros de corte modelados con elementos frame.....	21
3.1.3 Modelo de Celosías. ....	22
3.1.4 Modelos de muelles múltiples. ....	23
3.2 MICRO-MODELOS.....	24

3.2.1 Modelación de muros estructurales con elementos “shell”..	25
3.2.2 Análisis no lineal de muros estructurales con elementos lámina multicapa (“shell multi-layered”).	25
4 MÓDELOS NUMÉRICOS	27
4.1 PARÁMETROS GENERALES DE MODELACIÓN	27
4.1.1 Modelación no lineal de los materiales para elementos tipo “frame”..	27
4.1.2 Modelación no lineal de materiales para elementos “shell layered”	29
4.2 MODELO MURO RECTANGULAR	30
4.3 ESTUDIO DE LA RELACIÓN DE ASPECTO	33
4.4 MODELO EN FORMA L	35
4.5 MODELO EN U	37
4.6 MODELO SISTEMA DUAL (2D)	39
5. CONCLUSIONES	42
CITAS	44
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	56

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Curva de capacidad de una edificación .....	15
Figura 2. Relación de aspecto y modo de falla de muros estructurales .....	20
Figura 3. Modelo de muros con columna ancha equivalente .....	22
Figura 4. Modelo de muros con celosías .....	23
Figura 5. Modelación MVELM.....	24
Figura 6. Modelación de muros con elementos finitos de láminas.....	25
Figura 7. Elemento multicapa (“shell multi-layered”).....	26
Figura 8. Curvas de resistencia confinada y no confinada del concreto según modelo de Mander.....	28
Figura 9. Modelo de curva completa para el acero .....	28
Figura 10. Modelo de Hognestad modificad. ....	29
Figura 11. Modelo trilineal para el acero.....	30
Figura 12. Sección transversal RW2 [12].....	31
Figura 13. Comparación de curvas de capacidad muro rectangular RW2.....	32
Figura 14. Modelo de Mander confinado y no confinado para el muro RW2 .....	33
Figura 15. Comparación de resultados de “shell layered” con los de MVELM para distintas relaciones de aspecto .....	34
Figura 16. Comparación de resultados de elementos tipo “frame” con los de MVELM para distintas relaciones de aspecto .....	34
Figura 17. Sección transversal DL2 .....	35
Figura 18. Comparación de curvas de capacidad muro en L.....	36
Figura 19. Sección transversal muro en U [4].....	37
Figura 20. Comparación de curvas de capacidad muro en U con carga en X .....	38
Figura 21. Comparación de curvas de capacidad muro en U con carga en Y .....	38
Figura 22. Modelo sistema dual (2D) .....	40
Figura 23. Comparación de curvas de capacidad sistema Dual (2D) .....	40

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. MODELACIÓN DE MUROS CON ELEMENTOS “FRAME” .....	56
ANEXO B. MODELACIÓN DE MUROS CON ELEMENTOS “SHELL LAYERED.”	69

## RESUMEN

- Título:** “ANÁLISIS PUSHOVER EN MUROS DE CORTE: ESTADO DEL ARTE Y APLICACIÓN”<sup>\*</sup>
- Autor:** DIEGO ANDRÉS GARCÍA MURCIA<sup>\*\*</sup>
- Palabras Claves:** Análisis Pushover, Muros de Corte, Elementos Frame, Elementos Shell, Curva de Capacidad.

Los muros estructurales de concreto reforzado, también conocidos como “muros de corte”, debido a su alta rigidez y resistencia ante cargas laterales, son ampliamente utilizados en construcciones de mediana y gran altura, especialmente en zonas de alto riesgo sísmico, donde las edificaciones presentan un importante grado de comportamiento no lineal, originado principalmente por la fisuración y plastificación del hormigón y del acero de refuerzo. Por esta razón, es importante el estudio y la aplicación de técnicas que permitan evaluar el desempeño de estos elementos estructurales cuando incursionan en el régimen inelástico. En este sentido, el análisis estático no lineal (AENL), conocido como (“push-over”), aparece como una herramienta atractiva en comparación con otras técnicas de mayor complejidad como el análisis dinámico no lineal.

Con base en lo anterior, en este trabajo se realiza un estudio acerca del “push-over” y su aplicación en el análisis no lineal de muros de concreto reforzado. Inicialmente, se proporciona una revisión sobre el estado actual del conocimiento, se describe el desarrollo de esta técnica de análisis no lineal, sus alcances y limitaciones. Además, dada la importancia de una modelación precisa cuando se quiere evaluar el desempeño de estos elementos estructurales, se resumen algunas técnicas de modelación de muros clasificadas como macro-modelos y micro-modelos. Finalmente, con el uso del software SAP2000, es llevado a cabo análisis “push-over” en algunos modelos simplificados teniendo en cuenta dos técnicas: modelación de muros mediante la combinación de elementos tipo barra (“Frame element”) con asignación de rotulas plásticas y, modelación de muros con elementos multi-capas (“Multi-layer shell element”). Los resultados de los modelos matemáticos, son comparados con evidencias experimentales y numéricas registradas en la literatura. Para concluir, se discute sobre las ventajas y desventajas de ambas técnicas de modelación.

---

<sup>\*</sup> Proyecto de Grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero, Ingeniero Civil, M.Sc.

## ABSTRACT

**Title:** "PUSHOVER ANALYSIS IN SHEAR WALLS: STATE OF THE ART AND APPLICATION"\*

**Author:** DIEGO ANDRÉS GARCÍA MURCIA\*\*

**Keywords:** Pushover analysis, Shear walls, Frame elements, Shell elements, Capacity curve.

The reinforced concrete (RC) structural walls, also known as "shear walls", due to its high rigidity and resistance to lateral loads are widely used in construction of medium and high elevation, especially in areas of high seismic risk, where buildings have a significant degree of non-linear behavior, mainly due to cracking and plasticization of concrete and reinforcing steel. For this reason, the study and application of techniques for evaluating the performance of these structural elements is important when these dabble into inelastic range. In this regard, the nonlinear static analysis (AENL), known as ("push-over"), appears as an attractive tool compared to other techniques more complex such as nonlinear dynamic analysis.

Based on the above, in this paper a study of the "push-over" and its application in nonlinear analysis of reinforced concrete walls is performed. Initially, a review of the current state of knowledge is provided, the development of this technique of nonlinear analysis, its scope and limitations are described. Moreover, given the importance of accurate modeling when assessing the performance of these structural elements is necessary, some walls modeling techniques classified as macro-models and micro-models are summarized. Finally, with the use of software SAP2000, is carried out static analysis "push-over" in some simplified models considering two techniques: wall modeling by the combination of "frame elements" with allocation of plastic hinges and wall modeling with "multi-layer Shell elements". The results of mathematical models are compared with experimental and numerical evidence reported in the literature. To conclude, the advantages and disadvantages of both modeling techniques are discussed.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical Engineering – Mechanical. School of Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero, Civil Engineer, M.Sc.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la ingeniería estructural ha confrontado la necesidad de desarrollar, conocer y comprender métodos que permitan analizar el comportamiento sísmico de las edificaciones, cuando estas incursionan más allá del rango lineal-elástico. En este sentido, gracias a las nuevas tendencias del diseño por desempeño, se han realizado investigaciones sobre elementos estructurales reales, aplicando cargas laterales con el fin de observar la secuencia de plastificación de los materiales [1] [2] [3] [4]. Estos experimentos, han permitido sustentar técnicas como el análisis estático no lineal (AENL) conocido como “pushover”, que basado en conceptos de capacidad y demanda, aparece como una alternativa confiable en la verificación de la seguridad ante una acción sísmica, frente a otros procedimientos de cálculo más complejos, como el análisis de respuesta no lineal contra el tiempo [5].

Por otra parte, en las normas de diseño se estipulan variedad de sistemas estructurales, para los cuales aspectos como la rigidez, la resistencia y la ductilidad, son determinantes en su capacidad de disipación de energía y respuesta sísmica [6]. Algunos de estos sistemas son estructurados con base en muros de hormigón, y se han convertido en una alternativa confiable, especialmente en regiones de alta sismicidad, donde las edificaciones pueden ser sometidas a eventos fuertes; siendo así importante, el estudio y la aplicación de técnicas que permitan evaluar de manera rápida y eficiente, la respuesta no lineal de estos elementos estructurales.

Cabe resaltar, que para realizar un análisis estático no lineal de un sistema estructural, es primordial un modelamiento preciso de los elementos y de las propiedades de los materiales. De esta manera, surge el interrogante sobre cuál debe ser el método de modelación más adecuado al realizar un análisis

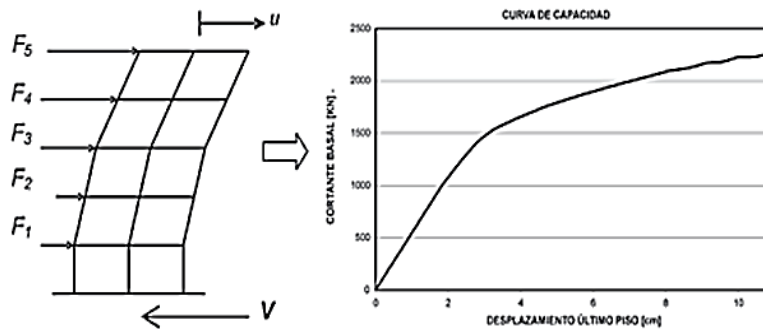
“pushover” en muros de hormigón, dado que en la literatura se encuentran disponibles distintas técnicas que han sido propuestas y desarrolladas por diferentes investigadores [7] [8] [9] [10].

Con base en lo anterior, a continuación se realiza un estudio acerca del análisis “pushover” y su aplicación en la evaluación del desempeño de muros estructurales de concreto reforzado. En el capítulo 1, se presenta una revisión del estado actual del conocimiento respecto al desarrollo y alcance de la técnica de análisis estático no lineal (AENL). En el capítulo 2, se describen algunas características del comportamiento y desempeño de los muros estructurales. En el capítulo 3, se estudian algunas técnicas de modelación de muros de corte que han sido clasificadas por algunos autores como: macro-modelos y micro-modelos. En el Capítulo 4, con el uso del software SAP2000, se ejecuta análisis “pushover” en algunos ejemplares simplificados: muros de concreto con sección rectangular, sección en “L”, sección en “U”, y un sistema “Dual en 2D”, que han sido desarrollados por algunos investigadores [2] [3] [4] [11] [12]. Para esto, dos tipos de modelación son aplicadas en el presente trabajo: modelación de muros estructurales mediante la combinación de elementos frame, con asignación de rotulas plásticas, y modelación de muros estructurales con elementos multicapas, conocidos como “Shell multi-layered” [13]. Con los resultados obtenidos, se realiza un estudio comparativo basado en la capacidad de las dos técnicas de modelación para representar respuestas experimentales y numéricas de estos modelos disponibles en la literatura, lo que dará pasó a la etapa final, donde se discute sobre las ventajas y desventajas de ambos tipos de modelación.

## 1. ANÁLISIS PUSHOVER

El análisis estático no lineal (AENL), es conocido en la literatura como “pushover”, o método de “plastificación progresiva”. En términos generales, un análisis “pushover”, consiste en someter a fuerzas laterales incrementales una edificación y caracterizar su comportamiento mediante una gráfica llamada “curva de capacidad”, como la presentada en la **Figura 1**. Las ordenadas de esta gráfica, representan los esfuerzos de interacción entre la estructura y el suelo (cortante basal), y las abscisas, los desplazamientos en la planta superior de la estructura [14] [15].

**Figura 1.** Curva de capacidad de una edificación



**Fuente:** Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal<sup>[5]</sup>.

A través de un método simplificado, la curva de capacidad permite encontrar un punto denominado “desplazamiento objetivo”, el cual se puede asociar al efecto que produce un sismo sobre la estructura cuando se quiere evaluar su nivel de desempeño más allá del rango lineal [16].

<sup>[5]</sup> MORA, Mauricio Alexander; VILLALBA, Jesús Daniel; MALDONADO, Esperanza. Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. *En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín* [en línea]. Julio-Diciembre, 2006 [Citado el 5 de junio de 2015], vol. 5, no 9, p. 59-74. Disponible en: <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/234/221>

No obstante, aunque para la aplicación de este método se pueden encontrar algunas limitaciones [5], su desarrollo ha tenido una gran aceptación y ha sido sugerido por algunas normativas importantes como el FEMA 273, FEMA 356, ATC 40 y ASCE/SEI 41-13 [17] [18] [19] [20].

## **1.1 DESARROLLO DEL ANALISIS PUSHOVER**

Los primeros estudios sobre análisis no lineal estático surgieron en los años 70, sin embargo ha cobrado una mayor importancia en los últimos años, gracias al avance de software de diseño y de la tendencia por el análisis y diseño de estructuras por desempeño.

En [1], se propone el primer método para evaluar el desempeño ante una acción sísmica a través de análisis estáticos no lineales. Se realizaron pruebas dinámicas sobre marcos de hormigón armado e ilustraron los efectos sobre la respuesta dinámica de los cambios de rigidez y la capacidad de disipación de energía, señalando que estas son dos características básicas de las estructuras, ya que desempeñan un papel importante en la determinación de la respuesta ante movimientos fuertes de tierra. Los autores proponen un método simplificado para la estimación del cortante en la base de diseño teniendo en cuenta la respuesta inelástica. Para esto, se relaciona el comportamiento de la estructura con un sistema equivalente de un grado de libertad, se obtiene la curva de capacidad del sistema equivalente utilizando un programa de elementos finitos o un método numérico, con el fin de obtener la variación de la rigidez después del rango elástico.

**1.1.1 Limitaciones y alcances del análisis “pushover”.** Cuando se efectúa un análisis estático no lineal “Pushover”, el efecto del sismo en la edificación se modela como un evento estático, el cual solo tiene en cuenta el aporte del primer modo de vibración de la estructura; algunos autores señalan que esta es una de

las principales limitaciones, ya que el método no arroja resultados precisos cuando los modos más elevados de la estructura tienen una mayor importancia en su respuesta dinámica [21].

En [22], se presenta una discusión detallada sobre el campo de aplicación del análisis pushover para estimar la seguridad ante demandas dinámicas impuestas por sismos y la precisión que se espera para diferentes tipos de estructuras. En ese trabajo fueron estudiadas cuatro estructuras de acero con alturas variables entre los 2 y 15 metros. A través de la comparación de los resultados obtenidos con el análisis pushover y los obtenidos de análisis dinámicos no lineales, se concluyó que con el aumento de la altura del edificio en estudio, los modos de vibración más elevados cobran una mayor importancia en la respuesta dinámica, demostrando que los resultados obtenidos con el primer modo son poco precisos.

En [23], se comparó las respuestas de edificios con 3, 6 y 9 pisos sometiendo a análisis pushover que pretendían simular sismos tanto de reglamentos como reales. En este trabajo se concluye que los análisis estáticos no lineales pueden estimar con precisión los desplazamientos relativos entre pisos e identificar mecanismos de colapso así como las regiones críticas. El estudio fue limitado por cargas triangulares y fue resaltada la importancia de la determinación de un desplazamiento objetivo de la estructura.

Con el fin de evitar la limitación del análisis pushover por no considerar los modos de vibración más elevados, fue propuesto inicialmente en [24] y [25] el “pushover multimodal” MMP (“Multi-mode Pushover Procedure”). Del método se deriva el MPA (Modal Pushover Analysis) [26] [27] [28], el cual consiste en la aplicación de distribuciones de carga en función de los modos de vibración de la estructura en estudio, obteniendo para cada modo una respuesta de la estructura. Los autores efectuaron análisis con MPA y realizaron comparaciones de los resultados con

análisis dinámicos; se concluyó que el MPA es capaz de estimar de forma eficaz los desplazamientos en distintos puntos de la estructura.

En [29], son presentados los errores más comunes que se cometen durante un análisis Pushover. En este trabajo, los autores abordan el problema del vector de cargas, el efecto carga-desplazamiento y la carga gravitacional, el comportamiento estructural después que el sistema alcanza la última carga y el mecanismo de rotura debido al corte. En relación al comportamiento después de la rotura, es resaltado el hecho de que muchos programas de elementos finitos no tienen la potencialidad de describir correctamente el comportamiento después de la rotura de los primeros elementos estructurales, siendo necesario, tener bastante cuidado en la interpretación de los resultados obtenidos con el uso de software de análisis y diseño. De esta limitación, surgen las primeras propuestas [30] [31] [32] con el uso de métodos adaptativos, en el que las cargas aplicadas varían en cada paso de carga durante el análisis pushover.

Otra de las limitaciones que se conoce del pushover, es el hecho de no considerar la variación de la rigidez de la estructura bajo el efecto de una carga cíclica, como realmente ocurre bajo la acción de un sismo. Si la rigidez estructural se degrada a lo largo del tiempo, son alteradas las características modales de la edificación, y como consecuencia de ello ocurre un aumento del periodo.

Por otra parte, algunos críticos han señalado que es inapropiado emular el comportamiento de una estructura bajo una acción sísmica, a través de fuerzas actuantes y de desplazamientos que no varían en función del tiempo [14].

Hoy en día, el análisis pushover, puede en ciertos casos, ser una alternativa viable de los análisis dinámicos no lineales, en lo que se refiere a la verificación de seguridad ante una acción sísmica. Sin embargo, es necesario tener siempre en cuenta las limitaciones del método.

## 2. MUROS ESTRUCTURALES DE CONCRETO REFORZADO

Los sistemas estructurales que emplean muros de concreto estructural para la resistencia ante fuerzas laterales, han demostrado tener una mejor respuesta sísmica que los sistemas basados en pórticos [33]. Algunas evidencias al respecto, se pueden encontrar en observaciones post-sísmicas de edificios expuestos al terremoto de Chile en marzo de 1985 y el de Armenia en diciembre de 1988 [34].

Se puede resaltar principalmente, la habilidad de estos elementos para satisfacer requisitos de rigidez, resistencia y seguridad, los cuales son parámetros que contribuyen a un desempeño exitoso [35]. Esto ha convertido a estos sistemas estructurales en una alternativa confiable dentro de la ingeniería estructural, especialmente en regiones de alta sismicidad, donde los muros estructurales son ampliamente utilizados en construcciones de mediana y gran altura.

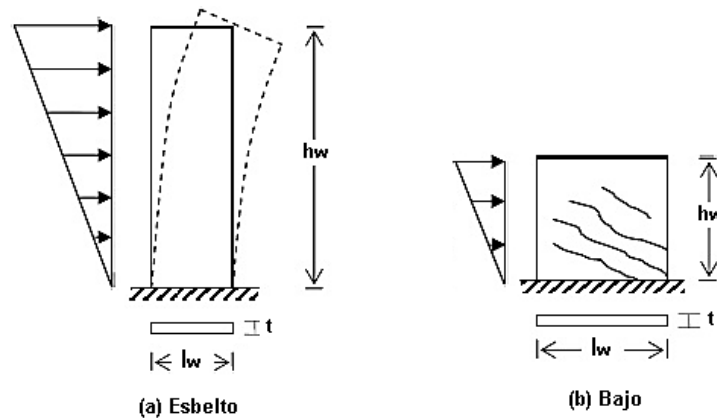
Dado lo anterior, una edificación con muros estructurales, puede ser sometida a eventos sísmicos fuertes y la estructura podría incursionar más allá del límite elástico. Por lo tanto, para lograr un buen desempeño estructural, es importante analizar la relación no lineal entre la fuerza de corte lateral y los desplazamientos. En este proceso, un modelado adecuado de los elementos estructurales, cobra una vital importancia.

### 2.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS

El comportamiento de los muros estructurales ante fuerzas horizontales está principalmente relacionado con su relación de aspecto (relación  $h_w/l_w$ ), y de otras variables como la cantidad de refuerzo y secuencia de aplicación de cargas [36]. De acuerdo a su relación de aspecto, estos elementos se clasifican en muros esbeltos ( $h_w/l_w > 1.5$ ), para los cuales su comportamiento es gobernado por

flexión, y muros bajos ( $hw/lw < 1.5$ ), donde su comportamiento es gobernado por cortante [18], ver **Figura 2**. No obstante, es preferible que el comportamiento estructural de los muros sea dominado por flexión, obteniendo así un tipo de falla dúctil, ocurriendo primero una plastificación del acero de refuerzo, antes que un aplastamiento del concreto, de esta manera se evitará una falla frágil, la cual es producida cuando el comportamiento estructural es dominado por cortante.

**Figura 2.** Relación de aspecto y modo de falla de muros estructurales



Fuente: Análisis y diseño sísmico por desempeño de edificios con muros estructurales<sup>[37]</sup>.

<sup>[37]</sup> MONSALVE DÁVILA, Jazmin T. and RAMÍREZ BOSCÁN, Orlando. Análisis y diseño sísmico por desempeño de edificios con muros estructurales [en línea], Tesis de Maestría. Universidad de los Andes, 2005 [citado 20 de julio de 2015]. Disponible en: [http://www.academia.edu/2010497/An%C3%A1lisis\\_y\\_dise%C3%B1o\\_s%C3%ADsmico\\_por\\_desempe%C3%B1o\\_de\\_edificios\\_de\\_muros\\_estructurales](http://www.academia.edu/2010497/An%C3%A1lisis_y_dise%C3%B1o_s%C3%ADsmico_por_desempe%C3%B1o_de_edificios_de_muros_estructurales)

### 3. TÉCNICAS DE MODELACIÓN DE MUROS ESTRUCTURALES DE CONCRETO ARMADO

En la ingeniería estructural, se ha desarrollado la modelación numérica de muros estructurales principalmente a través de dos grupos: macro-modelos y micro-modelos [38]. A continuación se realiza una breve descripción de cada tipo de simulación numérica que se encuentra dentro de esta clasificación.

#### 3.1 MACRO-MODELOS

Los macro-modelos en el análisis y diseño de muros, están encaminados a modelar el comportamiento de la sección transversal del muro a cierta altura. Estos tipos de simulación numérica, son utilizados para determinar el comportamiento estructural de los elementos de una forma rápida y eficiente. Permiten considerar las relaciones constituyentes de los materiales tales como el concreto y el acero, así como los efectos de interacción entre ambos [38]. Los procedimientos macro-modelos disponibles en la literatura son:

**3.1.1 Modelos con elementos tipo barra (“frame element”).** La modelación de muros estructurales, utilizando elementos frame, se basa en el “método de la columna ancha”. Un elemento se denomina columna ancha cuando es analizado bajo efectos tanto de flexión como de cortante y se distingue de las columnas normales en donde se evalúan principalmente las deformaciones por flexión. De esta manera, los muros estructurales, son idealizados en el modelo analítico como columnas anchas equivalentes ubicadas en el centroide del muro y además, se consideran las zonas internas del muro (vigas interiores) como brazos rígidos los cuales permiten adecuar las conexiones con vigas o elementos de losa, ver **Figura 3** [39].

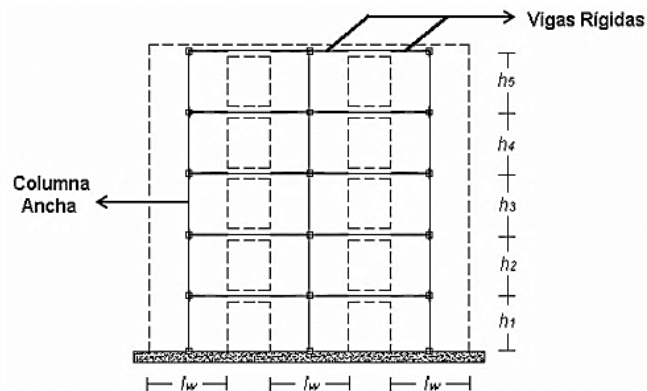
**3.1.2 Análisis no lineal de muros de corte modelados con elementos frame.**

Es posible modelar la respuesta inelástica debida a flexión y cortante,

incorporando la interacción conjunta de la resistencia a fuerza axial y flexión del elemento [18]. De esta manera, las características no lineales del muro son modeladas considerando rótulas plásticas en los elementos frame. Estas pueden estar ubicadas en las zonas plásticas en los extremos del elemento o distribuidas en su longitud [7] [13].

El FEMA356 [17] propone propiedades y criterios de aceptabilidad para estas rótulas plásticas en términos de momento-rotación bilineal para muros dominados por flexión, y deriva para muros dominados por cortante.

**Figura 3.** Modelo de muros con columna ancha equivalente



**Fuente:** Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú<sup>[38]</sup>.

**3.1.3 Modelo de Celosías.** En este macro-modelo, los muros son modelados con dos elementos verticales y elementos en diagonal que se conectan mediante

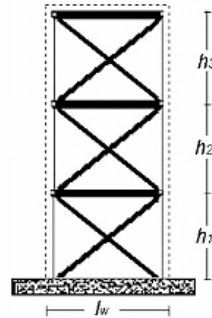
<sup>[38]</sup> FERNÁNDEZ, Helbert Fredy González; FREDY, Helbert; LÓPEZ ALMANSA, Francisco. Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú [en línea], Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 2011 [citado 20 de julio de 2015].

Disponible en:

[https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjACahUKEwjD3oHu6b\\_HAhVC7R4KHS2HDKk&url=http%3A%2F%2Ftesis.pucp.edu.pe%2Frepositorio%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F169%2FDELGADO\\_RAUL\\_EDIFICIOS\\_PERUANOS\\_MUROS.pdf%3Fsequence%3D1&ei=8Q\\_aVYOiBcLae62OssqK&usg=AFQjCNF1ue7HITsfZjsMJ-Wm4zyz7KPSdQ](https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjACahUKEwjD3oHu6b_HAhVC7R4KHS2HDKk&url=http%3A%2F%2Ftesis.pucp.edu.pe%2Frepositorio%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F169%2FDELGADO_RAUL_EDIFICIOS_PERUANOS_MUROS.pdf%3Fsequence%3D1&ei=8Q_aVYOiBcLae62OssqK&usg=AFQjCNF1ue7HITsfZjsMJ-Wm4zyz7KPSdQ)

una viga horizontal rígida. El comportamiento del concreto es representado mediante un elemento diagonal (biela a compresión), cuando se aplica una carga lateral en la parte superior del muro, y la inversión de la fuerza es soportada por el otro elemento en dirección diagonal opuesta.

**Figura 4.** Modelo de muros con celosías



**Fuente:** Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú<sup>[38]</sup>.

En algunas investigaciones [40] [8], se ha señalado que debido a su modelamiento numérico, esta técnica parece estar limitada a muros bajos, donde realmente se desarrolla la biela a compresión, especialmente para casos de cargas laterales incrementales estáticas (pushover) y para pequeñas cargas gravitacionales.

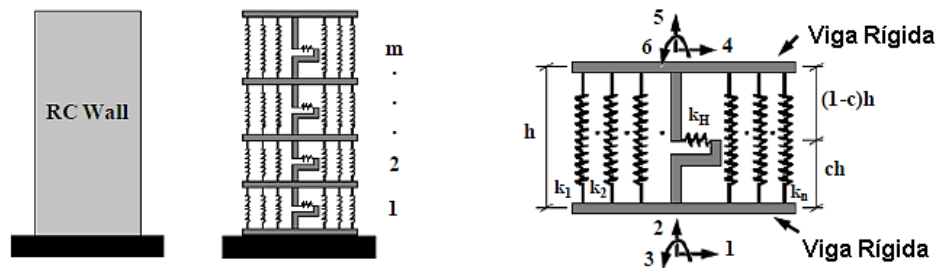
**3.1.4 Modelos de muelles múltiples.** El modelo analítico de los muelles múltiples es conocido en lengua inglesa como “Multiple Vertical Line Element Model” (MVLEM). La primera propuesta de este tipo de macro modelo se puede encontrar en [41], donde fue utilizado para representar el comportamiento no lineal de una estructura de 7 niveles evaluada experimentalmente [41], obteniendo resultados muy precisos. A partir de esto, distintos autores han desarrollado este tipo de modelación entre los que se resaltan principalmente [42] [43] [44].

---

<sup>[38]</sup> FERNÁNDEZ, Helbert Fredy González; FREDY, Helbert; LÓPEZ ALMANSA, Francisco. Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú [en línea], Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 2011 [citado 20 de julio de 2015].

En el método la respuesta inelástica axial y a flexión del muro estructural es modelada con un número de elementos verticales (muelles), los cuales se encuentran conectados a través de vigas rígidas y la respuesta a cortante es modelada con un muelle horizontal. Por último, un elemento rígido de longitud  $ch$ , ver **Figura 5**, caracteriza la deformación del miembro de pared bajo diferentes distribuciones de curvaturas. De esta manera, el método ofrece la posibilidad de simular adecuadamente el comportamiento no lineal de muros estructurales; permite capturar el desplazamiento del eje neutro, incorporar distintos modelos de histéresis de materiales, confinamiento y determinar deformaciones a flexión y a cortante.

**Figura 5.** Modelación MVELM



Fuente: Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls<sup>[12]</sup>.

### 3.2 MICRO-MODELOS

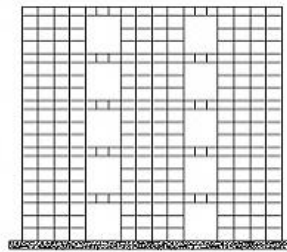
Los micro-modelos han sido desarrollados bajo los principios de la mecánica de sólidos, tomando como base la modelación de las relaciones constitutivas de los materiales y su implementación en elementos continuos [38]. En la aplicación a muros estructurales de este grupo de métodos se resalta principalmente la modelación con elementos finitos tipo lámina (“shell”).

<sup>[12]</sup> MAGNA, C. E.; KUNNATH, S. K. Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls. In: 15th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Lisboa, 2012 [cited 14 June 2015]. Disponible en: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_2529.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2529.pdf)

**3.2.1 Modelación de muros estructurales con elementos “shell”.** Los elementos “shell” pueden ser usados para representar eficientemente el comportamiento lineal y no lineal de muros estructurales. En este método, el muro es dividido en elementos más pequeños, con un número y tamaño finito, ver Figura 6.

Un factor importante para el análisis, es definir el número de elementos que se utilizará en el modelado de muros estructurales, ya que con una malla más fina es probable obtener mejores resultados, pero el costo computacional que se requiere será más alto.

**Figura 6.** Modelación de muros con elementos finitos de láminas.



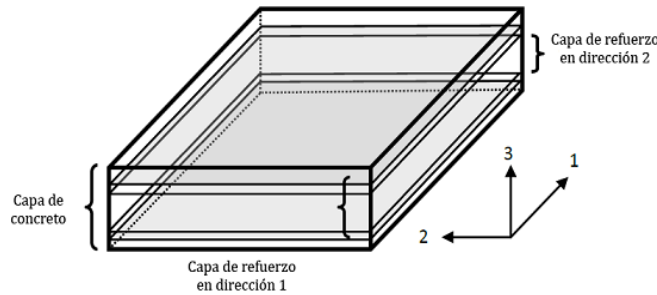
**Fuente:** Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú<sup>[38]</sup>.

**3.2.2 Análisis no lineal de muros estructurales con elementos lámina multicapa (“shell multi-layered”).** El elemento shell es modelado con varias capas con espesores diferentes. Esta tipo de modelación (multi-layer shell), se basa en los principios mecánicos de un material compuesto, simulando el acoplamiento de planos internos y planos externos. En éste método son aplicadas las propiedades mecánicas, tanto al concreto, como a las barras de refuerzo, las cuales son convertidas en capas, ver **Figura 7** [45].

---

<sup>[38]</sup> FERNÁNDEZ, Helbert Fredy González; FREDY, Helbert; LÓPEZ ALMANSA, Francisco. Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú [en línea], Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 2011 [citado 20 de julio de 2015].

**Figura 7.** Elemento multicapa (“shell multi-layered”)



**Fuente:** Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings with shear walls<sup>[45]</sup>.

El método considera el muro como una serie de capas que representan los distintos materiales de los cuales se compone, con diferente espesor y propiedades mecánicas [10] simulando el comportamiento no lineal a flexión dentro y fuera del plano, y a cortante y flexión dentro del plano [46]. Mediante el cálculo de elementos finitos, se obtiene la deformación axial y la curvatura de la capa interna media, y asumiendo que el plano se mantiene como plano, se calculan las deformaciones y curvaturas de las demás capas y por último el esfuerzo correspondiente a través de relaciones constitutivas del material asignado a cada capa. Algunos estudios han mostrado que este método presenta resultados bastante similares al método de la columna ancha con rótulas plásticas bilineales especialmente para desplazamientos pequeños [45].

Para el diseño basado en el desempeño, la recomendación del FEMA 356 define el criterio desempeño para los elementos de concreto reforzado en términos de rotaciones plásticas. Por lo tanto es necesario un mayor desarrollo de este modelo. En el caso del comportamiento del muro o segmento de muro sea gobernado por corte, la relación de deriva por corte puede ser utilizado como se define en el ATC 40.

<sup>[45]</sup> FAHJAN, Y. M.; KUBIN, J.; TAN, M. T. Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings with shear walls. In: 14th conference in Earthquake Engineering [online], 2010 [cited 20 July 2015]. Disponible en: [http://www.protasoftware.com/files/publications/Nonlinear\\_Analysis\\_Methods\\_for\\_Reinforced\\_Concrete\\_Buildings\\_with\\_Shearwalls.pdf](http://www.protasoftware.com/files/publications/Nonlinear_Analysis_Methods_for_Reinforced_Concrete_Buildings_with_Shearwalls.pdf)

## 4 MÓDELOS NUMÉRICOS

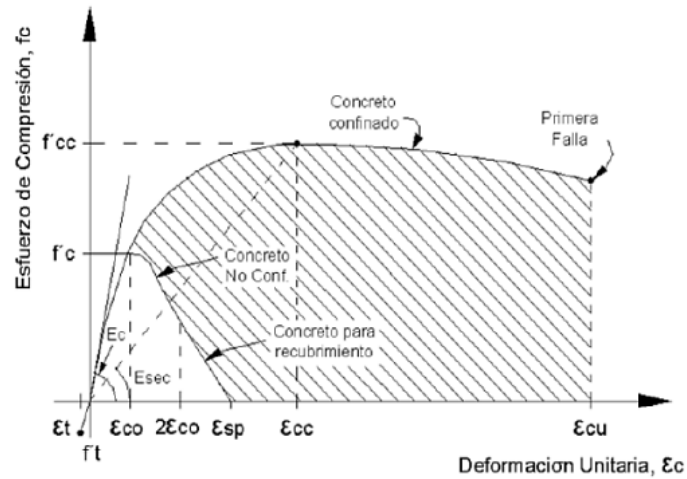
En este aparte, con el uso del software SAP2000 (CSI 2009), se efectúa la aplicación de análisis pushover a diferentes modelos de muros estructurales que han sido desarrollados de manera experimental y numérica por algunos investigadores. Se obtiene así la curva de capacidad de cada modelo, con las técnicas de modelación que se estudian en el presente trabajo: modelación no lineal de muros estructurales con elementos “frame” y modelación no lineal de muros estructurales con elementos “shell layered”. Los resultados obtenidos son comparados con otras investigaciones sobre los modelos desarrollados.

### 4.1 PARÁMETROS GENERALES DE MODELACIÓN

**4.1.1 Modelación no lineal de los materiales para elementos tipo “frame”.** En la modelación con elementos “frame” son definidas automáticamente desde el software rótulas plásticas en los extremos de los elementos de acuerdo a los parámetros del FEMA356 [18], ver Anexo A.

Es importante señalar que la disposición de un adecuado refuerzo transversal, en zonas donde potencialmente se puede formar rótulas plásticas, permite generar un comportamiento dúctil de los elementos y de esta manera asegurar que un movimiento sísmico no cause colapso. Por esta razón, el modelo de Mander, ver **Figura 8**, es el más empleado en el análisis sísmico de edificaciones y es el que se usa en el presente trabajo para la definición del concreto de los elementos tipo “frame”.

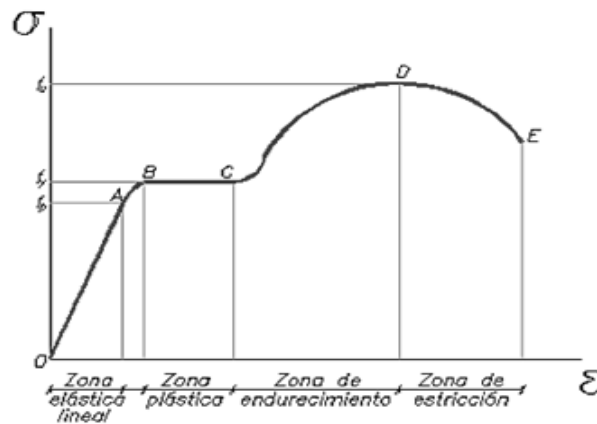
**Figura 8.** Curvas de resistencia confinada y no confinada del concreto según modelo de Mander.



**Fuente:** Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings<sup>[6]</sup>.

Para el acero fue seleccionado un modelo de curva completa, como se muestra en la **Figura 9**, en el cual se definen tres puntos A, C y E que representan, el inicio de la fluencia, el endurecimiento y la ruptura, respectivamente.

**Figura 9.** Modelo de curva completa para el acero



**Fuente:** Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings<sup>[6]</sup>.

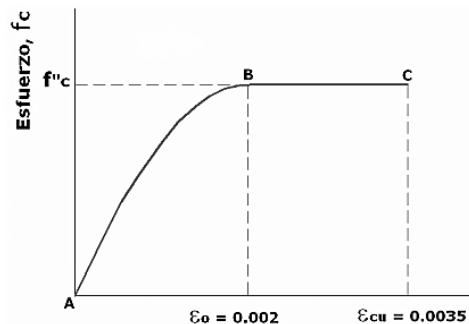
<sup>[6]</sup> PAULAY, Thomas; PRIESTLY, M. J. N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York: Wiley Interscience. 1992. 744p.

**4.1.2 Modelación no lineal de materiales para elementos “shell layered”.** En la modelación con elementos “shell layered”, fueron definidas las propiedades no lineales de los materiales en cada capa del material compuesto, ver Anexo B, de acuerdo a las propiedades del concreto y a la configuración del refuerzo en cada modelo analizado.

Por otra parte, en el desarrollo del presente trabajo, para los elementos “shell” hubo la necesidad de establecer un comportamiento diferente para los materiales del acero y del concreto, dado que otros modelos, generaron inestabilidad numérica en el programa imposibilitando la convergencia del mismo.

Para el concreto de los elementos “shell layered” se utiliza el modelo de concreto de Hognestad modificado, ver **Figura 10**, en el cual se describe una parábola al inicio de la curva hasta llegar al máximo esfuerzo  $f'_c$ , seguida por un tramo horizontal.

**Figura 10.** Modelo de Hognestad modificado.

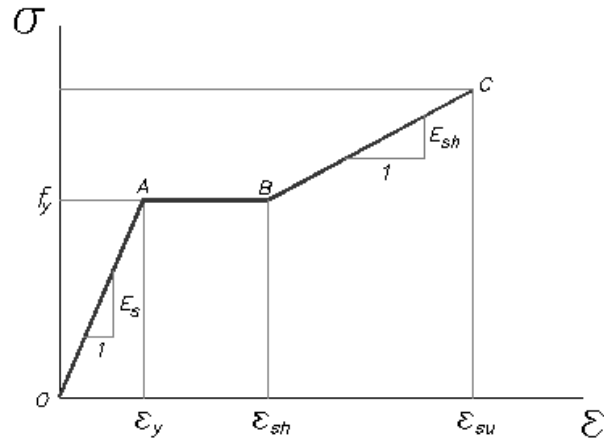


**Fuente:** Concrete stress distribution in ultimate strength design<sup>[47]</sup>

En la **Figura 11** se observa el modelo trilineal elasto-plástico con endurecimiento seleccionado para representar el comportamiento no lineal del material del acero de refuerzo.

<sup>[47]</sup> HOGNESTAD, Eivind; HANSON, Norman W.; MCHENRY, Douglas. Concrete stress distribution in ultimate strength design. En *ACI Journal Proceedings*. ACI, 1955.

**Figura 11.** Modelo trilineal para el acero.



**Fuente:** Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings<sup>[6]</sup>.

## 4.2 MODELO MURO RECTANGULAR

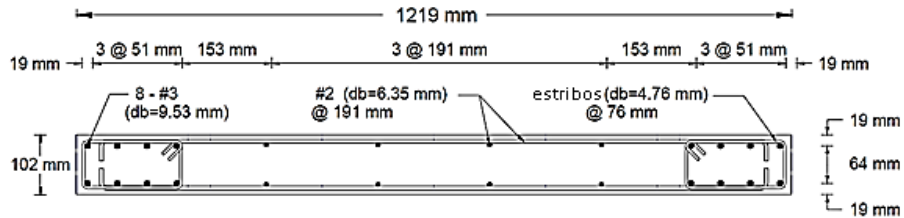
A continuación, se presenta el estudio del comportamiento no lineal de un muro rectangular de hormigón armado (RW2), investigado experimentalmente por [48]. El RW2 representa un muro esbelto ( $h_w/l_w > 2$ ), con comportamiento de muro en voladizo y con una carga axial aproximada de  $0,07Agf'_c$ . El muro tiene 3,66 m de altura y 0,102 m de espesor, con un ancho de 1,22 m. El esfuerzo a compresión del concreto ( $f'_c$ ) es de 27.5 Mpa, y el acero de refuerzo longitudinal y transversal es de Grado 60 ( $f_y = 414$  MPa).

La sección transversal del muro es presenta en la **Figura 12**. Los desplazamientos fueron obtenidos en el laboratorio al aplicar una carga paralela al plano de rigidez en el punto más alto del muro usando un actuador hidráulico [48]. El muro RW2 también fue estudiado por [12], donde los autores realizan análisis no lineal estático mediante la modelación numérica con el macro-modelo “Multiple Vertical Line Element Model” (MVLEM).

---

<sup>[6]</sup> PAULAY, Thomas; PRIESTLY, M. J. N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York: Wiley Interscience. 1992. 744p.

**Figura 12.** Sección transversal RW2 [12]



**Fuente:** Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls<sup>[12]</sup>.

Los modelos analíticos son desarrollados en SAP2000 de acuerdo a las siguientes consideraciones:

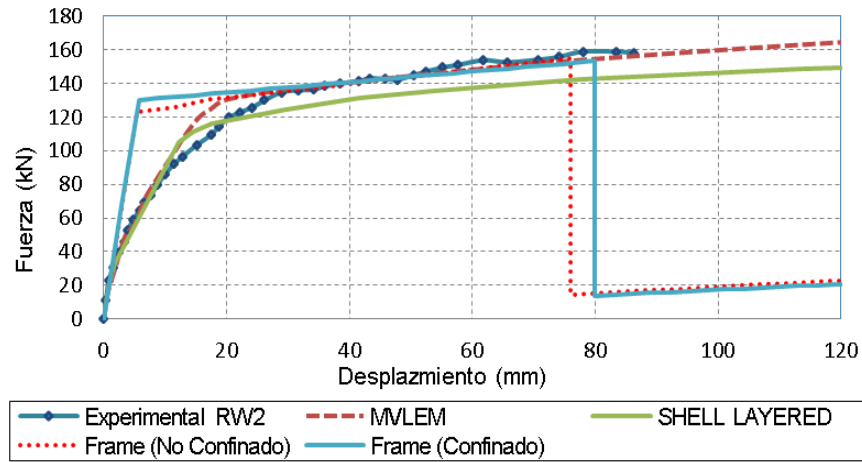
1. El muro RW2 es modelado con elementos “shell multi-layered”, ver Anexo B. Se aplica una carga axial de 240 kN y un patrón de carga pushover horizontal en dirección paralela al plano de rigidez en el top del muro. El refuerzo longitudinal y transversal es considerado en distintas capas, teniendo en cuenta las condiciones del confinamiento dadas en el modelo experimental, ver **Figura 12**.

2. El muro RW2 es modelado con elementos tipo “frame” asignando de rótulas plásticas P-M-M definidas de acuerdo al FEMA 356, ver Anexo A. Con el fin de analizar el incremento de ductilidad ofrecida por el confinamiento, se han considerado dos modelos para el concreto: un modelo de Mander no confinado asignando solo las distribución de barras para el refuerzo longitudinal, y un modelo de Mander confinado teniendo en cuenta la configuración del refuerzo transversal en cada sección del muro, ver **Figura 12**. Se aplica una carga axial de 240 kN y un patrón de carga pushover horizontal en dirección paralela al plano de rigidez en el top del muro.

Las curvas de capacidad correspondientes son representadas en la **Figura 13**.

<sup>[12]</sup> MAGNA, C. E.; KUNNATH, S. K. Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls. En 15th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Lisboa, 2012 [cited 14 june 2015]. Disponible en: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_2529.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2529.pdf)

**Figura 13.** Comparación de curvas de capacidad muro rectangular RW2

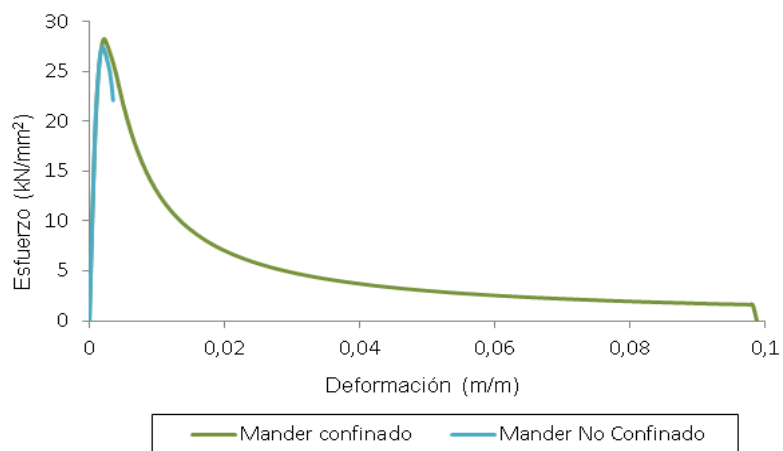


Es importante señalar que dada su relación de aspecto, la falla del modelo RW2 es controlada principalmente por flexión, lo que acompañado de un adecuado refuerzo, se traduce en una buena ductilidad. En la gráfica, este comportamiento es bien representado por los modelos numéricos a través de las curvas de capacidad obtenidas, dado el significativo recorrido en el rango inelástico que cada una de estas presenta.

Por otra parte, el modelo “shell layered” desestima aproximadamente en un 10% en promedio, la resistencia global a la carga lateral del muro después de los 20 mm de desplazamiento (top), los demás modelos capturan razonablemente esta respuesta, mientras que el modelo “frame” sobreestima considerablemente la rigidez inicial en el rango elástico. Después del punto de cedencia, todos los modelos numéricos captan una correcta rigidez respecto al modelo experimental. Además, es posible detallar que una de las principales ventajas de los elementos “frame”, es poder detectar fácilmente un punto de rotura. Sin embargo, aunque en primera instancia mediante la modelación con elementos tipo “shell”, no es posible obtener este parámetro a través de la curva de capacidad, algunos autores [49] señalan que se puede establecer algún criterio estudiando el progreso de plastificación de los materiales. Por último, se puede resaltar un leve aumento de

ductilidad producido por el confinamiento del concreto que ocurre en la modelación con elementos “frame”. Cabe aclarar que en el muro RW2 este efecto no es tan significativo dada la mínima cuantía de acero transversal suministrado en los elementos de borde. En la **Figura 14** se puede observar la curva esfuerzo-deformación para el concreto confinado y no confinado utilizado en el modelo de Mander.

**Figura 14.** Modelo de Mander confinado y no confinado para el muro RW2

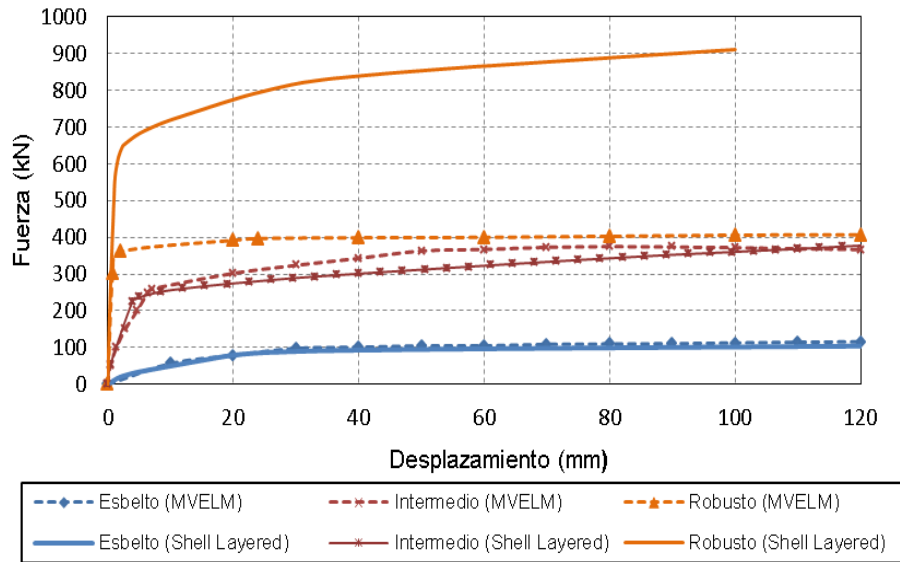


### 4.3 ESTUDIO DE LA RELACIÓN DE ASPECTO

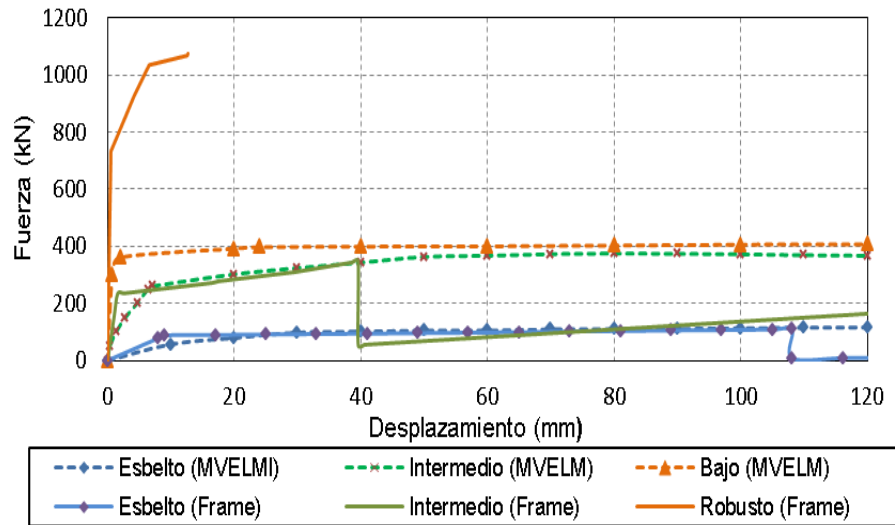
Con el fin de estudiar la precisión de la respuesta de cada técnica de modelación, cuando se aplica un análisis pushover, variando la relación de aspecto, se emplearon tres alturas diferentes del espécimen RW2 de [48], conservando las mismas características geométricas, de los materiales y condiciones de carga iniciales. Los resultados obtenidos son comparados con los de [12], donde los autores realizaron el mismo estudio a través del modelo numérico MVLEM, obteniendo muy buenas respuestas. Los tres modelos se clasifican de acuerdo a su relación de aspecto  $hw/lw$  (altura/ancho): muro esbelto para relación  $hw/lw > 2$ , muro bajo para  $hw/lw < 1$ , y muro intermedio para  $1 < hw/lw < 2$ . Las alturas seleccionadas son: 4,88 m, 1,83 m y 0,61 m los cuales producen relaciones de aspecto de 4.0; 1.5 y 0.5, respectivamente.

En la **Figura 15** y en la **Figura 16** se muestran las respuestas de los tres muros con diferentes relaciones de aspecto modelados con elementos Shell layered y elementos frame respectivamente. Las respuestas son comparadas con las obtenidas con el método MVLEM en [12].

**Figura 15.** Comparación de resultados de “shell layered” con los de MVLEM para distintas relaciones de aspecto



**Figura 16.** Comparación de resultados de elementos tipo “frame” con los de MVLEM para distintas relaciones de aspecto

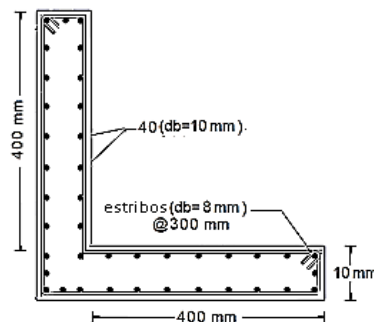


En los resultados obtenidos, se puede apreciar que para ambas técnicas de modelación frame y shell”, existe una pérdida de precisión al incorporar efectos por cortante, cuando la relación de aspecto de un muro disminuye. Ambas técnicas de modelación captan una buena respuesta en el muro esbelto y una respuesta aceptable en el muro intermedio, donde la flexión es el modo dominante. Sin embargo para el muro robusto, existe una gran sobreestimación de la rigidez y resistencia inicial respecto a los resultados obtenidos con el método MVELM.

#### 4.4 MODELO EN FORMA L

En este aparte, se presenta el estudio del comportamiento no lineal de un muro en concreto reforzado con sección transversal en L (DL2), ver **Figura 17**, investigado experimentalmente por [3]. En esta investigación, los autores evaluaron bajo carga cíclica 6 modelos con sección “L” a ½ de escala. Los parámetros analizados fueron relación de carga axial y relación altura espesor.

**Figura 17.** Sección transversal DL2



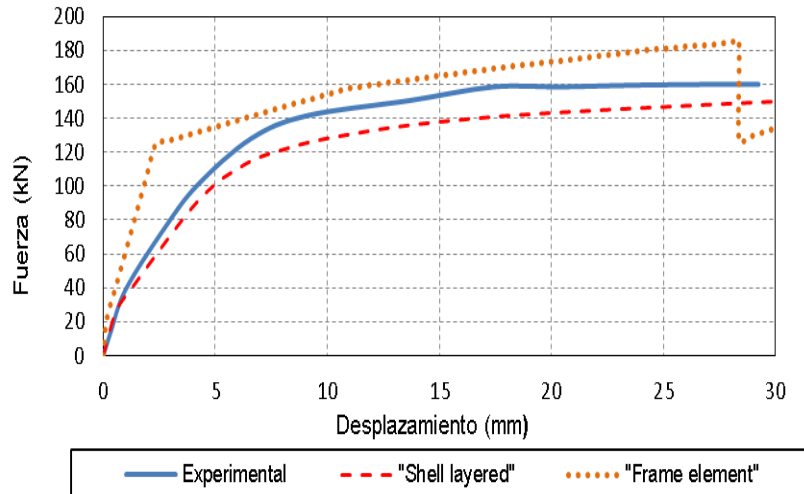
**Fuente:** Seismic performance of I-shaped rc shear wall subjected to cyclic loading<sup>[3]</sup>.

<sup>[3]</sup> LI, Wei; LI, Qing-ning. Seismic performance of I-shaped rc shear wall subjected to cyclic loading. In: The Structural Design of Tall and Special Buildings [online]. December 2012 [cited 3 may 2015], vol. 21, no. 12, p. 855-866. Disponible en: [http://www.researchgate.net/profile/Wei\\_Li249/publication/264365881\\_Seismic\\_performance\\_of\\_Ishaped\\_rc\\_shear\\_wall\\_subjected\\_to\\_cyclic\\_loading/links/54660c5e0cf25b85d17f547e.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Wei_Li249/publication/264365881_Seismic_performance_of_Ishaped_rc_shear_wall_subjected_to_cyclic_loading/links/54660c5e0cf25b85d17f547e.pdf).

El espécimen seleccionado (DL2), tiene una altura  $H = 1400$  mm y una sección transversal con un espesor de 100 mm. La resistencia a compresión del hormigón fue de 40 MPa (C40). Para el acero longitudinal se utilizaron barras (HPB335) con 10 mm de diámetro y con una resistencia a la tensión de  $f_y = 335$  Mpa. Para el acero transversal, se utilizaron barras (HPB235) con diámetro de 8 mm y resistencia a la tensión de  $f_y = 235$  Mpa [3].

Con el uso del software SAP2000, es ejecutado análisis pushover al espécimen DL2, con el macro-modelo: columna ancha equivalente con elementos “frame” y el micro modelo: laminas multicapa con “shell multi-layered”. La carga axial es de 1800 kN y la carga lateral pushover es aplicada en dirección paralela a una de las alas en el top del muro. Las curvas de capacidad correspondientes son representadas en la **Figura 18**.

**Figura 18.** Comparación de curvas de capacidad muro en L



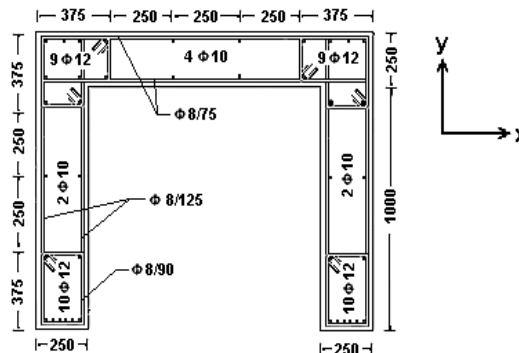
Se debe tener en consideración, que debido a la no simetría de este tipo de muro, los efectos torsionales demarcan alguna diferencia en las respuestas ofrecidas por ambas técnicas de modelación; siendo estos efectos asumidos de mayor manera por la modelación con elementos “shell”, debido a la excentricidad entre el punto

de aplicación y el centro de rigidez del muro estructural, lo que coincide con los resultados obtenidos en [49]. En la gráfica es posible observar que la rigidez inicial es bien representada por los elementos Shell, sin embargo después del punto de fluencia, ocurre una desestimación de la rigidez y resistencia global con este tipo de modelación. Por el contrario, en la modelación con elementos frame, se detalla una sobreestimación de la rigidez en tanto en el régimen elástico como en el régimen inelástico del muro estructural.

#### 4.5 MODELO EN U

En [4] se llevó a cabo una investigación experimental sobre el comportamiento no lineal de muros en concreto con sección transversal en U, ver **Figura 19**. Los investigadores evaluaron 3 modelos a “full-escala”, con las mismas dimensiones y refuerzo, sometiéndolos a una carga vertical de 2000 kN y variando únicamente la dirección de aplicación de la carga horizontal.

**Figura 19.** Sección transversal muro en U



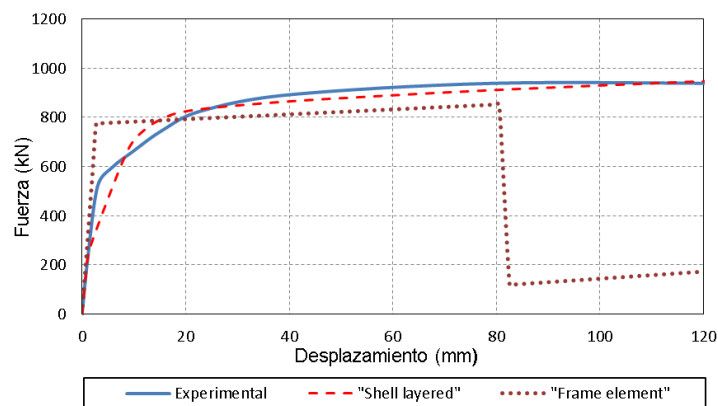
**Fuente:** Behavior of U-shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading<sup>[4]</sup>.

<sup>[4]</sup> ILE, N.; REYNOUARD, J. M. Behaviour of U-shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading. In: Journal of Earthquake Engineering [online]. 2005 [cited 3 may 2015], vol. 9, no. 01, p. 67-94. Disponible en: [http://www.researchgate.net/publication/233350417\\_BEHAVIOUR\\_OF\\_USHAPED\\_WALLS\\_SUBJECTED\\_TO\\_UNIAXIAL\\_AND\\_BIAXIAL\\_CYCLIC\\_LATERAL\\_LOADING](http://www.researchgate.net/publication/233350417_BEHAVIOUR_OF_USHAPED_WALLS_SUBJECTED_TO_UNIAXIAL_AND_BIAXIAL_CYCLIC_LATERAL_LOADING).

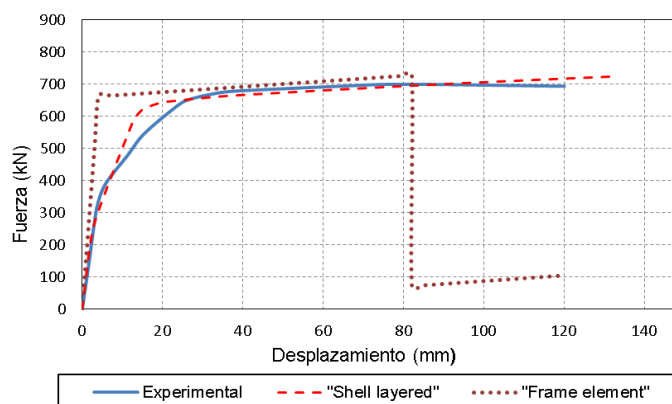
Los modelos fueron diseñados con una altura de 3.60 m, y una sección transversal de 1.50X1.25x0.25 m. Se utilizó concreto (C20/25) con resistencia a la compresión de 23.75 Mpa y barras de refuerzo (S500) con resistencia a la tensión de  $f_y = 520$  Mpa.

En SAP2000, se ejecutó un análisis pushover en las direcciones X y Y, dado que los resultados experimentales obtenidos en [4], muestran que la capacidad resistente varía para cada dirección de aplicación de la acción sísmica. La **Figura 20** y la **Figura 21** muestran las respuestas obtenidas con las técnicas de modelación en estudio con aplicación de cargas en dirección X y Y respectivamente.

**Figura 20.** Comparación de curvas de capacidad muro en U con carga en X



**Figura 21.** Comparación de curvas de capacidad muro en U con carga en Y



En ambas direcciones es posible observar una buena respuesta en ambas técnicas de modelación, captando de una manera razonable la capacidad del muro. No obstante, una vez más es observada una sobreestimación de la rigidez inicial de la modelación de los elementos frame.

Por otra parte, en la dirección X se puede observar una leve desestimación de la resistencia global debido a los efectos de torsión producidos por la excentricidad entre la aplicación de la carga y el centroide de rigidez de cada modelo.

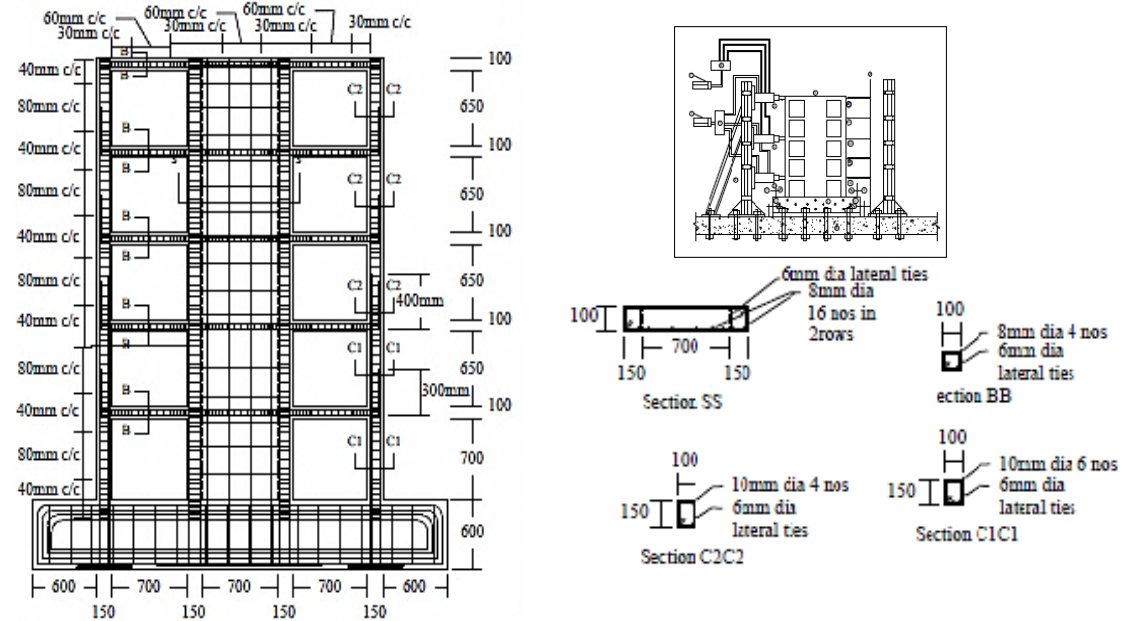
#### **4.6 MODELO SISTEMA DUAL (2D)**

El sistema dual seleccionado, es un modelo a un cuarto de escala investigado experimentalmente en [11]. La estructura compuesta de 5 niveles, Ver **Figura 22**, fue sometida a carga lateral y su rendimiento fue evaluado con base a su capacidad de carga, rigidez, ductilidad y capacidad de disipación de energía. El estudio abarcó toda la gama de carga, desde la etapa elástica inicial hasta el estado último de falla. La mezcla de hormigón fue diseñada para una resistencia característica de 30 MPa. Los autores compararon sus resultados experimentales con resultados analíticos obtenidos utilizando los software ANSYS y SAP2000.

Las vigas y columnas del modelo en estudio se han modelado con elementos de “frame” disponibles en la biblioteca de elementos del software SAP2000. En las vigas y columnas fueron asignadas PM y PMM respectivamente en ambos extremos.

Los muros estructurales fueron modelados con las dos técnicas en estudio: modelación con elementos “frame” con rótulas asignadas en los extremos y modelación con elementos “Shell Layered”. Se aplicaron cargas nodales en la primera, tercera y quinta planta del modelo, tal como se efectuó en la muestra experimental [11].

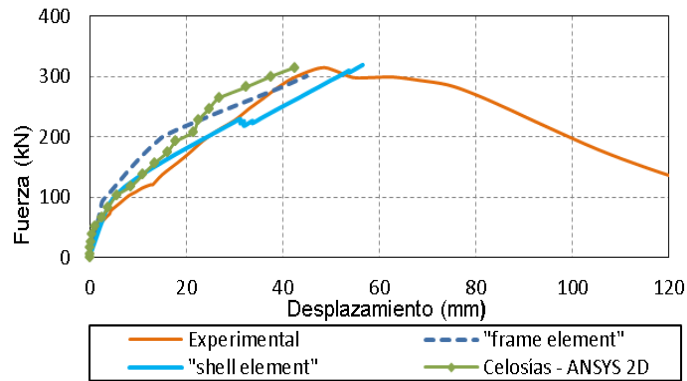
**Figura 22.** Modelo sistema dual (2D)



**Fuente:** Behavior of Reinforced Concrete Dual Structural System: Strength, Deformation Characteristics, and Failure Mechanism<sup>[11]</sup>.

En la **Figura 23** se muestran las curvas de capacidad obtenidas con cada técnica de modelación y los resultados experimentales y numéricos obtenidos por [11].

**Figura 23.** Comparación de curvas de capacidad sistema Dual (2D)



<sup>[11]</sup> DEVI, Govindan Nandini. Behaviour of Reinforced Concrete Dual Structural System: Strength, Deformation Characteristics, and Failure Mechanism. In: International Journal of Engineering and Technology [online]. February 2013 [cited 12 June 2015], vol. 5, no 1, p. 14. Disponible en: <http://www.ijetch.org/papers/501-M0001%20r.pdf>

En las curvas de capacidad obtenidas del sistema dual, se puede observar que la respuestas del comportamiento no lineal obtenidas con los modelamientos numéricos, son semejantes a la respuesta obtenida de manera experimental por [11]. Sin embargo, con la modelación de elementos tipo “frame”, se puede evidenciar una sobreestimación de la resistencia global después del punto de fluencia, tomando una mejor respuesta cerca a la carga última de la estructura. La respuesta con los elementos “shell layered” es la que mejor capta la rigidez y resistencia global de la estructura.

## 5. CONCLUSIONES

En la literatura se pueden identificar dos métodos ampliamente difundidos para la modelación no lineal de muros estructurales en concreto reforzado: modelación con elementos tipo barra “frame” con asignación de rótulas plásticas y modelación con elementos multicapa (“shell multi-layered”). En este trabajo se pudo evidenciar que ambas técnicas de modelación ofrecen buenos resultados cuando la respuesta de los elementos es dominado por flexión, en contraste, cuando la relación de aspecto disminuye, los efectos por cortante empiezan a cobrar importancia y los resultados obtenidos dejan de ser razonables a partir de las simulaciones.

Una alternativa de modelación para simular bien estos efectos, es el macro-modelo multi-resorte (MVLEM) [50], el cual permite una mejor representación de la distribución de deformación a través de la sección del muro e incorporar la interacción cortante-flexión.

Por otra parte, en la modelación con elementos “shell”, hubo la necesidad de establecer una forma de comportamiento para el concreto plástico-perfecto después del punto de cedencia y un modelo trilinear para el acero; ya que otros modelos de esfuerzo deformación de los materiales generaron resultados poco razonables o inestabilidad numérica en el programa imposibilitando la convergencia del mismo. Caber resaltar que aunque estos modelos prácticos permitieron un buen desarrollo, generó también una desestimación de la resistencia global estructural, aunque los resultados captaban muy bien la rigidez inicial de cada elemento. En contraste, los elementos frame tienden a sobreestimar la rigidez inicial y la resistencia global estructural.

Otro de los resultados importantes es el hecho de que la modelación con elementos shell considera algunos efectos que no son tenidos en cuenta por los

elementos frame. Esto se pudo determinar en los muros donde debido a la excentricidad de la carga la torsión tuvo efectos importantes sobre el comportamiento de los elementos.

En cuanto a la forma de las curvas de capacidad, es posible distinguir la diferencia de transición del comportamiento elástico al comportamiento plástico de la estructura. En los elementos "frame" la transición se efectúa en un punto, mientras que en los elementos "shell" es posible observar una transición gradual de la plastificación.

## CITAS

[1] GULKAN, Polat; SOZEN, Mete A. Inelastic responses of reinforced concrete structure to earthquake motions. In: ACI Journal Proceedings. ACI, December, 1974. Vol. 71, no. 12, p. 109-116.

[2] WALLACE, John W.; MOEHLE, Jack P. Ductility and detailing requirements of bearing wall buildings. In: Journal of Structural Engineering. 1992, vol. 118, no. 6, p. 1625-1644.

[3] LI, Wei; LI, Qing-ning. Seismic performance of I-shaped rc shear wall subjected to cyclic loading. In: The Structural Design of Tall and Special Buildings [online]. December 2012 [cited 3 may 2015], vol. 21, no. 12, p. 855-866. Available from Internet:[http://www.researchgate.net/profile/Wei\\_Li249/publication/264365881\\_Seismic\\_performance\\_of\\_Ishaped\\_rc\\_shear\\_wall\\_subjected\\_to\\_cyclic\\_loading/links/54660c5e0cf25b85d17f547e.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Wei_Li249/publication/264365881_Seismic_performance_of_Ishaped_rc_shear_wall_subjected_to_cyclic_loading/links/54660c5e0cf25b85d17f547e.pdf).

[4] ILE, N.; REYNOUARD, J. M. Behaviour of U-shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading. In: Journal of Earthquake Engineering [online]. 2005 [cited 3 may 2015], vol. 9, no. 01, p. 67-94. Available from Internet: [http://www.researchgate.net/publication/233350417\\_BEHAVIOUR\\_OF\\_USHAPED\\_WALLS\\_SUBJECTED\\_TO\\_UNIAXIAL\\_AND\\_BIAXIAL\\_CYCLIC\\_LATERAL\\_LOADING](http://www.researchgate.net/publication/233350417_BEHAVIOUR_OF_USHAPED_WALLS_SUBJECTED_TO_UNIAXIAL_AND_BIAXIAL_CYCLIC_LATERAL_LOADING).

[5] MORA, Mauricio Alexander; VILLALBA, Jesús Daniel; MALDONADO, Esperanza. Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín [en línea]. Julio-Diciembre, 2006 [Citado el 5 de junio de 2015], vol. 5, no 9, p. 59-74. Disponible en: <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/234/221>.

[6] PAULAY, Thomas; PRIESTLY, M. J. N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York: *Wiley Interscience*. 1992. 744p.

[7] OTANI, Shunsuke. Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Building Structures. In: Canadian Journal of Civil Engineering [online], 1980 [cited 5 June 2015], vol. 7, p. 333-344. Available from Internet: [http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/otani/canadian\\_journal1980.pdf](http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/otani/canadian_journal1980.pdf).

[8] GALAL, K.; EL-SOKKARY, H. Advancement in modeling of RC shear walls. In: 14th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Beijing, China. 2008 [cited 10 June 2015]. Available from Internet: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_14-0136.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_14-0136.PDF)

[9] KABEYASAWA, Toshimi, et al. Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure. In: Journal of the Faculty of Engineering [online]. May, 1983 [cited 12 June 2015], vol. 37, no 2, p. 431-478. Available from Internet: <http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/otani/full-scale-analysis.pdf>.

[10] DORNINGER, Konrad; RAMMERSTORFER, Franz G. A layered composite shell element for elastic and thermoelastic stress and stability analysis at large deformations. In: International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, vol. 30, no 4, p. 833-858.

[11] DEVI, Govindan Nandini. Behaviour of Reinforced Concrete Dual Structural System: Strength, Deformation Characteristics, and Failure Mechanism. In: International Journal of Engineering and Technology [online]. February 2013 [cited 12 June 2015], vol. 5, no 1, p. 14. Available from Internet: <http://www.ijetch.org/papers/501-M0001%20r.pdf>.

[12] MAGNA, C. E.; KUNNATH, S. K. Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls. In 15th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Lisboa, 2012 [cited 14 june 2015]. Available from Internet: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_2529.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2529.pdf)

[13] KUBIN, J.; FAHJAN, Y. M.; TAN, M. T. Comparison of practical approaches for modelling shearwalls in structural analyses of buildings. In: The 14th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Beijing, October, 2008 [cited 15 june 2015]. Available from Internet: <http://www.prota.com.tr/probina/download/Comparison.pdf>

[14] KRAWINKLER, Helmut; SENEVIRATNA, G. D. P. K. Pros and cons analysis of seismic evaluation. In: Engineering Structures [online], 1998 [cited 15 jun 2015], vol. 20, no 4-6, p. 452-464. Available from Internet: [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/cu/cu\\_06/te\\_01/ar\\_05.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/cu/cu_06/te_01/ar_05.pdf)

[15] KIRCHER, Charles A., et al. Development of building damage functions for earthquake loss estimation. In: Earthquake spectra, 1997, vol. 13, no 4, p. 663-682.

[16] ALBANESI, Tomasso.; BIONDI, S.; PETRANGELI, Marco. Pushover analysis: An energy based approach. In: Proc. of the Twelfth European Conference on Earthquake Engineering [online], London, United Kingdom, Paper. September, 2002 [cited 01 july 2015]. Available from Internet: [http://www.researchgate.net/profile/Marco\\_Petrangeli/publication/268680977\\_Push\\_over\\_analysis\\_an\\_energy\\_based\\_approach/links/5473084f0cf2d67fc035d8bd.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Marco_Petrangeli/publication/268680977_Push_over_analysis_an_energy_based_approach/links/5473084f0cf2d67fc035d8bd.pdf)

[17] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Building Seismic Safety Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA-356. Washington D.C.: FEMA, 2000. Pp. 6-47.

[18] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. NEHRP: Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA-273. Washington D.C.: FEMA, 1997.

[19] APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40. California, Redwood City: ATC, 1996.

[20] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI Standard 41-13. Virginia USA: ASCE Standard, 2013.

[21] FAJFAR, Peter; FISCHINGER, Matej. N2-A method for non-linear seismic analysis of regular buildings. In: Proceedings of the Ninth World Conference in Earthquake Engineering [online]. 1988 [cited 04 July 2015]. p. 111-116. Available from Internet: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/9\\_vol5\\_111.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/9_vol5_111.pdf)

[22] LAWSON, R. Scott; VANCE, Vicki; KRAWINKLER, Helmut. Nonlinear static push-over analysis-why, when, and how?. In: Proceedings of the 5th US Conference in Earthquake Engineering. 1994. Available from Internet: [https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCYQFjABahUKEwjRn53O37\\_HAhWCmx4KHffUBel&url=https%3A%2F%2Fwww.sefindia.org%2Fforum%2Fdownload.php%3Fid%3D9151%26sid%3Dd7f7401449cd89b8ba8153ffbe0a377d&ei=MgXaVdGBIK3evepl5AO&usq=AFQjCNGCZOCCyAq4byhF2flcQoCBzls-4w](https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCYQFjABahUKEwjRn53O37_HAhWCmx4KHffUBel&url=https%3A%2F%2Fwww.sefindia.org%2Fforum%2Fdownload.php%3Fid%3D9151%26sid%3Dd7f7401449cd89b8ba8153ffbe0a377d&ei=MgXaVdGBIK3evepl5AO&usq=AFQjCNGCZOCCyAq4byhF2flcQoCBzls-4w)

[23] FAELLA, Giuseppe. Evaluation of the R/C structures seismic response by means of nonlinear static push-over analyses. In: 11th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Acapulco, Mexico, 1996 [cited 15 July 2015]. Available from Internet: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11\\_1146.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_1146.PDF)

[24] PARET, Terrence F., et al. Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects. In: Proceedings of the eleventh world conference on earthquake engineering [online]. 1996 [cited 15 July 2015]. Available from Internet: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11\\_966.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_966.PDF)

[25] SASAKI, K. K.; FREEMAN, S. A.; PARET, T. F. Multimode pushover procedure (MMP)—a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis. In: Proceedings of the 6th US National Conference on Earthquake Engineering [online], Seattle, Washington. 1998 [cited 15 July 2015]. Available from Internet:

[ftp://ftp.ecn.purdue.edu/ayhan/Prasanth/MultiMode%20Pushover%20Procedure%20\(SASAKI\).pdf](ftp://ftp.ecn.purdue.edu/ayhan/Prasanth/MultiMode%20Pushover%20Procedure%20(SASAKI).pdf)

[26] CHOPRA, Anil K.; GOEL, Rakesh K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation. In: Civil and Environmental Engineering [online], 2001 [cited 20 July 2015], p. 55. Available from Internet:

[http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1054&context=cenv\\_fac](http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1054&context=cenv_fac)

[27] CHOPRA, Anil K.; GOEL, Rakesh K.; CHINTANAPAKDEE, Chatpan. Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands. In: Earthquake Spectra [online], 2004 [cited 20 July 2015], vol. 20, no 3, p. 757-778. Available from Internet:

[http://www.researchgate.net/profile/Chatpan\\_Chintanapakdee/publication/246110498\\_Evaluation\\_of\\_a\\_Modified\\_MPA\\_Procedure\\_Assuming\\_Higher\\_Modes\\_as\\_Elastic\\_to\\_Estimate\\_Seismic\\_Demands/links/53e9f50a0cf2dc24b3caf299.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Chatpan_Chintanapakdee/publication/246110498_Evaluation_of_a_Modified_MPA_Procedure_Assuming_Higher_Modes_as_Elastic_to_Estimate_Seismic_Demands/links/53e9f50a0cf2dc24b3caf299.pdf)

[28] MATSUMORI, T., et al. Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures. In: Proceedings of the US-Japan Workshop

on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for R/C Building Structures. 1999. p. 79-94.

[29] NAEIM, F.; LOBO, R. Avoiding Common Pitfalls in Push-Over Analysis. En: Proceedings of 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering. 1999. p. 269-274.

[30] BRACCI, Joseph M.; KUNNATH, Sashi K.; REINHORN, Andrei M. Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures. In: Journal of Structural Engineering, 1997, vol. 123, no 1, p. 3-10. Available from Internet: <http://civil.eng.buffalo.edu/~reinhorn/PUBLICATIONS/Bracci,%20Kunnath%20and%20Reinhorn%20-ASCE-JSE-1997.pdf>

[31] LEFORT, Thibaut. Advanced pushover analysis of RC multi-storey buildings. Masterthesis. London: Imperial College London, 2000.

[32] KALKAN, Erol; KUNNATH, Sashi K. Adaptative modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures. In: Journal of Structural Engineering. 2006. Vol. 132, No.11, p. 1721-1731.

[33] WOOD, Sharon L. Performance of reinforced concrete buildings during the 1985 Chile earthquake: implications for the design of structural walls. In: Earthquake Spectra, 1991, vol. 7, no 4, p. 607-638.

[34] FINTEL, Mark. Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years. In: ACI journal [online], 1995 [cited 20 July 2015], vol. 40, no 3, p. 62-80. Available from Internet: [http://www.pci.org/uploadedFiles/Siteroot/Publications/PCI\\_Journal/1995/DOI\\_Articles/jl-95-may-june-5.pdf](http://www.pci.org/uploadedFiles/Siteroot/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-may-june-5.pdf)

[35] FINTEL, Mark. Ductile shear walls in earthquake resistant multistory buildings. In: ACI Journal Technical Paper [online]. 1974 [cited 20 July 2015]. Vol. 71, No. 19, p. 236-305. Disponible en:

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LjUaZXf5WYMC&oi=fnd&pg=SL603-PA33&ots=pJkssMAEly&sig=w8xR7\\_2nW6\\_I7N8HPx81ft2AkWM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LjUaZXf5WYMC&oi=fnd&pg=SL603-PA33&ots=pJkssMAEly&sig=w8xR7_2nW6_I7N8HPx81ft2AkWM#v=onepage&q&f=false)

[36] FINTEL, Mark; GHOSH, S. K. Case study of aseismic design of a 16-story coupled wall using inelastic dynamic analysis. In: *ACI Journal*. 1982. Vol. 79 No. 3, p. 171-179.

[37] MONSALVE DÁVILA, Jazmin T. and RAMÍREZ BOSCÁN, Orlando. Análisis y diseño sísmico por desmembramientos de edificios con muros estructurales [en línea], Tesis de Maestría. Universidad de los Andes, 2005 [citado 20 de julio de 2015].

Disponible en:

[http://www.academia.edu/2010497/An%C3%A1lisis\\_y\\_dise%C3%B1o\\_s%C3%ADsmico\\_por\\_desempe%C3%B1o\\_de\\_edificios\\_de\\_muros\\_estructurales](http://www.academia.edu/2010497/An%C3%A1lisis_y_dise%C3%B1o_s%C3%ADsmico_por_desempe%C3%B1o_de_edificios_de_muros_estructurales)

[38] FERNÁNDEZ, Helbert Fredy González; FREDY, Helbert; LÓPEZ ALMANSA, Francisco. Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú [en línea]. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de ingeniería del terreno, Cartografía y Geofísica, 2011 [citado 20 de julio de 2015]. 259 p. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6278>

[39] BAZÁN, E. and MELI, R. Diseño sísmico de edificios. México D.F. : Limusa S.A [online]. 2004 [citado 20 julio de 2015] Vol. 1. Disponible en: [http://es.slideshare.net/philip\\_c/diseo-ssmico-de-edificios-meli](http://es.slideshare.net/philip_c/diseo-ssmico-de-edificios-meli)

[40] VALLENAS, Jose Miguel; BERTERO, Vitelmo Victorio; POPOV, Egor Paul. Hysteric behavior of reinforced concrete structural walls. NASA STI/Recon Technical Report N, 1979, vol. 80, p. 533.

[41] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Earthquake Effects on Reinforced Concrete Structures. ACI: *Special Publication SP-84*. Detroit : US-Japan Research, J.K. Wight, Editor, 1984.

[42] VULCANO, A. Use of wall macroscopic models in the nonlinear analysis of RC frame-wall structures. In: Earthquake Engineer 10th World [online]. Rotterdam, 1992 [cited 20 july 2015]. Vol. 8, p. 4309. Available from Internet:: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10\\_vol8\\_4309.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol8_4309.pdf)

[43] COLOTTI, Vincenzo. Shear behavior of RC structural walls. In: Journal of Structural Engineering[online]. Septiembre,1993 [cited 20 july 2015]. Vol. 119, no 3, p. 728-746. Available from Internet: <http://www.masonrysociety.org/TMSJournal/Vol.%2019,%20No.%201/p%20037%20colotti.pdf>

[44] ORAKCAL, Kutay; WALLACE, John W.; CONTE, Joel P. Flexural modeling of reinforce concrete walls-model attributes. In: ACI Structural Journal [online]. October, 2004 [cited 20 july 2015]. Vol. 101, No. 5, p. 688-98. Available from Internet: [http://jaquar.ucsd.edu/publications/refereed\\_journals/Orakcal\\_Wallace\\_Conte\\_ACI\\_2004.pdf](http://jaquar.ucsd.edu/publications/refereed_journals/Orakcal_Wallace_Conte_ACI_2004.pdf)

[45] FAHJAN, Y. M.; KUBIN, J.; TAN, M. T. Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings with shear walls. In: 14th econference in Earthquake Engineering [online], 2010 [cited 20 july 2015]. Available from Internet:

<http://www.protasoftware.com/files/publications/Nonlinear Analysis Methods for Reinforced Concrete Buildings with Shearwalls.pdf>

[46] MIAO, Zhiwei, et al. Evaluation of modal and traditional pushover analyses in frame-shear-wall structures. *In: Advances in Structural Engineering* [online]. October, 2011 [cited 20 July 2015]. Vol. 14, no 5, p. 815-836. Available from Internet:[http://www.researchgate.net/profile/Xinzheng\\_Lu/publication/232809413\\_Evaluation\\_of\\_Modal\\_and\\_Traditional\\_Pushover\\_Analyses\\_in\\_Frame-Shear-Wall\\_Structures/links/0c96051b032d664bb9000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Xinzheng_Lu/publication/232809413_Evaluation_of_Modal_and_Traditional_Pushover_Analyses_in_Frame-Shear-Wall_Structures/links/0c96051b032d664bb9000000.pdf)

[47] HOGNESTAD, Eivind; HANSON, Norman W.; MCHENRY, Douglas. Concrete stress distribution in ultimate strength design. En *ACI Journal Proceedings*. ACI, 1955.

[48] THOMSEN, John H.; WALLACE, John W. Displacement based design of reinforced concrete structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and t-shaped cross-sections: a dissertation. 1995. Tesis Doctoral. Clarkson University.

[49] ARAÚJO FERREIRA, Mário Alexandre. Análise Pushover com Elementos Shell em Paredes Estruturais [en línea], Tesis de Mestría. Lisboa: Universidad Nova de Lisboa. Faculdade de Ciencias e Tecnologia. 2014 [citado el 20 de julio 2015]. 187 p. Disponible en:  
[http://run.unl.pt/bitstream/10362/11006/1/Ferreira\\_2013.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/11006/1/Ferreira_2013.pdf)

[50] MASSONE, Leonardo M.; ORAKCAL, Kutay; WALLACE, John W. Modeling Of Squat Shearwalls Controlled By Shear. *In: The 14 th World Conference on Earthquake Engineering* [online]. Beijing, China, October 12-17, 2008 [cited 21 July 2015]. Disponible en: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_05-03-0025.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-03-0025.PDF)

## BIBLIOGRAFÍA

APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40. California, Redwood City: ATC, 1996.

ARAÚJO FERREIRA, Mário Alexandre. Análise Pushover com Elementos Shell em Paredes Estruturais [en línea], Tesis de Mestría. Lisboa: Universidad Nova de Lisboa. Faculdade de Ciencias e Tecnologia. 2014 [citado el 20 de julio 2015]. 187 p. Disponible en: [http://run.unl.pt/bitstream/10362/11006/1/Ferreira\\_2013.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/11006/1/Ferreira_2013.pdf)

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI Standard 41-13. Virginia USA: ASCE Standard, 2013.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Building Seismic Safety Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA-356. Washington D.C.: FEMA, 2000. Pp. 6-47.

FAHJAN, Y. M.; KUBIN, J.; TAN, M. T. Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings with shear walls. In: 14th conference in Earthquake Engineering [online], 2010 [cited 20 July 2015]. Available from Internet: [http://www.protasoftware.com/files/publications/Nonlinear\\_Analysis\\_Methods\\_for\\_Reinforced\\_Concrete\\_Buildings\\_with\\_Shearwalls.pdf](http://www.protasoftware.com/files/publications/Nonlinear_Analysis_Methods_for_Reinforced_Concrete_Buildings_with_Shearwalls.pdf)

FERNÁNDEZ, Helbert Fredy González; FREDY, Helbert; LÓPEZ ALMANSA, Francisco. Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú [en línea]. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de

ingeniería del terreno, Cartografía y Geofísica, 2011 [citado 20 de julio de 2015]. 259 p. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6278>

KUBIN, J.; FAHJAN, Y. M.; TAN, M. T. Comparison of practical approaches for modelling shearwalls in structural analyses of buildings. In: The 14th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Beijing, October, 2008 [cited 15 june 2015]. Available from Internet: <http://www.prota.com.tr/probina/download/Comparison.pdf>

MAGNA, C. E.; KUNNATH, S. K. Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls. In 15th World Conference on Earthquake Engineering [online]. Lisboa, 2012 [cited 14 june 2015]. Available from Internet: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_2529.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_2529.pdf)

MONSALVE DÁVILA, Jazmin T. y RAMÍREZ BOSCAN, Orlando. Análisis y diseño sísmico por desmempeños de edificios con muros estructurales [en línea]. Tesis de Maestría. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, 2005 [citado 20 de julio de 2015]. Disponible en: [http://www.academia.edu/2010497/An%C3%A1lisis\\_y\\_dise%C3%B1o\\_s%C3%ADsmico\\_por\\_desempe%C3%B1o\\_de\\_edificios\\_de\\_muros\\_estructurales](http://www.academia.edu/2010497/An%C3%A1lisis_y_dise%C3%B1o_s%C3%ADsmico_por_desempe%C3%B1o_de_edificios_de_muros_estructurales)

MORA, Mauricio Alexander; VILLALBA, Jesús Daniel; MALDONADO, Esperanza. Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín [en línea]. Julio-Diciembre, 2006 [Citado el 5 de junio de 2015], vol. 5, no 9, p. 59-74. Disponible en: <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/234/221>

ORAKCAL, Kutay; WALLACE, John W.; CONTE, Joel P. Flexural modeling of reinforce concrete walls-model attributes. In: ACI Structural Journal [online]. October, 2004 [cited 20 july 2015]. Vol. 101, No. 5, p. 688-98. Available from Internet:

[http://jaquar.ucsd.edu/publications/refereed\\_journals/Orakcal\\_Wallace\\_Conte\\_ACI\\_2004.pdf](http://jaquar.ucsd.edu/publications/refereed_journals/Orakcal_Wallace_Conte_ACI_2004.pdf)

VULCANO, A. Use of wall macroscopic models in the nonlinear analysis of RC frame-wall structures. In: Earthquake Engineer 10th World [online]. Rotterdam, 1992 [cited 20 july 2015]. Vol. 8, p. 4309. Available from Internet:

[http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10\\_vol8\\_4309.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol8_4309.pdf)

## ANEXOS

### ANEXO A. MODELACIÓN DE MUROS CON ELEMENTOS “FRAME”

En el presente anexo se definen los pasos básicos para efectuar un análisis pushover en un muro estructural en concreto reforzado mediante la utilización de elementos tipo barra “frame”.

El modelo seleccionado es el modelo rectangular (RW2) de Thomson y Wallace estudiado en el presente trabajo.

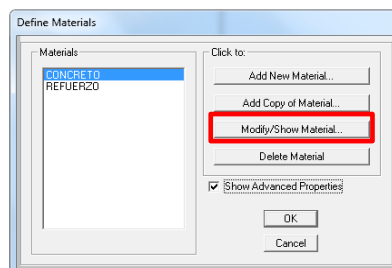
#### A. 1 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Para realizar un análisis “pushover” es necesario definir las propiedades de los materiales teniendo en cuenta su comportamiento no lineal.

**A.1.1 Definición del concreto.** Para definir el comportamiento del concreto se puede tomar algunos de los modelos revisados en el capítulo 4 del presente trabajo. En este caso definiremos el modelo de Mander. Para esto se siguen los siguientes comandos:

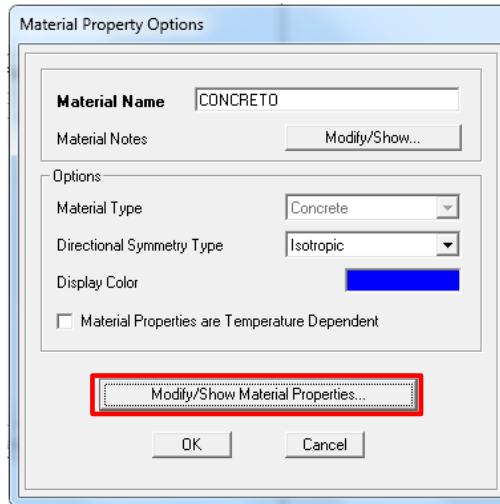
*Define > Materials > Add new materials -> Show advanced properties -> Add new material -> Modify/Show material properties*

**Figura A.1.** Definición de materiales



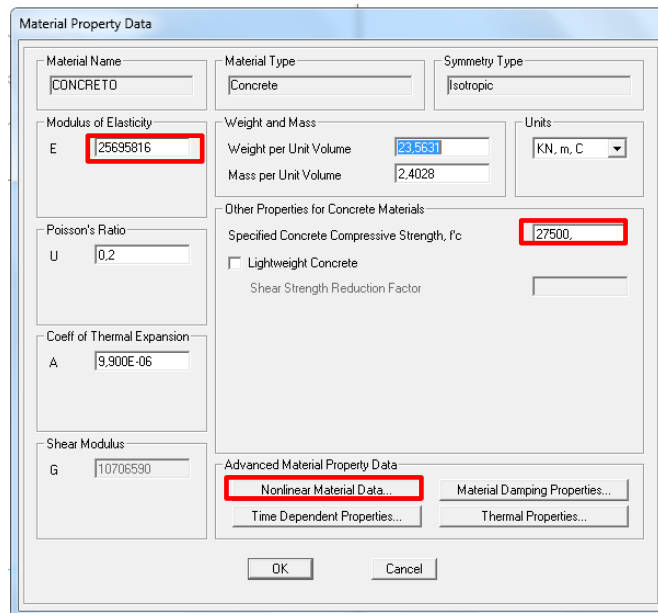
En la siguiente ventana se definen “Material Type” y “Directional Symmetry Type”

**Figura A.2.** Definición del tipo de material



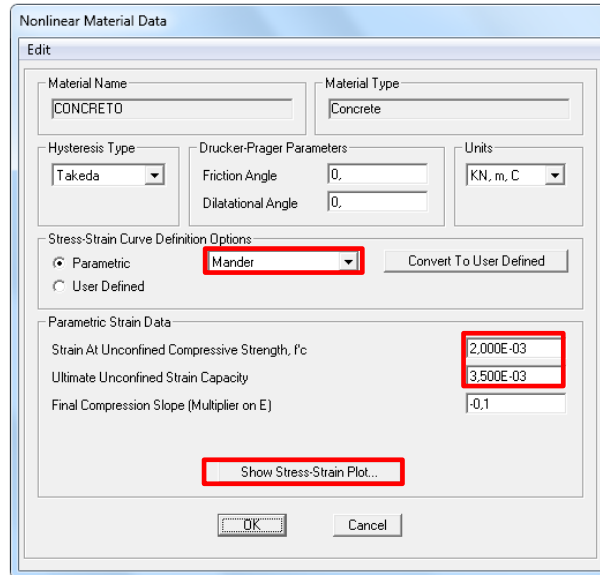
A continuación se definen las características del material y se ingresa al menú “Nonlinear Material Data...” donde se definirán las características no lineales del material.

**Figura A.3.** Definición de propiedades del material



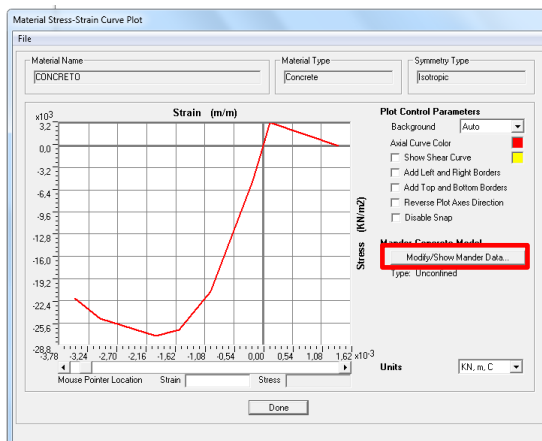
En la siguiente ventana se definen las tensiones de cedencia y rotura y las respectivas deformaciones para el Mander no confinado.

**Figura A.4.** Definición de modelo del concreto



En “*Show Stress-Strain Plot...*” se observa la curva del concreto no confinado de Mander. Para dar confinamiento a las secciones cuando estas sean diseñadas, es necesario dar las características para el Mander Confinado.

**Figura A.5.** Curva esfuerzo deformación del concreto definido.



Ingresando a “*Modify/Show Mander Data...*” se pueden asignar las características del Mander confinado, para esto hay que asignar las propiedades del refuerzo de confinamiento:

**Figura A.6.** Definición del confinamiento para el concreto

Mander Concrete Stress-Strain Data

Material Name: CONFINADO DE BORDE

Material Type: Concrete

Symmetry Type: Isotropic

Units: KN, m, C

Mander Type:

- Unconfined
- Confined: Rectangular Core
- Confined: Circular Core; Hoop Confinement Steel
- Confined: Circular Core; Spiral Confinement Steel

Rectangular Core Confinement Bar Data:

- Confinement Bar Size
- Confinement Bar Area: 1,780E-05

Mander Data Source:

- Frame Section Property
- User Defined

General Confinement Bar Data:

- Confinement Bar Property: REFUERZO
- Confinement Bar Yield Stress
- Tie Longitudinal Spacing (CL to CL): 0.076

Rectangular Core X-Direction Confinement Bar Data:

- Number of X-Direction Tie Legs: 2
- CL to CL Distance Between X-Direction Perimeter Tie Legs: 0.064

Rectangular Core Y-Direction Confinement Bar Data:

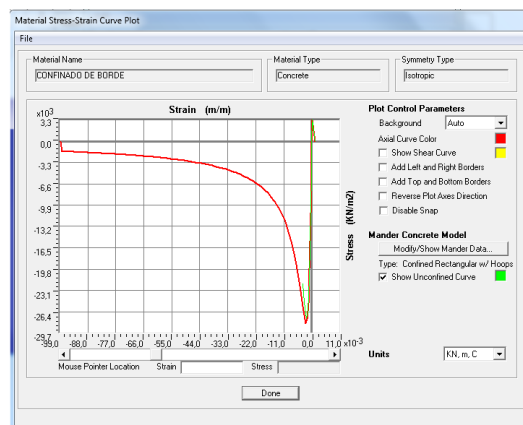
- Number of Y-Direction Tie Legs: 2
- CL to CL Distance Between Y-Direction Perimeter Hoop Legs: 0.153

Update Plot

OK Cancel

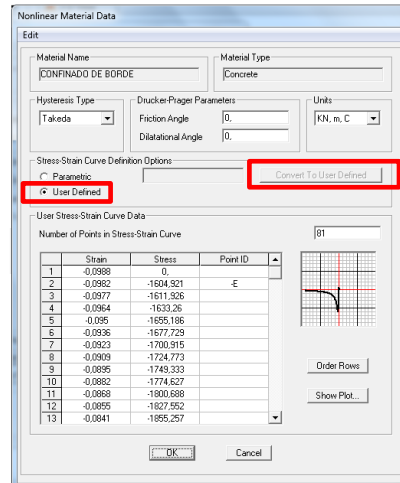
El programa genera la nueva curva de esfuerzo deformación para el concreto de la respectiva sección confinada.

**Figura A.7.** Curva concreto confinado



En el menú “Convert To User Defined” es posible capturar los parámetros definidos por el usuario para el concreto de la sección confinada.

**Figura A.8.** Datos del concreto convertidos a definidos por el usuario

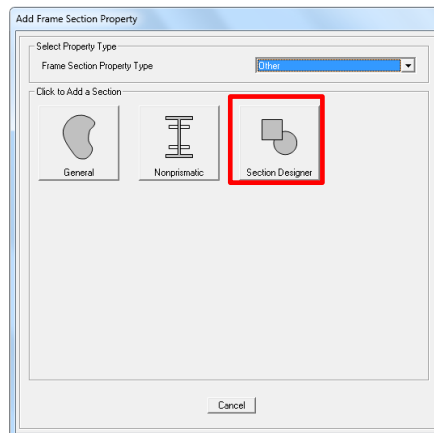


## A.2 DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN

Después de definir los materiales, se puede proceder con el diseño de la sección. Para esto seguimos los siguientes comandos:

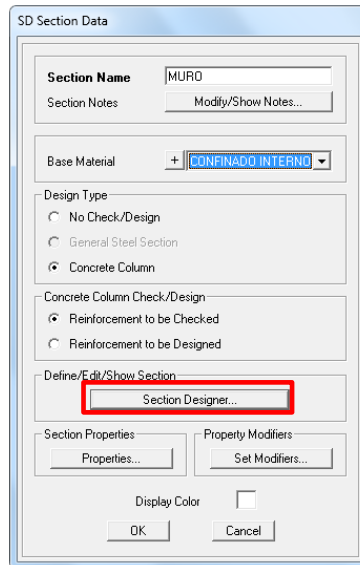
*Define > Section properties > Frame section > Add new property...*

**Figura A.9.** Definición de la propiedad del tipo de elemento frame



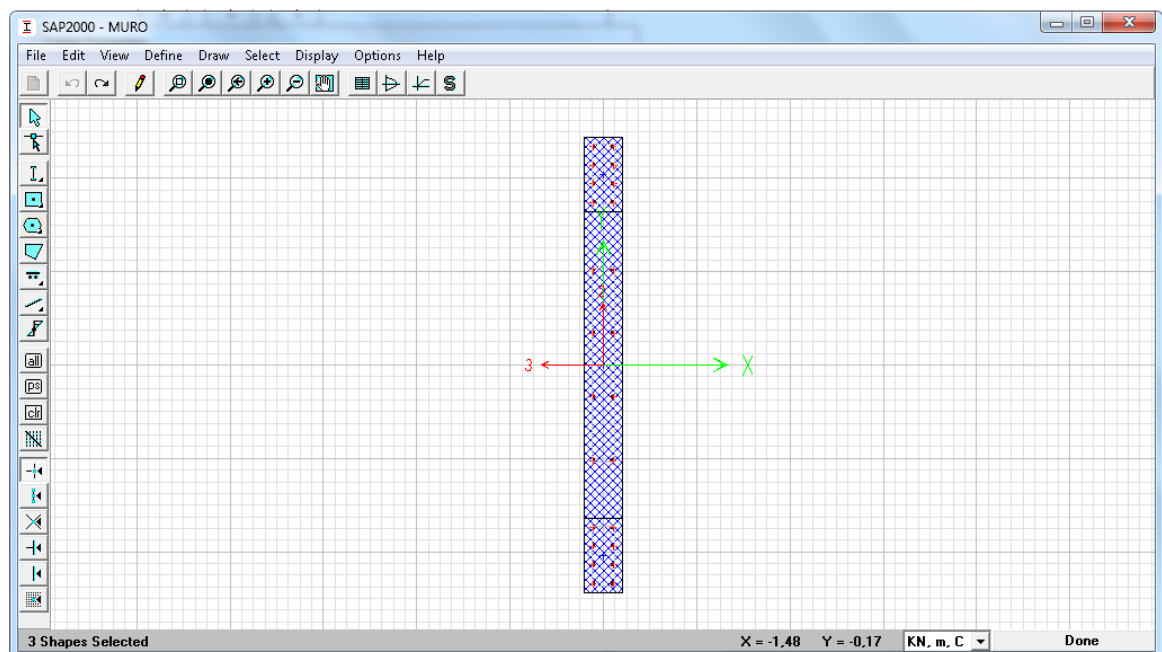
En el comando “*Section Designer...*” es posible definir la sección transversal.

**Figura A.10.** Definición del tipo de sección



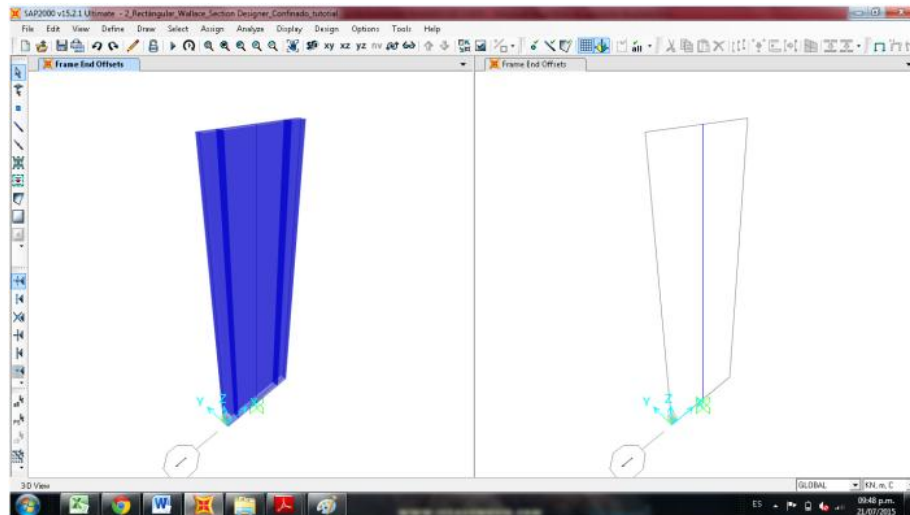
Se grafican las propiedades geométricas y se asigna el refuerzo correspondiente.

**Figura A.11.** Modelamiento de la sección transversal en “*Section Designer*”



Luego de definir la sección se procede a la elaboración de la estructura a analizar. En la siguiente imagen se ve el muro como elemento “frame” y su respectiva extrusión.

**Figura A.12.** Muro modelado



### **A.3 DEFINICIÓN DE CARGAS**

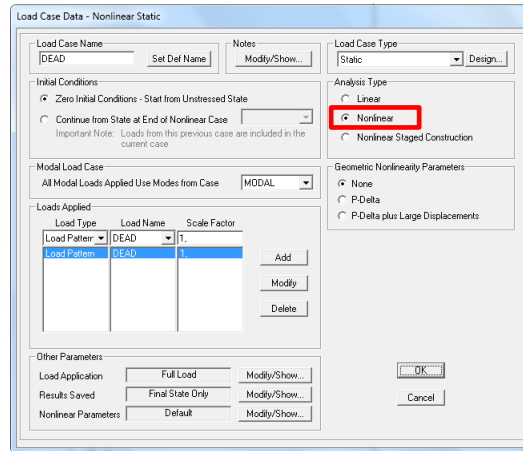
Es importante tener en cuenta que el “Pushover” es un análisis no lineal, por lo tanto los casos de carga deben estar definidos en el rango no lineal. En el presente trabajo las cargas definidas fueron: DEAD y PUSHOVER.

#### **A.3.1 Carga DEAD**

Para modelar la carga gravitacional no lineal se siguen los pasos:

*Define > Load Cases > Modify/Show load case*

Figura A.13. Definición de carga muerta no lineal.

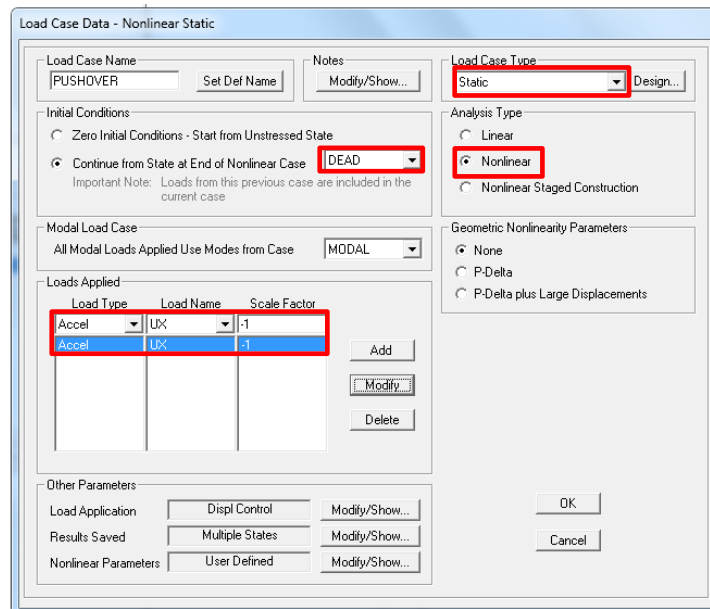


### A.3.2 Carga pushover

Para definir la carga que representa el análisis estático no lineal, se define un nuevo caso de carga no lineal con los siguientes pasos:

*Define > Load Cases > Add New Load Case*

Figura A.14. Definición de carga estática no lineal “pushover”



Es importante aclarar que la carga “pushover” puede ser “uniforme” o “modal”.  
Los pasos de cada tipo de carga se definen a continuación:

Para aplicar carga uniforme es necesario definir los siguientes parámetros:

Load Case type > Static;

Continue from State at end of Nonlinear Case > DEAD;

Analysys type > Nonlinear;

Loads Aplied > Load Type > Acceleration;

Loads Aplied > Load Name (Depende de la dirección de análisis);

Loads Aplied > Scale Factor (-1, para obtener una deformación con desplazamientos positivos).

Para aplicar carga modal es necesario definir los siguientes parámetros:

Load Case type > Static

Continue from State at end of Nonlinear Case > DEAD

Analysys type > Nonlinear

Loads Aplied > Load Type > Modal

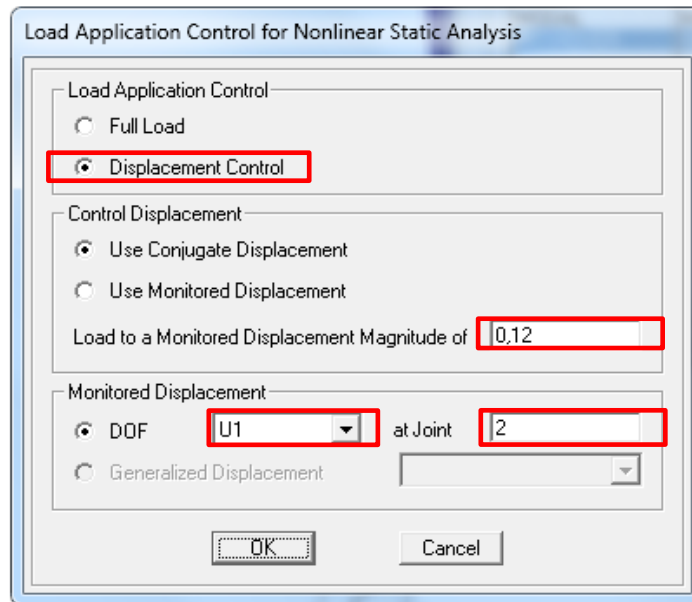
Loads Aplied > Load Name (Depende del modo de vibración dominante en la dirección de estudio)

Loads Aplied > Scale Factor (-1 o 1, depende de la deformación del modo de vibración)

Después de definir la carga es importante definir el modo de aplicación y el almacenamiento de los resultados en los comandos Load Application – Results Saved – Nonlinear Parameters.

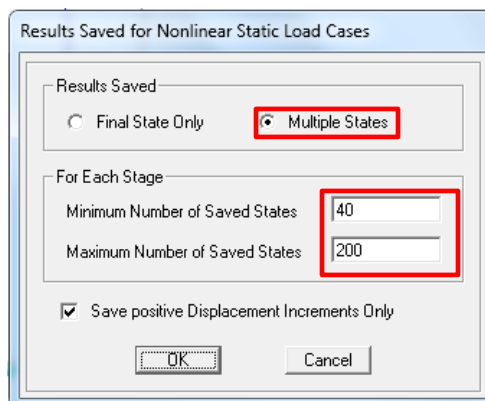
En “Load Application” se carga como “Displacement Control” y se selecciona un punto para el cual el programa registra el desplazamiento en cada paso, hasta el máximo valor de este último.

**Figura A.15.** Definición del punto y desplazamiento de control



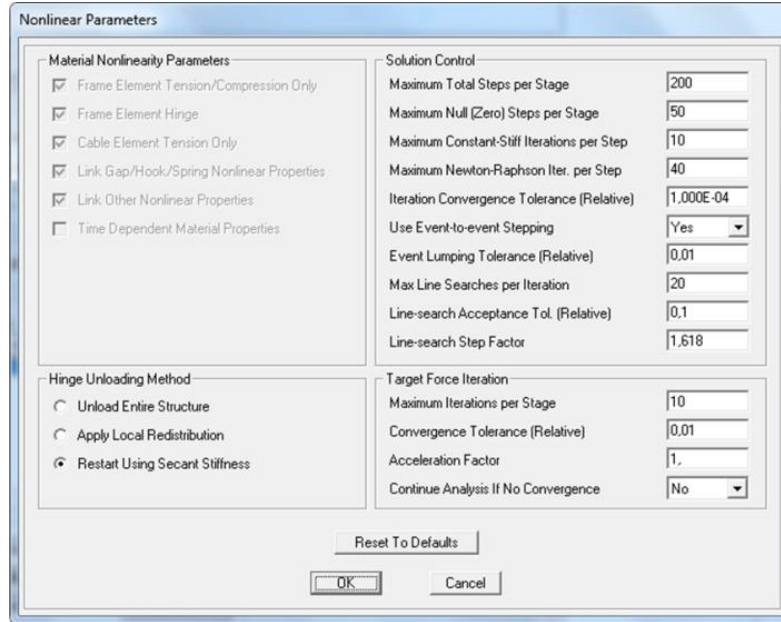
Los resultados del “pushover” son definidos en múltiples estados. Se definen el mínimo y el máximo número de pasos a grabar.

**Figura A.16.** Definición del número de pasos para el análisis



El menú “Nonlinear Parameters”, muestra todos los parámetros referentes a los procesos de cálculo del análisis “pushover”.

**Figura A.17.** Parámetros definidos para el análisis “pushover”



El número total de pasos puede ser alterado de tal manera que se pueda conseguir el máximo número de puntos posibles para definir la curva de capacidad de la estructura. Sin embargo, no conviene exceder demasiado el número de pasos que se quiere en cada análisis, pues esto puede conllevar a una demora en la convergencia e inestabilidad en los resultados esperados.

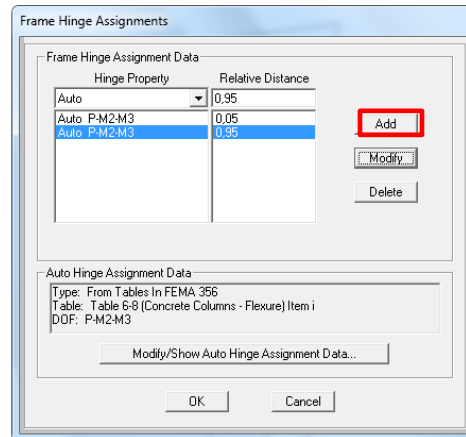
#### **A.4 DEFINICIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS**

Una vez definido el modelo de la estructura y las cargas no lineales, se definen las rótulas plásticas en los elementos modelados con “frames” con el fin de atribuir el comportamiento no lineal. En el presente trabajo, se especifica la asignación de rótulas según la definición automática incluida en el software SAP2000 a partir de las referencias dadas por el FEMA356.

Para este proceso, se selecciona el elemento y se asignan las rótulas en las distancias relativas a los extremos de los elementos con los siguientes comandos:

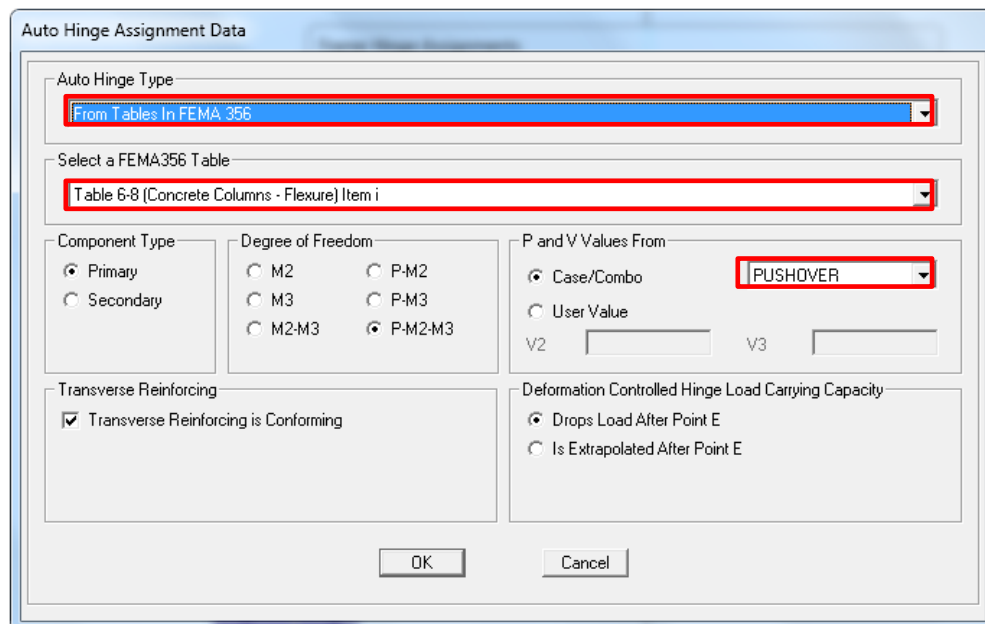
Assign > Frame > Hinges

**Figura A.18.** Definición de rótulas plásticas



En el siguiente comando se define el tipo de rótula, los criterios del FEMA356 según el elemento correspondiente y el tipo de carga no lineal para el análisis.

**Figura A.19.** Rótulas automáticas definidas en SAP2000



## **A. 5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

Después de correr el modelo y efectuar el análisis pushover, es posible observar la curva de capacidad de la estructura. Para obtener el resultado es necesario utilizar los siguientes comandos:

Display > Show Static Pushover Curve

También existe la posibilidad de observar el lugar donde ocurren las rótulas plásticas y la evolución del mecanismo de rotura a través de los siguientes comandos:

Display ->Show Deformed Shape

## ANEXO B. MODELACIÓN DE MUROS CON ELEMENTOS “SHELL LAYERED”

En el presente anexo se definen los pasos básicos para efectuar un análisis pushover en un muro estructural en concreto reforzado mediante la utilización de elementos “Shell multi-layered”.

El modelo seleccionado es el modelo rectangular (RW2) de Thomson y Wallace estudiado en el presente trabajo.

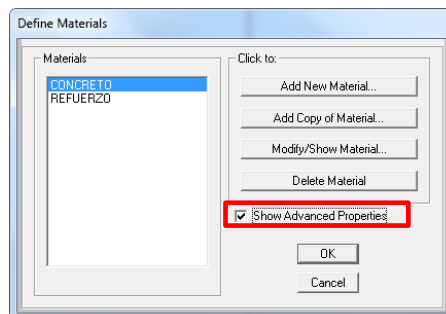
### ANEXO B. 1 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Para realizar un análisis “pushover” es necesario definir las propiedades de los materiales teniendo en cuenta su comportamiento no lineal.

**B.1.1 Definición del concreto.** Para definir el comportamiento del concreto se puede tomar algunos de los modelos revisados en el capítulo 4 del presente trabajo. En este caso se utiliza el modelo de Hognestad con un comportamiento elástico-plástico perfecto después del punto de cedencia. Para esto se siguen los siguientes comandos:

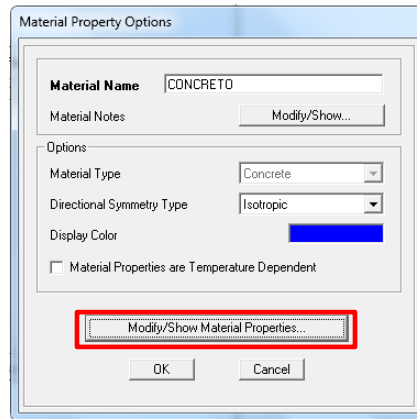
*Define > Materials > Add new materials -> Show advanced properties -> Add new material -> Modify/Show material properties*

**Figura B.1.** Definición de materiales



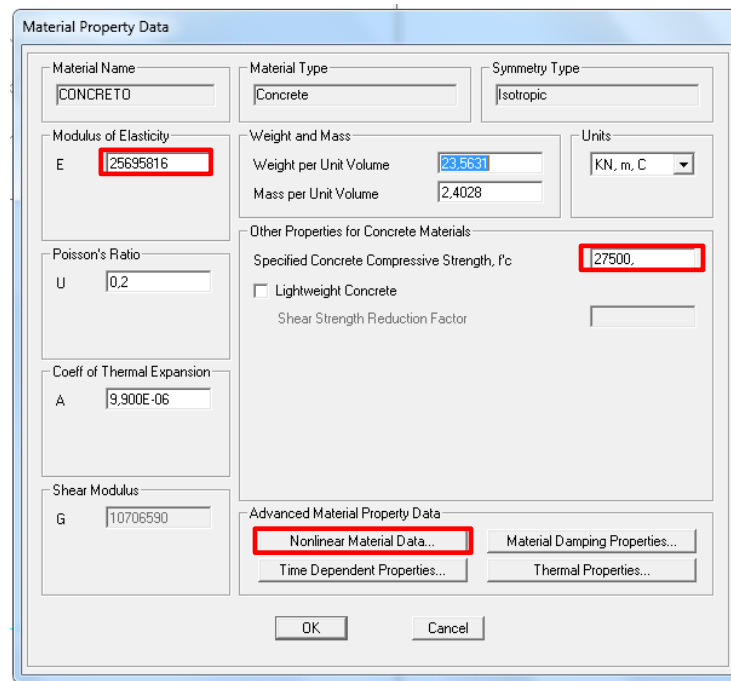
En la siguiente ventana se definen “*Material Type*” y “*Directional Symmetry Type*”

**Figura B.2.** Definición del tipo de material



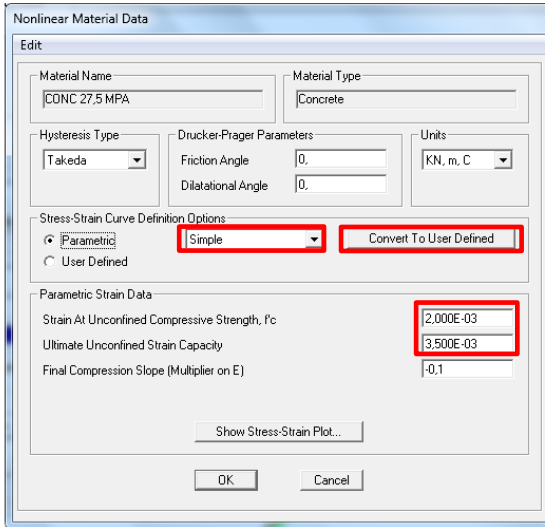
A continuación se definen las características del material y se ingresa al menú “*Nonlinear Material Data...*” donde se definirán las características no lineales del material.

**Figura B.3.** Definición de propiedades del material



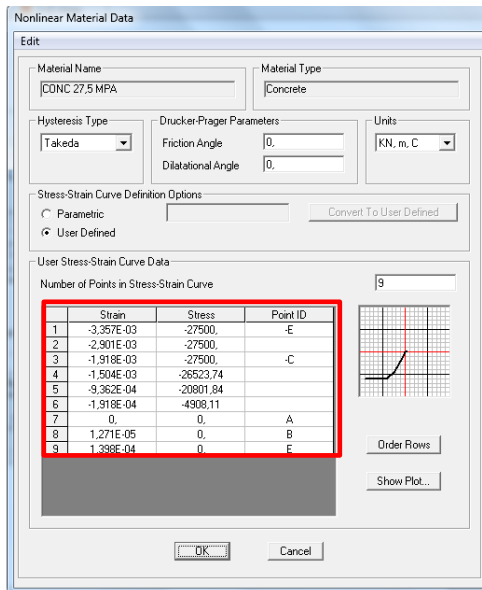
En la siguiente ventana se definen las tensiones de cedencia y rotura y las respectivas deformaciones.

**Figura B.4.** Definición de modelo del concreto



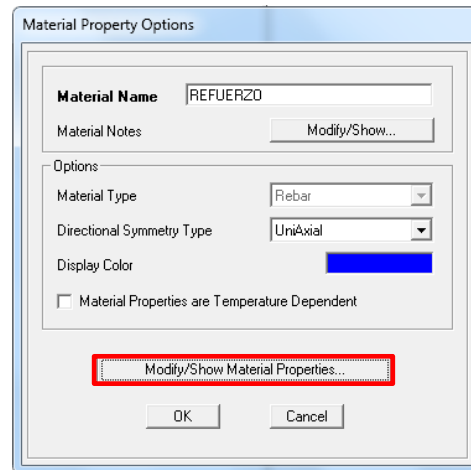
En “*Conver To User Defined*” se puede alterar manualmente los puntos que definen la curva tensión deformación.

**Figura B.5.** Curva esfuerzo deformación del concreto definido por el usuario.



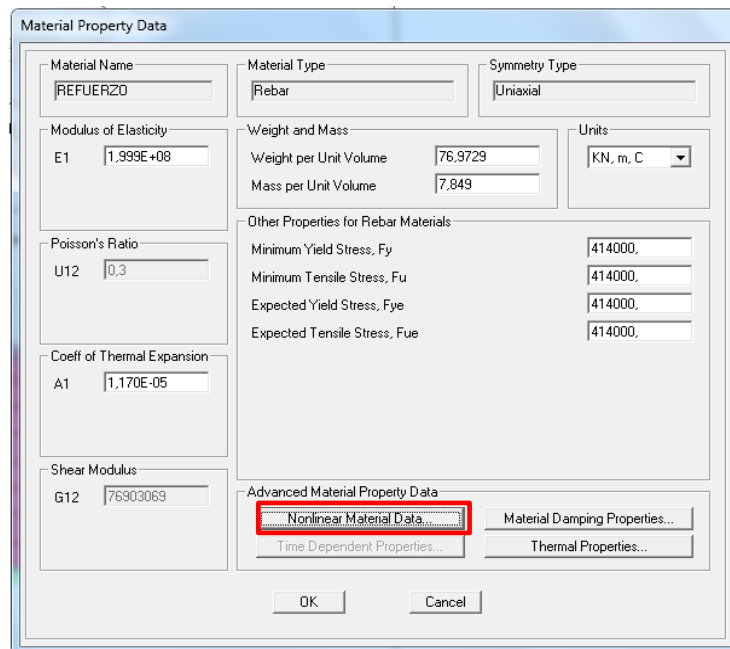
**B.1.2 Definición del acero.** La definición del acero se realiza siguiendo los mismos pasos que la definición para el concreto, sólo es necesario modificar algunos parámetros.

**Figura B.6.** Definición del acero



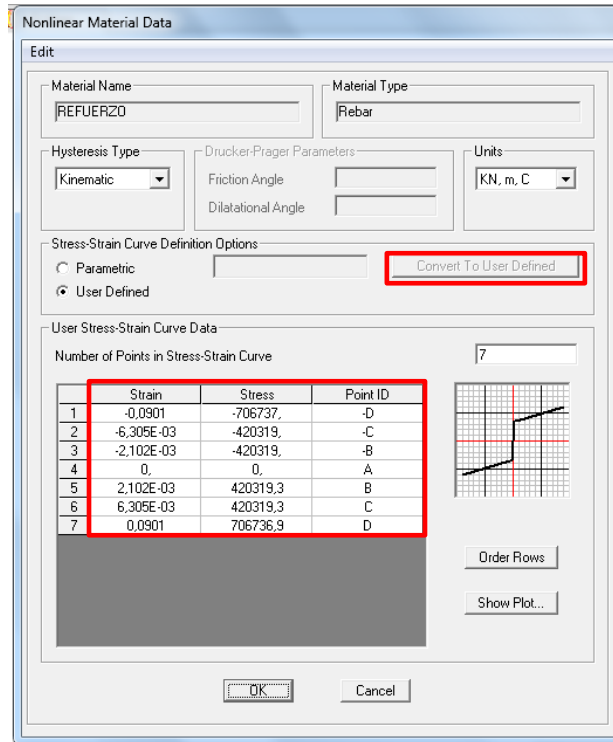
En “*Nonlinear Material Data ...*” se definen las propiedades no lineales del material.

**Figura B.7.** Definición de las propiedades del acero



En el siguiente comando es posible definir manualmente la curva esfuerzo-deformación para el acero:

**Figura B.8.** Curva esfuerzo deformación para el acero definida por el usuario



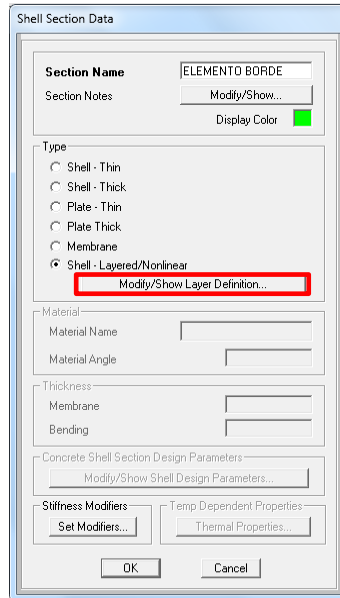
## ANEXO B. 2 DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN

Después de definir el comportamiento no lineal de los materiales, se realiza la modelación de los elementos. Para esto es importante definir los materiales constituyentes del elemento en estudio.

Es posible definir la sección a través de los siguientes comandos:

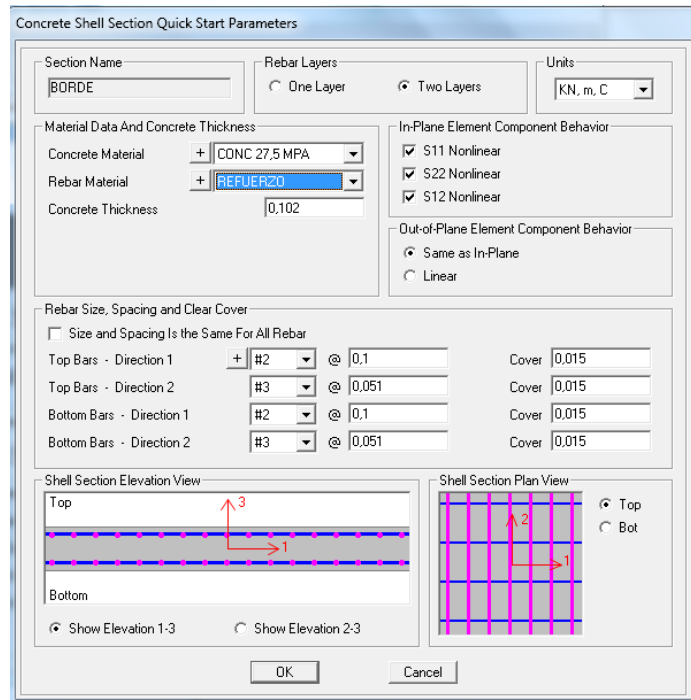
*Define > Section properties > Area section > Add new Section*

**Figura B.9.** Definición del material no lineal en capas “shell-layered”



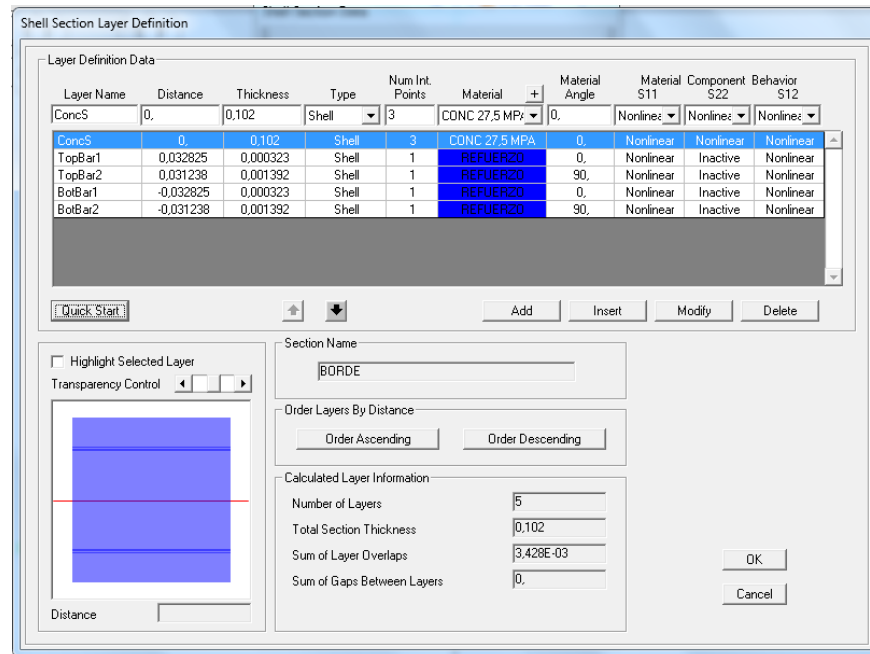
Es posible definir las capas del material compuesto manualmente, para esto es práctico utilizar el comando “*Quick Start*”

**Figura B.10.** Definición de la sección a modelar en capas



En el menú “Quick Start” se define el material base de la sección, el material suministrado para el refuerzo, espesor de la sección, recubrimiento y espaciamiento.

**Figura B.11.** Material definido en capas por el programa



## ANEXO B. 3 DEFINICIÓN DE CARGAS

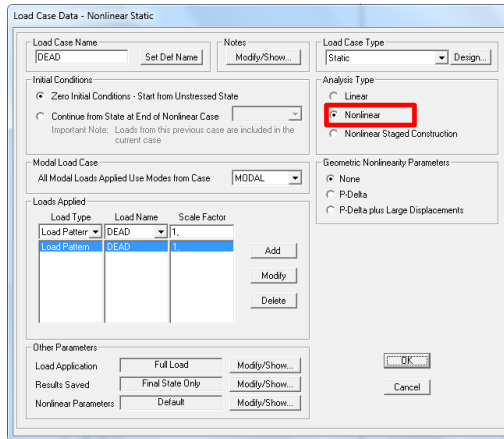
Es importante tener en cuenta que el “Pushover” es un análisis no lineal, por lo tanto los casos de carga deben estar definidos en el rango no lineal. En el presente trabajo las cargas definidas fueron: DEAD y PUSHOVER.

### B.3.1 Carga DEAD

Para modelar la carga gravitacional no lineal se siguen los pasos:

*Define > Load Cases > Modify/Show load case*

**Figura B.12.** Definición de carga muerta no lineal

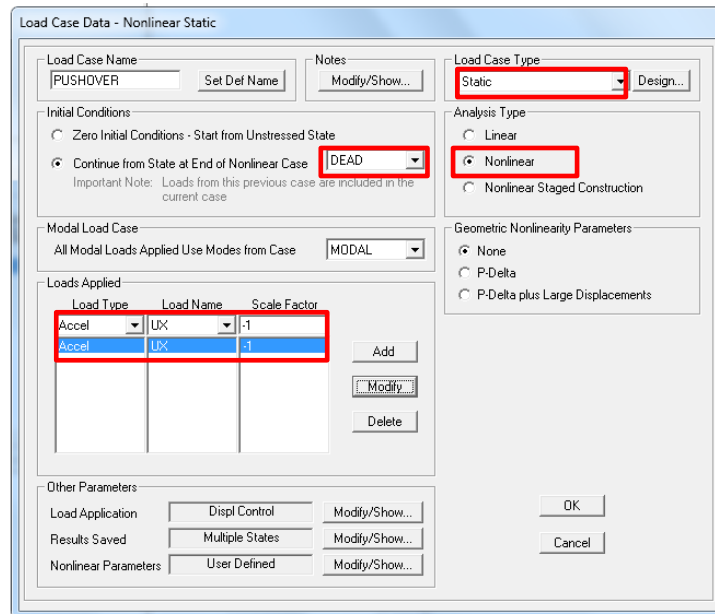


### B.3.2 Carga PUSHOVER

Para definir la carga que representa el análisis estático no lineal, se define un nuevo caso de carga no lineal con los siguientes pasos:

*Define > Load Cases > Add New Load Case*

**Figura B.13.** Definición de cargas estática no lineal “pushover”



Es importante aclarar que la carga “pushover” puede ser “uniforme” o “modal”.

Los pasos de cada tipo de carga se definen a continuación:

Para aplicar carga uniforme es necesario definir los siguientes parámetros:

Load Case type > Static;

Continue from State at end of Nonlinear Case > DEAD;

Analysys type > Nonlinear;

Loads Aplied > Load Type > Acceleration;

Loads Aplied > Load Name (Depende de la dirección de análisis);

Loads Aplied > Scale Factor (-1, para obtener una deformación con desplazamientos positivos).

Para aplicar carga modal es necesario definir los siguientes parámetros:

Load Case type > Static

Continue from State at end of Nonlinear Case > DEAD

Analysys type > Nonlinear

Loads Aplied > Load Type > Modal

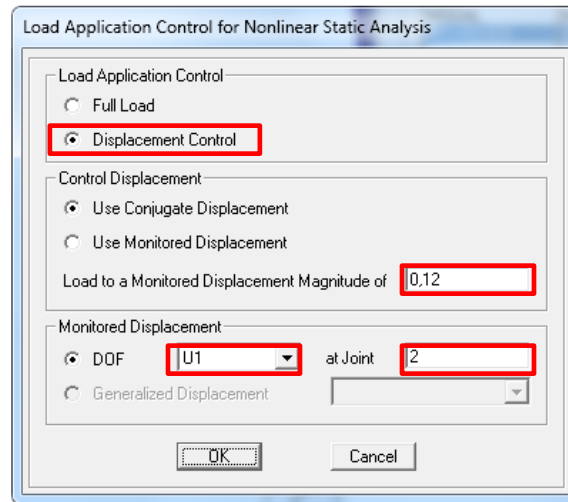
Loads Aplied > Load Name (Depende del modo de vibración dominante en la dirección de estudio)

Loads Aplied > Scale Factor (-1 o 1, depende de la deformación del modo de vibración)

Después de definir la carga es importante definir el modo de aplicación y el almacenamiento de los resultados en los comandos Load Application – Results Saved – Nonlinear Parameters.

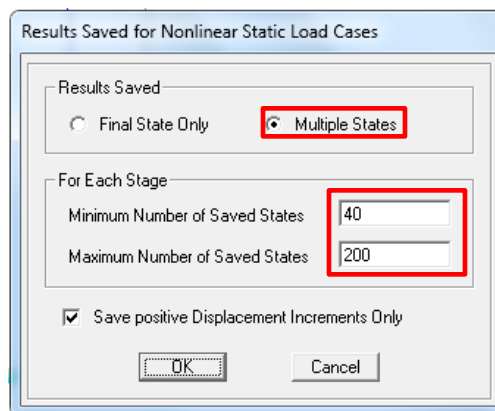
En “Load Application” se carga como “Displacement Control” y se selecciona un punto para el cual el programa registra el desplazamiento en cada paso, hasta el máximo valor de este último.

**Figura B.14.** Definición del punto y desplazamiento de control.



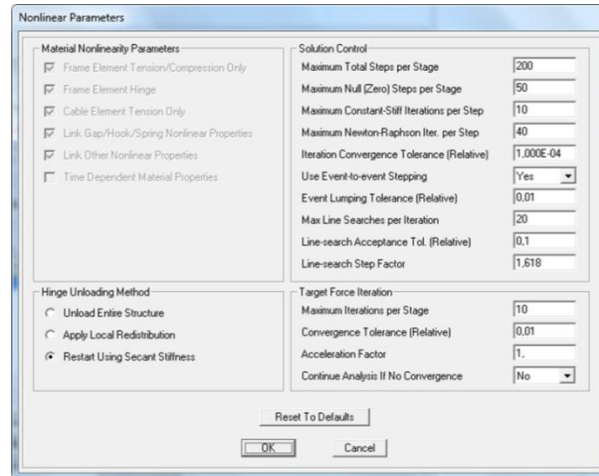
Los resultados del “pushover” son definidos en múltiples estados. Se definen el mínimo y el máximo número de pasos a grabar.

**Figura B.15.** Definición del número de pasos para el análisis “pushover”.



El menú “Nonlinear Parameters”, muestra todos los parámetros referentes a los procesos de cálculo del análisis “pushover”.

**Figura B.16.** Parámetros definidos para el análisis pushover



El número total de pasos puede ser alterado de tal manera que se pueda conseguir el máximo número de puntos posibles para definir la curva de capacidad de la estructura. Sin embargo, no conviene exceder demasiado el número de pasos que se quiere en cada análisis, pues esto puede conllevar a una demora en la convergencia e inestabilidad en los resultados esperados.

#### **ANEXO B. 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

Después de correr el modelo y efectuar el análisis pushover, es posible observar la curva de capacidad de la estructura. Para obtener el resultado es necesario utilizar los siguientes comandos: *Display > Show Static Pushover Curve*

También existe la posibilidad de observar el lugar donde ocurren las rótulas plásticas y la evolución del mecanismo de rotura a través de los siguientes comandos: *Display > Show Deformed Shape*