



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

“Evaluación de factores de reducción de rigidez para la modelación lineal equivalente de losas de acoplamiento en edificios de muros con sección compuesta de hormigón armado”

Memoria de Título presentada por

Pablo Andrés Pinto Rodríguez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
MSc. Claudio Ignacio Sepulveda Contreras

Mayo de 2022



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**EVALUACIÓN DE FACTORES DE REDUCCIÓN DE RIGIDEZ PARA LA
MODELACIÓN LINEAL EQUIVALENTE DE LOSAS DE
ACOPLAMIENTO EN EDIFICIOS DE MUROS CON SECCIÓN
COMPUESTA DE HORMIGÓN ARMADO**

AUTOR:

PABLO ANDRÉS PINTO RODRÍGUEZ

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

Claudio Sepulveda Contreras

Cristian Cruz Doggenweiler

EVALUACIÓN DE FACTORES DE REDUCCIÓN DE RIGIDEZ PARA LA MODELACIÓN LINEAL EQUIVALENTE DE LOSAS DE ACOPLAMIENTO EN EDIFICIOS DE MUROS CON SECCIÓN COMPUESTA DE HORMIGÓN ARMADO

Pablo Pinto R.¹, Claudio Sepúlveda C¹.

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Este trabajo estudia las variaciones en la respuesta sísmica de una configuración estructural estándar de edificios residenciales en Chile, el sistema está compuesto por muros acoplados mediante losas de piso, geometría comúnmente utilizada como parte del sistema sismorresistente por su considerable rigidez y resistencia lateral. La evaluación se hace en base al nivel de carga axial que se obtiene en los muros según el tipo de modelación realizada, dicho parámetro da cuenta del nivel de acoplamiento del sistema. Se proponen factores de reducción de rigidez para la modelación lineal equivalente de losas de forma tal que permitan asemejarse al nivel de acoplamiento esperado en los muros en el rango no lineal ante demandas sísmicas de importancia, lo cual se simula a partir de análisis estático no lineal y se corrobora mediante análisis dinámico no lineal.

Palabras claves: Análisis no lineal, hormigón armado, muros, losas de acoplamiento.

1 Introducción

1.1 Motivación y oportunidad de investigación

En Chile y el mundo, la mayoría de los diseños estructurales se basan en el análisis lineal ya que es una metodología que ahorra iteraciones y que además en términos de asegurar en forma global el diseño estructural ha funcionado. Sin embargo, la premisa de una relación perfectamente proporcional fuerza-desplazamiento resulta poco realista, aún más si se considera solicitaciones sísmicas de importancia, ante las cuales una estructura incursiona en el rango no lineal y varía sus propiedades de rigidez. En este contexto, surge la idea de estudiar el comportamiento de un diseño característico de edificios residenciales chilenos, el cual consta de muros acoplados mediante losas. Las losas de acoplamiento son elementos que concentran grandes demandas de deformación y en consecuencia daño ante solicitaciones sísmicas, lo cual se traduce en una variación en el nivel de acoplamiento de los muros conectados por la misma. Lo anterior, induce a la interrogante sobre qué rigidez considerar en estos elementos al momento de realizar el análisis lineal. El código ACI 318 propone factores de reducción de rigidez para simular la distribución de fuerzas en el rango no lineal mediante una modelación lineal equivalente, sin embargo, son factores calibrados para geometrías estructurales extranjeras que podrían distar de las nacionales. Trabajos previos aplicados al caso nacional (Ramos & Hube, 2021), han dejado en evidencia que existen diferencias en la respuesta sísmica de este tipo de sistemas según la reducción de rigidez considerada en la modelación lineal equivalente respecto a los resultados que entrega el análisis no lineal. Adicionalmente, la adecuada reducción de rigidez a contemplar en losas, también es útil en el marco de ingeniería sísmica basada en desempeño. En esta metodología, la mayor parte de las veces, la modelación no lineal se realiza en elementos como vigas, columnas y muros, en cambio las losas debido al costo computacional que pueden implicar, son consideradas a través de la asignación de diafragmas rígidos o bien, como elementos lineales de rigidez reducida. Complementando aquello, este trabajo busca estimar una correlación que permita aproximarse al nivel de acoplamiento que produce la losa en los muros en el rango no lineal a través de un factor de reducción de rigidez para la modelación lineal equivalente, realizando para ello análisis estático y dinámico no lineal.

1.2 Objetivo general

El objetivo general del trabajo es determinar factores de reducción de rigidez para la modelación lineal de losas de hormigón armado, que puedan simular el nivel de acoplamiento que estas generan en los muros de un edificio habitacional chileno.

1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos se describen a continuación:

1. Comparar en el software OpenSees la respuesta no lineal de carga axial en muros de hormigón armado modelados a través del elemento MVLEM-3D (Multi Vertical Line Element), al estar acoplados mediante losas, las cuales se modelan de forma lineal equivalente (con reducción de rigidez) y no lineal a través de elementos basados en secciones fibra.
2. Obtener factores de reducción de rigidez apropiados para la modelación lineal equivalente de las losas de acoplamiento en la tipología estándar de edificio habitacional chileno en base a parámetros de diseño como cuantía de acero de refuerzo y espesor de losa.
3. Corroborar los factores de reducción obtenidos mediante análisis dinámico no lineal tiempo-historia.

1.4 Metodología ajustada

El plan metodológico busca dar cumplimiento a los objetivos planteados. A continuación, se describen las principales etapas del trabajo, cuyos resultados son presentados en las secciones que continúan de este documento.

- Marco teórico. Revisión bibliográfica vinculada al sistema estructural en estudio y a elementos de modelación no lineal. Se presentan resultados de investigaciones numéricas y experimentales relacionadas a la respuesta sísmica de muros acoplados mediante losas.
- Descripción del caso en estudio. Se resumen antecedentes de trabajos previos vinculados a la estructura.
- Modelación. Se corroboran parámetros dinámicos de la estructura mediante la elaboración de modelos de elementos finitos lineales en los softwares SAP2000 y OpenSees. Luego, de acuerdo con el primer objetivo específico, se elabora un modelo en el software OpenSees con muros no lineales utilizando el elemento de modelación MVLEM-3D (Kolozviri et al., 2021) y dos tipos de modelaciones de losas: lineal equivalente, la cual contempla elementos frame lineales con reducción de rigidez y no lineal mediante elementos basados en secciones fibra.
- Análisis y resultados. Se ejecuta en ambos modelos un análisis estático incremental (pushover). Se evalúa en el modelo con losa lineal equivalente un rango de factores de reducción de rigidez. Se compara la respuesta entre modelos en términos de la carga axial en los muros, esto con el objetivo de obtener un factor de reducción de rigidez que genere una equivalencia de carga axial en los muros entre el modelo con losas no lineales y lineales equivalentes al nivel de desplazamiento último (δ_u) definido en NCh433 Of. 1996 Mod. 2009– DS 61 2011. Se estudia la respuesta en cada losa de piso a través de curvas fuerza-desplazamiento, con el objetivo de corroborar el factor propuesto. Se analiza la sensibilidad de factores de reducción de rigidez para un rango de cuantías de acero de refuerzo y espesores de losa. Finalmente, se corrobora los resultados obtenidos a través de un análisis dinámico no lineal tiempo-historia.
- Conclusiones y comentarios. Se discuten y analizan los resultados obtenidos contrastando con resultados de trabajos previos y referencias de la literatura. Se proponen tópicos relacionados para futuras investigaciones.

1.5 Diagrama de actividades

El diagrama de la Ilustración 1, presenta la secuencia de actividades que permiten dar cumplimiento a cada objetivo específico del trabajo, la revisión bibliográfica resulta necesaria en cada actividad a realizar.

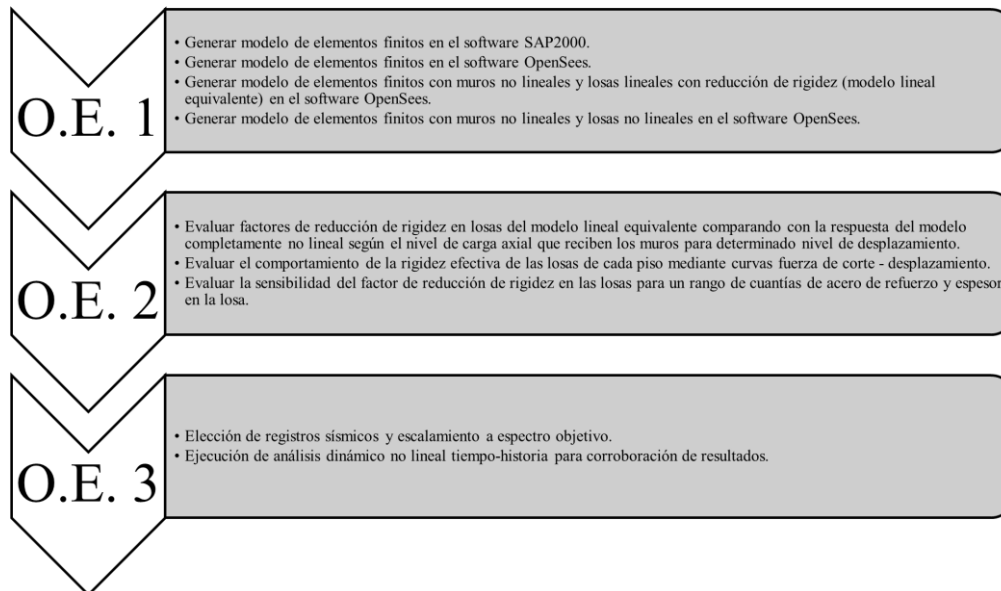
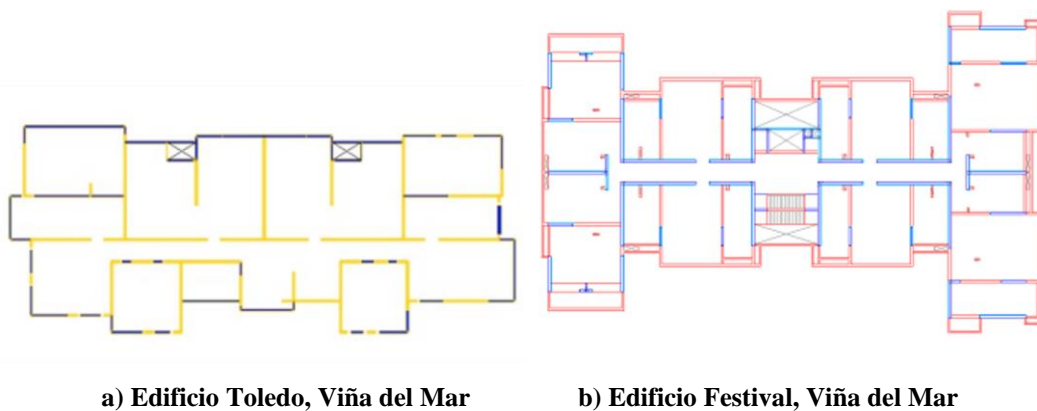


Ilustración 1. Plan de trabajo. Esquema de objetivos y actividades.

2 Marco teórico

2.1 Tipología de edificios residenciales chilenos

La tipología más común de edificios habitacionales de hormigón armado en Chile consiste en la denominada “espina de pescado”, la cual resiste tanto las cargas gravitacionales como laterales. La estructuración típica de edificios residenciales está caracterizada por muros paralelos a la zona de corredor y muros cortos transversales a esta. En esta configuración, la porción de losa ubicada en la zona de pasillo produce el efecto de acoplamiento entre los muros que se enfrentan, los cuales la mayoría de las veces suelen ser de sección compuesta, es decir generando geometrías tales como T, C y L, entre las más comunes. La Ilustración 2 presenta la tipología descrita.



a) Edificio Toledo, Viña del Mar

b) Edificio Festival, Viña del Mar

Ilustración 2. Plantas típicas de edificio habitacional chileno. (Carvallo & Alcaíno, 2012)

2.2 Comportamiento sísmico en losas de acoplamiento

Diversas investigaciones han estudiado la respuesta estructural de sistemas de muros acoplados con losas. Particularmente, uno de los efectos que ha sido observado en forma experimental es la temprana concentración de esfuerzos en los elementos de acople durante ciclos de carga laterales, dando cuenta que dichos elementos actúan como primera fuente de disipación de energía ante un sismo severo (Paulay & Taylor, 1981), traduciéndose en variaciones de rigidez efectiva y en consecuencia en el nivel de acoplamiento entre los muros. Investigaciones recientes (Ramos & Hube, 2020) han estudiado los distintos elementos que acoplan muros en edificios de hormigón armado dando cuenta que la mayor contribución en términos de la carga axial sísmica que se transfiere en ellos se produce debido al acoplamiento de las losas, contribuyendo con más del 90% de la carga, seguido por muros adyacentes y vigas de acople. La misma investigación dio cuenta que la rigidez que se asume en los elementos estructurales presenta una significativa influencia en la demanda de carga axial predicha en los muros. Al variar la rigidez efectiva de una losa de 25% a 40% la inercia de la sección bruta, la carga axial en los muros incrementa en promedio en un 26%.

Respecto al tipo de modelación utilizada para evaluar el comportamiento sísmico de estos sistemas, investigaciones recientes (Ramos & Hube, 2021) han dejado en evidencia que existen diferencias en la respuesta obtenida en los muros de acuerdo con el tipo de modelación que se utiliza para las losas, habiendo analizado diferentes factores de agrietamiento junto con la modelación no lineal de estas, lo anterior se aprecia en la Ilustración 3, en la cual se presenta la respuesta en términos del corte basal normalizado por el peso sísmico de la estructura para las siguientes modelaciones:

- LS100: Modelación no lineal de muros – Modelación lineal equivalente de losas con 100% de rigidez.
- LS40: Modelación no lineal de muros – Modelación lineal equivalente de losas con 40% de rigidez.
- LS25: Modelación no lineal de muros – Modelación lineal equivalente de losas con 25% de rigidez.
- LS10: Modelación no lineal de muros – Modelación lineal equivalente de losas con 10% de rigidez.
- NLS1: Modelación no lineal de muros – Modelación no lineal de losas.

En los resultados, se puede notar que para todo el rango de desplazamiento estudiado, no hay una tendencia clara entre las modelaciones lineales equivalentes respecto a la no lineal, traduciéndose en distintas respuestas del sistema estructural.

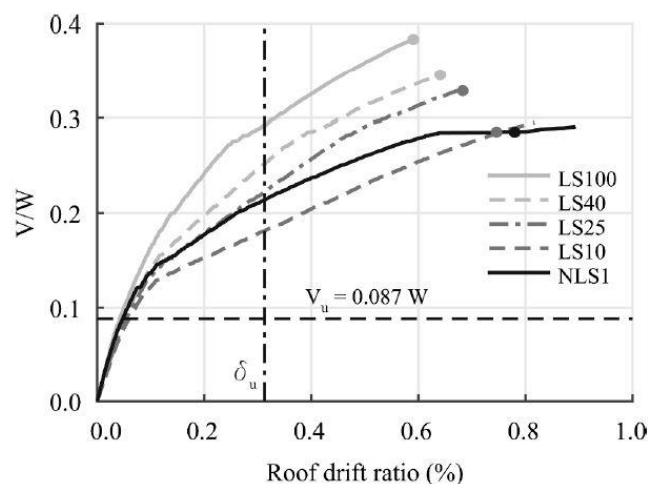


Ilustración 3. Variación en el corte basal obtenido según el tipo de modelación. (Ramos & Hube, 2021)

2.3 Elementos de modelación no lineal

La modelación no lineal de un sistema estructural contempla la utilización de elementos que permitan simular computacionalmente la respuesta de la estructura más allá del rango lineal elástico. La capacidad que tenga el modelo de predecir la respuesta del sistema resulta relevante, particularmente en el contexto de las actuales metodologías de diseño sísmico basado en desempeño. A continuación, se describen elementos de modelación no lineal que son de utilidad para el desarrollo de este trabajo.

2.3.1 Modelación de muros

Los muros constituyen uno de los sistemas principales resistente a acciones laterales utilizados en edificios, particularmente en zonas de alta actividad sísmica. En base a lo anterior, es que se han desarrollado diversos elementos de modelación para simular el comportamiento no lineal que tendrán estas estructuras ante la acción de un sismo severo. Entre estos elementos de modelación numérica, se pueden identificar dos grupos (Pozo et al., 2020) 1) micro-modelos; 2) macro-modelos. El primer grupo, puede estimar detalladamente la respuesta en los muros, pero a un elevado costo computacional. Por otra parte, los macro-modelos, son más eficientes computacionalmente y pueden predecir de buena forma el comportamiento histerético de los muros. En esta última clasificación, se puede hacer la distinción entre elementos con interacción carga axial-momento desacoplados del comportamiento a corte e interacción carga axial-momento-corte. Asociado a la primera distinción, es donde se encuentra el modelo tridimensional para simular el comportamiento no lineal de muros MVLEM-3D (Multi Vertical Line Element), el cual es una extensión de la versión bidimensional del mismo elemento (comportamiento en el plano) en combinación con el modelo de placa de Kirchhoff para representar el comportamiento fuera del plano. Es un elemento tipo panel de plasticidad distribuida, con 4 nodos y 6 grados de libertad en cada uno de ellos, la Ilustración 4 presenta un esquema del elemento. De acuerdo con la implementación computacional (Kolozvari et al., 2021), el modelo posee una alta estabilidad numérica y presenta una buena correlación respecto a los casos experimentales evaluados en el mismo trabajo. Además, es capaz de capturar con precisión el comportamiento cíclico carga-desplazamiento de muros no planos, particularmente en la dirección de carga paralela al eje principal de la sección de muro.

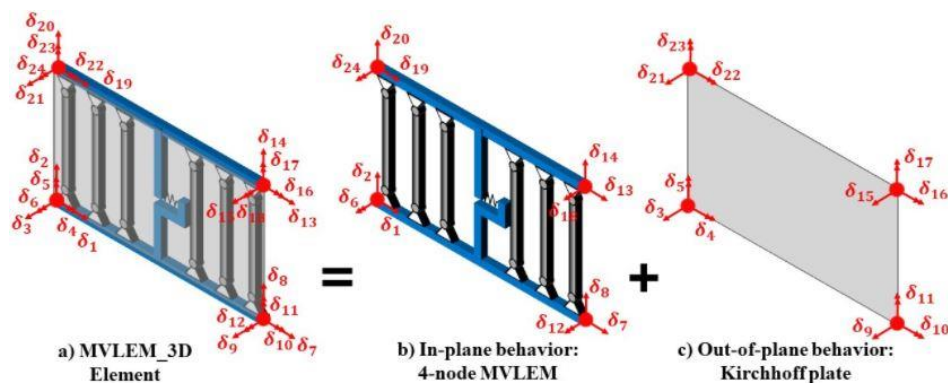


Ilustración 4. Elemento de modelación de muros MVLEM-3D. (Kolozvari et al., 2021)

2.3.2 Modelación no lineal de elementos viga-columna

Dentro del abanico de tipos de formulaciones para elementos viga-columna no lineales se encuentran los elementos de plasticidad distribuida. Dentro de este grupo, existen dos tipos de formulaciones: elementos basados en desplazamiento y basados en fuerza. Los elementos basados en desplazamientos se fundamentan en el principio de desplazamientos virtuales, bajo el supuesto de un campo de desplazamientos lineal impuesto a partir de funciones de forma (polinomios de interpolación), de forma tal que el equilibrio de fuerzas a nivel nodal en el elemento es satisfecho, sin necesidad de que fuera del rango lineal ocurra lo mismo a nivel seccional (equilibrio en la forma débil). Por otra parte, los elementos basados en fuerzas se enmarcan en el principio de fuerzas virtuales, con el cual se utilizan funciones de interpolación para definir la distribución de fuerzas internas a lo largo del elemento. Así, el campo de desplazamientos y de deformaciones en él, dependen de la respuesta a nivel seccional, la cual se obtiene a partir del equilibrio de fuerzas en la misma (Scott et al., 2004). En general, un elemento basado en fuerzas posee como ventaja la capacidad de capturar de mejor manera la respuesta del elemento en el

rango no lineal, ya que su supuesto principal es el equilibrio de fuerzas, el cual es válido en todo el rango de comportamiento del material (lineal o no lineal), y en todo el dominio del elemento, sin embargo, no ocurre lo mismo en un elemento basado en desplazamientos, en el cual la suposición de un campo de desplazamientos lineal pierde validez al sobrepasar dicho límite de comportamiento en el material, con lo cual el equilibrio de fuerzas a nivel seccional deja de ser consistente y solo se cumple en términos de fuerzas nodales pero no al interior del elemento. Dependiendo de la respuesta esperada y el foco del estudio que se desea realizar, resulta conveniente utilizar uno u otro. Por ejemplo, si se busca obtener fuerzas en un elemento a nivel seccional, o el análisis de elementos con un alto acoplamiento momento-carga axial, la utilización de un elemento basado en fuerzas resulta apropiada, no obstante, se debe contemplar que mantener en este tipo de elemento el equilibrio de fuerzas implica un ciclo iterativo adicional, lo cual numéricamente podría representar una mayor dificultad en su convergencia y un mayor costo computacional. En contraste, si el análisis se centra en la respuesta global de un elemento a nivel nodal y se desea asegurar la convergencia numérica, la utilización de un elemento basado en desplazamientos es adecuada.

3 Caso de estudio

3.1 Sistema estructural

El sistema estructural por analizar corresponde a una simplificación de edificio de muros de hormigón armado de sección compuesta el cual posee investigaciones previas ligadas al tema en estudio (Ramos & Hube, 2021). La elección se basa en que al existir trabajo previo, este permite corroborar parámetros dinámicos y ahondar en los tópicos propuestos para futuras investigaciones en el mismo. La geometría de este edificio fue determinada considerando características de 36 edificios dañados durante el terremoto del Maule el año 2010 (Jünemann et al., 2015). El edificio en estudio es de hormigón armado, consta de 16 pisos y posee 41.6 metros de altura. La estructura posee una geometría en planta característica de los edificios residenciales chilenos, llamada “espina de pescado” representada por muros de sección “T” enfrentados, los cuales se ven acoplados por la losa de piso en la zona de corredor. Particularmente, el trabajo se centra en analizar el comportamiento en la dirección fuerte de la subestructura representativa del edificio completo, lo cual se señala mediante flechas y por línea segmentada en la Ilustración 5, es decir dos muros de sección “T” cuyos extremos de alma se someten a compresión-tracción y quedan acoplados por la losa en la zona de corredor, considerando un ancho tributario a ellos en base a las dimensiones de esta. Debido a la regularidad de los muros de la estructura, así como la simetría que esta presenta, no se hace mayor énfasis en la estimación de un ancho efectivo de losa para analizar el acoplamiento.

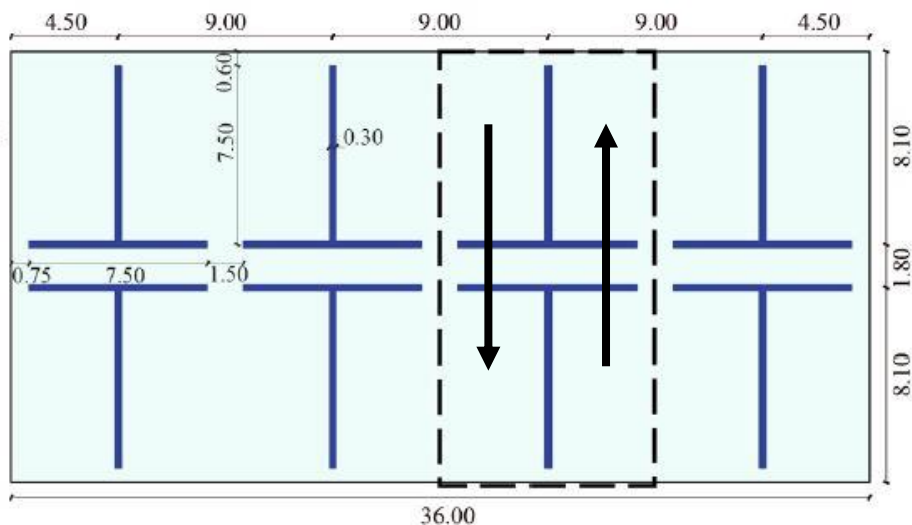


Ilustración 5. Geometría en planta de la estructura en estudio. (Ramos & Hube, 2021)

Las Tabla 1 resume las dimensiones del edificio, así como de la subestructura a analizar.

Tabla 1. Características edificio en estudio. (Ramos & Hube, 2021)

| | |
|---|-----------|
| Grado hormigón | G 25 |
| Tipo de acero | A630-420H |
| Número de pisos | 16 |
| Subterráneos | No |
| Altura entre pisos | 2.6 [m] |
| Altura total edificio | 41.6 [m] |
| Largo en planta | 36 [m] |
| Ancho en planta | 18 [m] |
| Subestructura: Largo en planta | 18 [m] |
| Subestructura: Ancho en planta | 9 [m] |
| Longitud alma muro | 7.5 [m] |
| Longitud ala muro | 7.5 [m] |

Los espesores y acero de refuerzo provisto en muros y losas del edificio se presentan en la Tabla 2. La cuantía de refuerzo longitudinal distribuido en el muro satisface la mínima exigida por la normativa de diseño, $\rho_l = 0.0025$. De forma análoga se distribuye el refuerzo transversal en el muro.

Tabla 2. Detallamiento espesor y acero de refuerzo en muros y losas. (Ramos & Hube, 2021)

| | |
|--|--|
| Espesor de muros | 30 [cm] |
| Refuerzo distribuido | DM ϕ 10 @ 20 [cm] |
| ρ_l | 0.0025 |
| Espesor de losas | 15 [cm] |
| Refuerzo distribuido | DM ϕ 8 @ 16 [cm] |
| ρ_l | 0.002 |
| Longitud refuerzo de borde | 110 [cm] |
| Refuerzo longitudinal de borde | 16 ϕ 18 @ 15 [cm] |
| Confinamiento de borde | 1 E ϕ 12 + 6 Tr ϕ 12 @ 20 [cm] |
| Longitud refuerzo intersección ala-alma | 65 [cm] |
| Refuerzo longitudinal intersección ala-alma | 10 ϕ 18 @ 15 [cm] |
| Confinamiento intersección ala-alma | 1 E ϕ 12 + 6 Tr ϕ 12 @ 20 [cm] |

En complemento, la Ilustración 6 exhibe el detallamiento del refuerzo de borde. El caso en estudio simula un edificio habitacional localizado en Santiago, por lo que según la clasificación de DS61, el suelo corresponde a categoría C, zona sísmica II y categoría de importancia 2. El edificio posee como antecedentes un peso sísmico de 102080 [kN], el cual es calculado como $D + 0.25L$, donde las cargas permanentes (D) y cargas vivas (L) consideradas en cada piso son de 2 [kN/m²]. La dirección de análisis de esta estructura corresponde a la dirección paralela al alma del muro, es decir generando ala y extremo del alma en tracción-compresión. La Tabla 3 resume los antecedentes de parámetros sísmicos que posee del edificio.

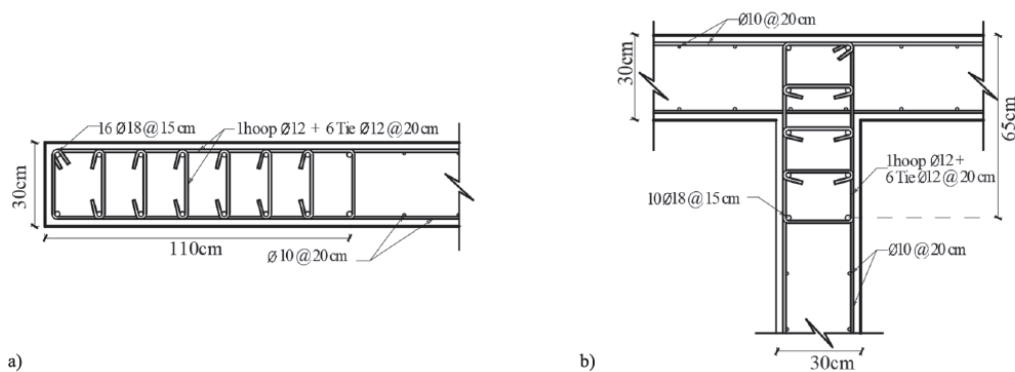


Ilustración 6. Detallamiento del refuerzo longitudinal y confinamiento de borde. (Ramos & Hube, 2021).

Tabla 3. Antecedentes de parámetros sísmicos del edificio. (Ramos & Hube, 2021)

| | |
|---|------------------------|
| Cargas permanentes (D) | 2 [kN/m ²] |
| Cargas vivas (L) | 2 [kN/m ²] |
| Peso sísmico (W = D + 0.25L) | 102080 [kN] |
| Suelo | C |
| Categoría | 2 |
| Zona sísmica | II |
| Período | 0.613 [s] |
| V_{elástico} | 46920 [kN] |
| V_{elástico} / W | 0.459 |
| R* | 7.4 |
| V_{Reducido} | 6340.5 [kN] |
| V_{Reducido} / W | 0.062 |
| V_u (1.4 V_{Reducido}) | 8876 [kN] |

4 Modelación

El estudio de la respuesta sísmica del sistema contempla dos tipos de modelaciones: i) modelo con muros no lineales y losas de acoplamiento como elementos lineales con reducción de rigidez; ii) modelo con muros no lineales y losa no lineal. Lo anterior, en busca de analizar el comportamiento de los muros en función de la carga axial que estos reciben debido a la acción de acoplamiento que produce la losa según la variación de rigidez que esta presenta ante solicitaciones sísmicas. Cabe destacar que el modelo con losa lineal elástica equivalente, busca representar el modelo típicamente utilizado en el proceso de diseño, el cual es completamente elástico. Sin perjuicio de lo anterior, la definición de los muros se realiza como elementos no lineales. Esto se justifica en que:

- i) Permite no solo analizar los niveles de carga axial que ofrecen las diferentes modelaciones, sino que además otorga la posibilidad de comparar el efecto que tienen los diferentes niveles de carga axial en la respuesta global del sistema.
- ii) Cuando se modelan edificios de forma no lineal, muchas veces en el contexto de ingeniería sísmica basada en desempeño, el efecto de las losas en el acoplamiento de muros se omite o en su defecto se modela mediante elementos lineales con propiedades efectivas, tal como se realiza en este trabajo.

La dirección de análisis considera la carga sísmica actuando en dirección paralela al eje del alma (ver Ilustración 5). Es la modelación completamente no lineal la que presenta mayor relevancia, ya que permite aproximarse de mejor forma a la respuesta real que podría presentar la estructura ante una sollicitación sísmica severa. De forma previa a las modelaciones mencionadas, las cuales se realizan en el software OpenSees “Open system for earthquake engineering simulation” (McKenna et al., 2000), se utiliza el software SAP2000 v22.1.0 (Computers and Structures, Inc., 2020) para generar un modelo de elementos finitos completamente elástico con la finalidad de corroborar los parámetros dinámicos que se tienen como antecedentes del edificio.

4.1 Modelo lineal - SAP2000

El modelo de elementos finitos lineal de la estructura se genera en el software SAP2000, particularmente lo que se modela es la subestructura identificada en la Ilustración 5. Dado que el modelo es completamente elástico, se definió el material que conforma a muros y losas del sistema como hormigón con peso específico (γ) 2.5 [ton/m³] y módulo de elasticidad como $E_c = 15100\sqrt{f'c}$ ($f'c$ en kg/cm²) según el código ACI 318-2014. Los elementos estructurales, muros y losas, se definieron como elementos de área tipo shell-thin, el cual contempla 6 grados de libertad en sus nodos (3 traslaciones y 3 rotaciones), resultando apropiado para la modelación. En cuanto a la discretización, considerando la regularidad de la estructura, las almas de muros de cada piso se dividieron en dos elementos de área en la dimensión vertical, así como en la horizontal, generando 64 elementos de área de 1.3 [m] x 3.75 [m] en total. Respecto a las alas se siguió un mallado similar, dividiéndose en 4 elementos en la dimensión horizontal y 2 en la vertical por cada piso, generando en total 128 elementos de área de 1.875 [m] x 1.3 [m]. En las losas se realizó una división uniforme con elementos de área de 1.5 [m] x 2 [m] generando en la planta de cada piso un total de 36 elementos de área. Referente a la aplicación de cargas vinculadas al peso sísmico de la estructura, siguiendo los antecedentes de la Tabla 3, se asignaron cargas permanentes (D) y de uso (L) de 2 [kN/m²] en la superficie de cada piso. La Ilustración 7 presenta el modelo de elementos finitos generado en SAP2000.

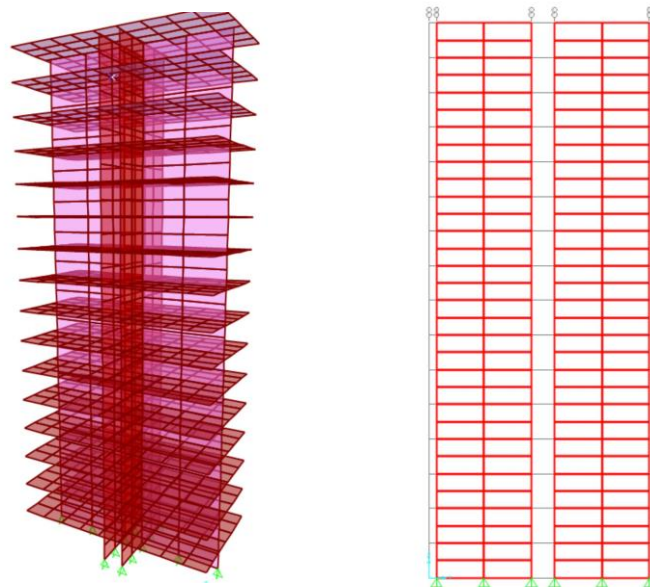


Ilustración 7. Vista tridimensional modelo de elementos finitos SAP2000 y elevación de dirección plana en análisis.

El modelo completamente elástico y sin considerar ningún tipo de reducción de rigidez se somete a un análisis modal para obtener los parámetros dinámicos, resultando un período fundamental en la dirección de análisis de 0.603 [s] y un peso sísmico de 24442 [kN], valores que corroboran los antecedentes presentados en la Tabla 3. La subestructura en estudio se somete a un análisis modal

espectral según NCh 433 Of. 96 Mod. 2009 para obtener la demanda sísmica. Los resultados de ambos análisis se presentan en la Tabla 4 y corroboran en la subestructura los antecedentes de la Tabla 3.

Tabla 4. Parámetros sísmicos modelo SAP2000.

| | |
|---|-------------|
| Peso sísmico (W) | 24442 [kN] |
| Período | 0.603 [s] |
| V_{elástico} | 11231 [kN] |
| V_{elástico} / W | 0.459 |
| R* | 7.4 |
| V_{Reducido} | 1517 [kN] |
| V_{Reducido} / W | 0.062 |
| V_u (1.4 V_{Reducido}) | 2123.8 [kN] |

4.2 Modelación en OpenSees

4.2.1 Modelo lineal

Como paso previo a desarrollar los modelos con elementos no lineales en el software OpenSees, se genera en el mismo un modelo completamente elástico, corroborando en este software parámetros dinámicos de la estructura con el objetivo de que la definición de geometría no presente inconsistencias al desarrollar el modelo no lineal. Para desarrollar lo anterior, muros y losas son modeladas como elementos lineales tipo “frame”: *elasticBeamColumn* en el software. En el caso de los muros, se dispone el elemento en forma vertical concentrando en el centroide de alma y ala las propiedades de dichas secciones respectivamente. La compatibilidad entre alma y ala, así como la conectividad con los nodos con que posteriormente se definirán los elementos “panel” para realizar la modelación no lineal de muros, se efectúa mediante elementos rígidos. Otro punto importante que se considera en el software, es la aplicación de cargas, esta se debe realizar en los nodos de la geometría definida, por lo que en el caso de las cargas gravitacionales no se puede aplicar directamente una carga distribuida en superficie. El modelo generado en este software, se define con dos nodos en la longitud del alma de cada piso, lo mismo para cada mitad de ala, sin embargo, el modelo en SAP2000 se definió con tres nodos en las zonas señaladas, particularmente tres apoyos basales en cada parte de la sección de muro (alma y ala), por lo cual, en busca de aplicar cargas nodales equivalentes al modelo de OpenSees, se modifica la configuración de apoyos en el modelo SAP2000, eliminando el apoyo central de alma y de cada mitad de ala. De esta manera se obtienen reacciones basales equivalentes, las cuales se distribuyen en forma proporcional al número de pisos y se aplican en los nodos antes descritos en cada piso, los valores se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Cargas nodales por piso modelo OpenSees.

| | |
|-----------------------------------|------------|
| Nodo extremo alma | 181.8 [kN] |
| Nodo intersección alma-ala | 372.8 [kN] |
| Nodos ala | 105.1 [kN] |

La Ilustración 8 muestra el modelo completamente elástico realizado en OpenSees. Esta, identifica en color rojo y azul los elementos que concentran las propiedades de alas y almas respectivamente en este modelo. El análisis modal, entrega un período de 0.608 [s] en la dirección en estudio, además las reacciones basales verticales globales de cada muro para el caso gravitacional presentan valores de 12238 [kN] (peso sísmico total 24476 [kN]), lo cual resulta consistente con lo arrojado por el modelo en SAP2000 (T=0.603[s] y W=24442 [kN]), corroborando la correcta definición de nodos y condiciones de borde en el software OpenSees.

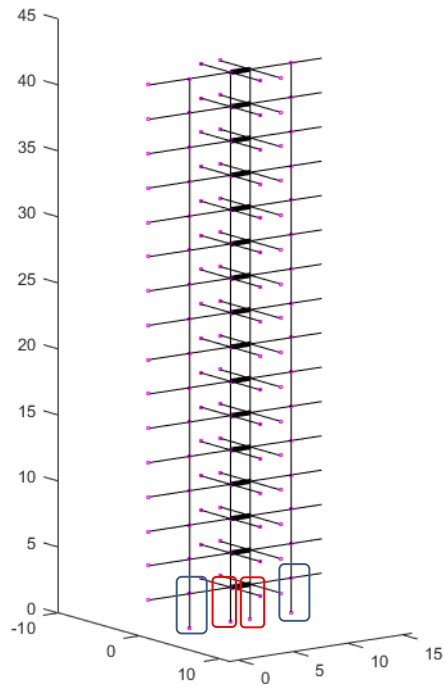


Ilustración 8. Geometría modelo previo implementado en OpenSees. Magnitudes en metros.

4.2.2 Modelación no lineal de muros

Dado que el interés principal del trabajo se encuentra en analizar la respuesta en términos del nivel de carga axial recibida por los muros, se utiliza en ellos el elemento de modelación no lineal MVLEM-3D (Kolozvari et al., 2021), el cual ha entregado resultados que se ajustan bastante bien al comparar modelos numéricos con experimentales. La geometría del modelo se define en forma análoga a lo presentado en la Ilustración 8, pero esta vez se contempla la definición de elementos tipo panel para la modelación de muros, por ello, se eliminan los nodos ubicados en el centroide del alma de cada muro y se añaden los nodos basales que en el modelo previo se habían omitido en extremos de alma y ala respectivamente. La Ilustración 9 presenta la geometría nodal de los muros por cada piso, representando en cruces color naranja los nodos del modelo previo y en cuadrados color azul los contemplados para definir los elementos panel (MVLEM-3D). Los nodos presentes en la intersección alma ala de cada muro, permiten la posterior definición de los elementos que representan las losas.

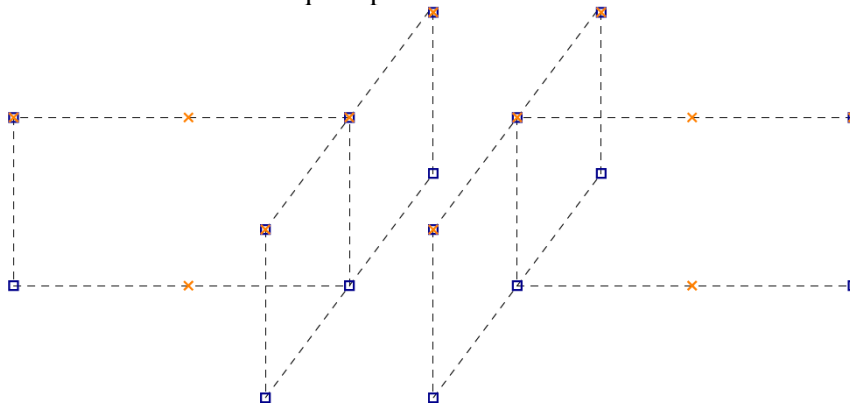


Ilustración 9. Nodos definidos por cada piso, modelación no lineal de muros.

En cuanto a la discretización, en cada muro por cada piso, se contempla un elemento (MVLEM-3D) para simular el alma y dos elementos representando las alas, resultando en cada piso un total de 3 elementos por muro, como esquematiza la Ilustración 9. La discretización de fibras se realiza de forma tal de que en los extremos de cada elemento, la división coincida con los niveles de refuerzo de borde

indicados en el detallamiento de la Ilustración 6. En las zonas interiores, la sección se subdivide espaciando a 50 [cm], generando un total de 7 fibras en los bordes de cada ala (asociadas al refuerzo de borde) y 6 fibras representando el refuerzo distribuido, mientras que en el alma se contemplan 7 fibras asociadas al refuerzo de borde, 12 fibras asociadas al refuerzo distribuido y 4 fibras asociadas al refuerzo de intersección alma-ala. La discretización se esquematiza en la Ilustración 10. Cabe destacar que en el software, al momento de definir el elemento, se ingresa en cada fibra los materiales que esta representa: acero y hormigón. En el caso del acero, se incorporan las cuantías respectivas de refuerzo longitudinal en cada nivel de la sección y en el hormigón el material con propiedades sin confinar y con confinamiento según corresponda.

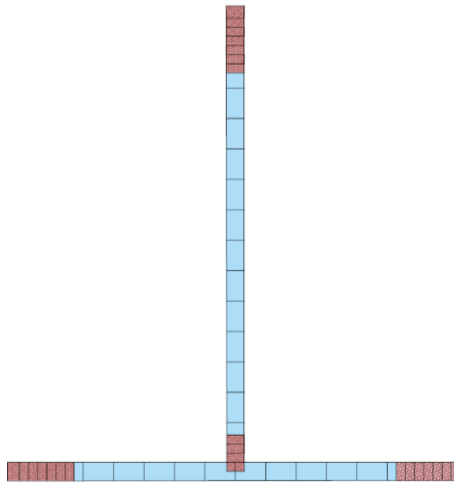


Ilustración 10. Esquema de discretización de fibras en elemento MVLEM-3D.

Al ser un elemento de modelación no lineal, los parámetros que definen el comportamiento del material cobran relevancia. A continuación, se presentan las curvas de comportamiento y parámetros asociados que se consideran en la modelación.

Hormigón: Se utiliza el material *Concrete02* en el software OpenSees, curva basada en el trabajo desarrollado por Mohd Hisham Mohd Yassin, "Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cycling Loads" en 1994. Esta curva de comportamiento tiene la particularidad que contempla el comportamiento a tracción del concreto. Este material en el software se considera tanto para hormigón sin confinar como hormigón confinado, variando los parámetros respectivos para cada caso según se detalla más adelante.

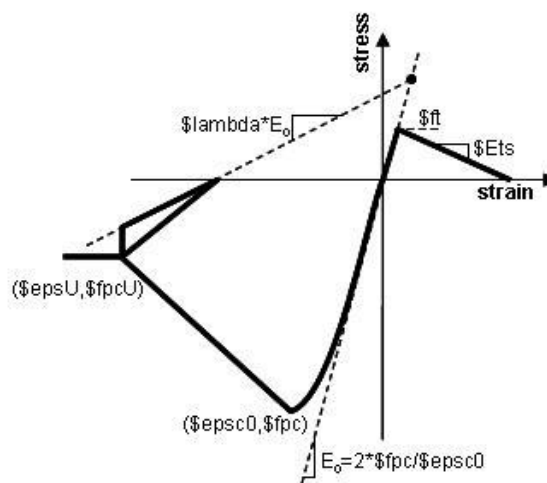


Ilustración 11. Curva de comportamiento hormigón. (OpenSeesWiki)

Los parámetros para definir la curva de comportamiento del concreto en el software se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades curvas de comportamiento de hormigón.

| | Hormigón sin confinar | Hormigón confinado |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Resistencia máxima a compresión (f'_c, f'_{cc}) | 250 [kg/cm ²] | 275 [kg/cm ²] |
| Deformación al peak de resistencia (ϵ_0) | 0.002 | 0.003 |
| Resistencia residual (f'_{cu}) | 50 [kg/cm ²] | 137.5 [kg/cm ²] |
| Deformación última (ϵ_{cu}) | 0.012 | 0.014 |
| Razón entre la pendiente de descarga a ϵ_{cu} y pendiente inicial (λ) | 0.25 | 0.25 |
| Resistencia a tracción (f_t) | 31.6 [kg/cm ²] | 31.6 [kg/cm ²] |
| Rigidez rama de decaimiento por tracción (E_{ts}) | 15800 [kg/cm ²] | 15800 [kg/cm ²] |

La Ilustración 12 muestra las curvas de comportamiento en compresión.

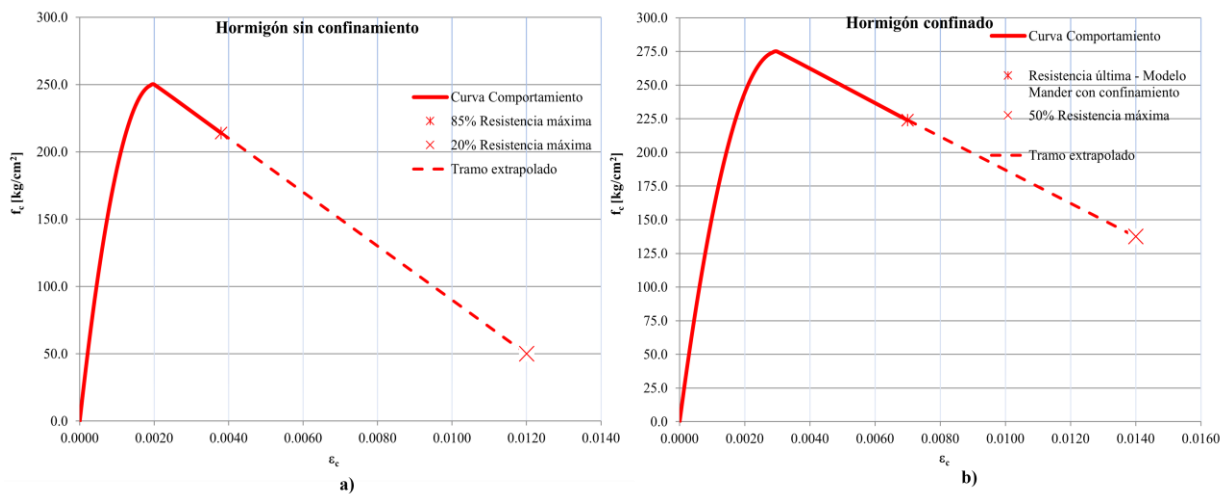


Ilustración 12. Curvas de comportamiento hormigón en compresión.

En el caso de hormigón sin confinar, el decaimiento lineal se extrapola hasta alcanzar un valor de resistencia residual igual a 20% f'_c . En el hormigón confinado, el valor peak se calcula con los antecedentes del trabajo base de la estructura en estudio (Ramos & Hube, 2021) utilizando el modelo propuesto por Mander et al. (1988). La curva lineal de decaimiento se extrapola desde el par deformación-resistencia última obtenida del modelo de Mander, hasta alcanzar una resistencia residual igual a 50% f'_{cc} . Referente al comportamiento en tracción, la resistencia a tracción f_t se calcula como $f_t = 2\sqrt{f'_c}$ y la rigidez de decaimiento por tracción se calcula según la recomendación del autor como $f_t/0.002$.

Acero: Se utiliza el material *SteelMPF* en el software OpenSees, el cual representa el comportamiento histerético del material propuesto por Menegotto y Pinto en 1973 junto con la extensión del modelo para incluir los efectos de endurecimiento por deformación propuesto por Filippou et al. en 1983. La

Ilustración 13 muestra la curva de comportamiento incorporada en el modelo. Se contempló $E_s = 200000$ [MPa] y tensión de fluencia de 420 [MPa], el resto de los parámetros incorporados a la curva son recomendaciones propias del autor.

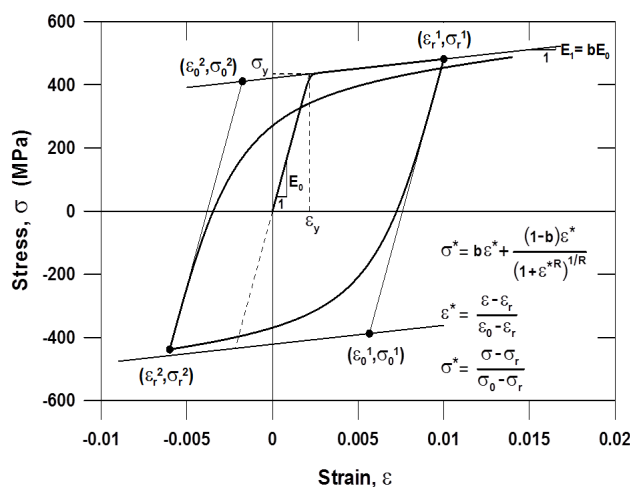


Ilustración 13. Curva de comportamiento acero. (OpenSeesWiki)

La definición de cargas y masas nodales en los muros siguen el mismo procedimiento que en el modelo elástico previo descrito en la Sección 4.2.1, es decir, se distribuyen las cargas gravitacionales en forma proporcional al número de pisos de acuerdo con las reacciones basales obtenidas en el modelo SAP2000 asociadas a dicho caso de carga (ver Tabla 5).

4.2.3 Modelación lineal equivalente de losas

A efectos de generar un modelo lineal equivalente de losa, esta se modela mediante un elemento “frame” lineal elástico con longitud igual al largo de la losa en la zona de corredor (1.8 [m]) y ancho equivalente tributario de la porción de losa en la subestructura (9 [m]). En esta modelación, se considera un solo elemento para representar la losa. El elemento utilizado es *elasticBeamColumn* en el software, el cual la define como una “viga ancha” y requiere exclusivamente las propiedades de rigidez, calculadas en base a la geometría seccional de la losa y su materialidad (hormigón armado). En relación a la rigidez, esta se define como efectiva en el modelo reduciendo la inercia bruta de la sección (I_g), así, $I_{efectiva} = \alpha * I_g$, donde α es el factor de reducción de rigidez a obtener en este trabajo, el cual se obtendrá al contrastar la carga axial en los muros de esta modelación con la que entrega el modelo completamente no lineal (muro no lineal y losa no lineal) al nivel de desplazamiento δ_u según NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009-DS 61, 2011.

4.2.4 Modelación no lineal de losas

En este caso, la losa de acoplamiento se define como un elemento no lineal. La modelación se realiza con elementos viga-columna con plasticidad distribuida basados en desplazamientos, la elección se justifica en que: i) el interés principal es estudiar la respuesta en términos de carga axial transferida en los muros producto del acoplamiento de la losa, para lo cual es suficiente que ocurra el equilibrio a nivel nodal de esta última, sin necesidad de ahondar en su respuesta de carga axial a nivel seccional; ii) el elemento de modelación de muros MVLEM-3D fue recientemente implementado en OpenSees al comienzo de este trabajo, por lo que a efectos de evitar problemas de convergencia numérica se escogen elementos basados en desplazamientos, los cuales son más robustos que los basados en fuerzas. La definición de la losa de acoplamiento en el modelo contempla la utilización de 3 elementos, denominados *dispBeamColumn* en el software. Se utiliza un elemento en la zona central de la losa y dos elementos en sus extremos con longitud igual al largo teórico de rótula plástica esperado, el cual se considera igual al espesor de la losa (15 [cm]), lo mencionado se presenta en la Ilustración 14. Dicha discretización se realiza debido a que el tramo descendente de la curva de comportamiento del hormigón hace que la modelación tenga problemas de localización a nivel de elemento, por lo cual la discretización utilizada, hace que dicha localización se produzca en la zona de rótula plástica, zona en la cual se espera

que efectivamente se concentren las deformaciones (Scott & Fenves, 2006). A lo largo de cada elemento se definen 5 puntos de integración. La sección transversal del elemento se define en el software y se discretiza en su alto (espesor de losa) en 15 fibras, de forma tal que al menos dos fibras queden incorporadas en las zonas de recubrimiento, en estas fibras se incorporan las propiedades del hormigón, así como la doble malla de acero de refuerzo.

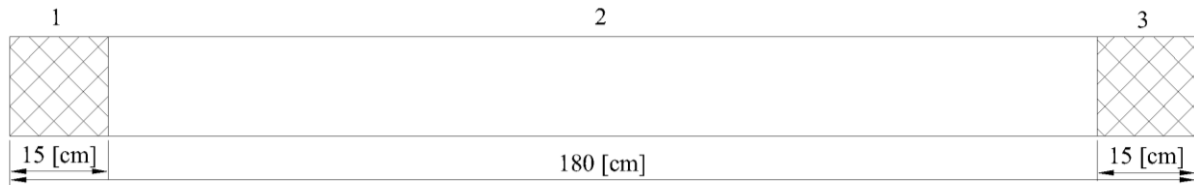


Ilustración 14. Discretización de elementos en longitud de losa.

En lo que continúa, el análisis se ejecuta en los dos modelos de la estructura antes descritos, es decir, considerando muro no lineal-losa lineal equivalente (denominado *modelo lineal equivalente*) y muro no lineal-losa no lineal (denominado *modelo no lineal*), esto con el objetivo de hallar un factor de reducción de rigidez en la modelación lineal equivalente de losas que al nivel de desplazamiento último δ_u definido en NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 - DS 61 2011 genere una misma carga axial en la respuesta de los muros de ambas modelaciones.

5 Análisis y resultados

5.1 Análisis Pushover

Se ejecuta un análisis estático incremental (pushover) en los modelos de muro no lineal-losa no lineal y muro no lineal-losa lineal equivalente descritos anteriormente. El patrón de cargas laterales se aplica según una distribución triangular en altura. El desplazamiento máximo incorporado en ambos análisis es 20 [cm], de manera tal que se alcance el desplazamiento lateral de diseño de techo δ_u definido en la normativa, cuyo valor en este caso es de 13 [cm] de acuerdo con los parámetros dinámicos y de amenaza sísmica asociados a la estructura. El objetivo es encontrar una reducción de rigidez para la losa del modelo lineal, de manera que este genere una carga axial en los muros igual a la que entrega el modelo completamente no lineal al nivel de desplazamiento δ_u . La Ilustración 15, Ilustración 16 e Ilustración 17, presentan los resultados obtenidos a partir del análisis pushover en el modelo completamente no lineal de la estructura.

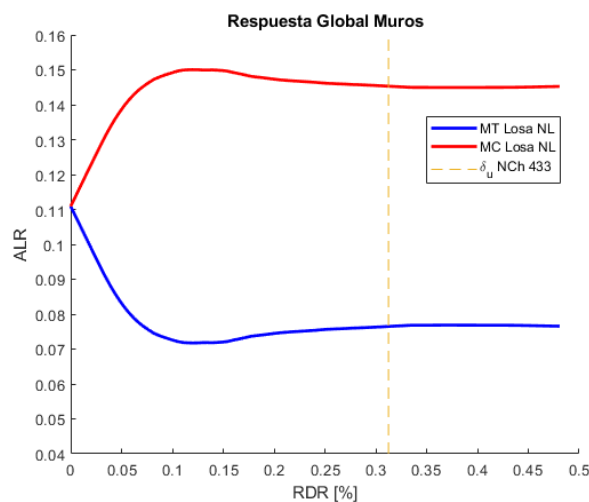


Ilustración 15. ALR v/s RDR. Modelo no lineal.

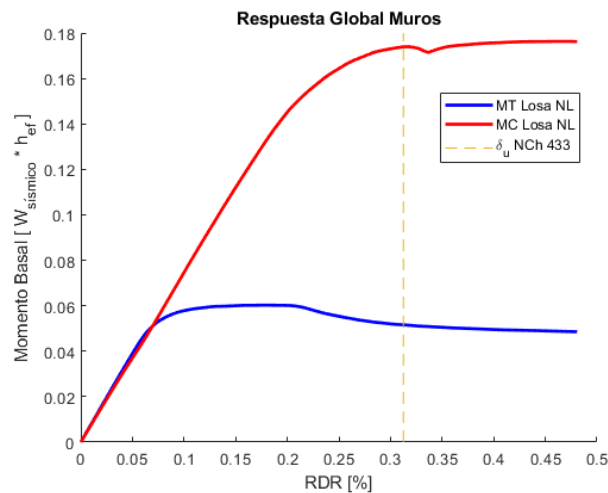


Ilustración 16. Momento volcante v/s RDR. Modelo no lineal.

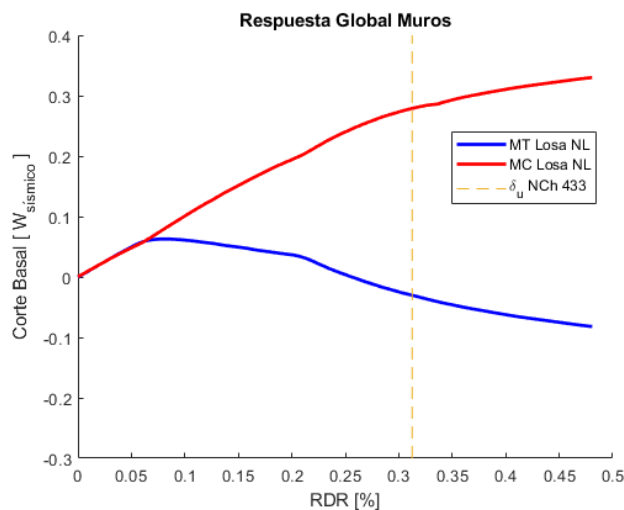


Ilustración 17. Corte Basal v/s RDR. Modelo no lineal.

Los resultados del análisis estático incremental (pushover) realizado al modelo completamente no lineal, resultan consistentes con lo esperado para la tipología estructural en estudio sometida a acciones de cargas laterales, dando cuenta del acoplamiento en los muros producido por la losa. La Ilustración 15 presenta la curva “ALR v/s RDR”, donde “ALR” (de su sigla en inglés Axial Load Ratio) se define como la carga axial en el muro relativa a $f'_c \cdot A_g$ y “RDR” (Roof Drift Ratio) como el desplazamiento de techo normalizado por la altura del edificio.

En la Ilustración 15 se identifica la compresión que recibe un muro (curva Muro en Compresión) y la tracción o descompresión neta que recibe el otro muro (curva Muro en Tracción), esto producto de la fuerza de corte transmitida por la losa. Además, debido al equilibrio de fuerzas, se aprecia que la compresión en un muro es equivalente a la descompresión en el otro, llegando en el nivel de desplazamiento δ_u (RDR 0.31%) a un nivel de ALR de 0.145 en el muro en compresión y 0.075 en el muro en tracción, correspondiendo a una variación de carga axial del 32% debido a la acción lateral respecto al caso gravitacional (ALR=0.11).

La Ilustración 16 presenta el comportamiento del momento volcante en la base de los muros, este se presenta normalizado por el peso sísmico y la altura efectiva del patrón de cargas utilizado. El muro en tracción presenta un comportamiento distinto al muro en compresión, lo cual es consistente considerando que la sección es asimétrica respecto al eje de carga y que producto de la interacción carga axial-flexión, para el rango de carga axial al que queda sometido cada muro, la capacidad a flexión varía.

En este caso, para el muro comprimido, el rango de carga axial al que se somete implica una mayor capacidad a flexión. Asimismo, el incremento de carga axial en el muro comprimido aumenta la rigidez tangente en comparación al muro traccionado, de esta manera el momento volcante en la base se distribuye en forma desigual, tomando el muro comprimido un momento 3.4 veces mayor que el muro traccionado en el nivel de desplazamiento δ_u .

Comportamiento similar ocurre con el corte basal, notándose la diferencia entre la fuerza de corte tomada por cada muro al mismo nivel de desplazamiento que en la curva de momento volcante en la base. Sin embargo, en esta última gráfica (Ilustración 17) llama la atención el comportamiento que presenta el corte basal del muro que se tracciona (curva azul), la cual alcanza valores negativos. Este comportamiento anómalo ya fue observado anteriormente en la memoria de título "Determinación del desplazamiento de fluencia en sistemas de muros de hormigón armado" de Rocío Álvarez en la Universidad Técnica Federico Santa María con el profesor Patricio Bonelli como guía el año 2019. Aunque en este trabajo se desconoce su causa, una posible razón son efectos cinemáticos debido a que un muro es más rígido que el otro, no obstante, es un tema que requiere de mayor estudio.

Respecto al modelo que contempla la modelación lineal equivalente de losas, se realiza el análisis estático incremental barriando un rango de factores de reducción de rigidez en la losa idéntico en todos los pisos, de manera tal de encontrar el factor que proporcione al nivel de desplazamiento δ_u , el mismo nivel de carga axial que se presenta en la Ilustración 15 para dicho desplazamiento. La Ilustración 18, presenta el resultado del modelo lineal equivalente para el factor de reducción obtenido.

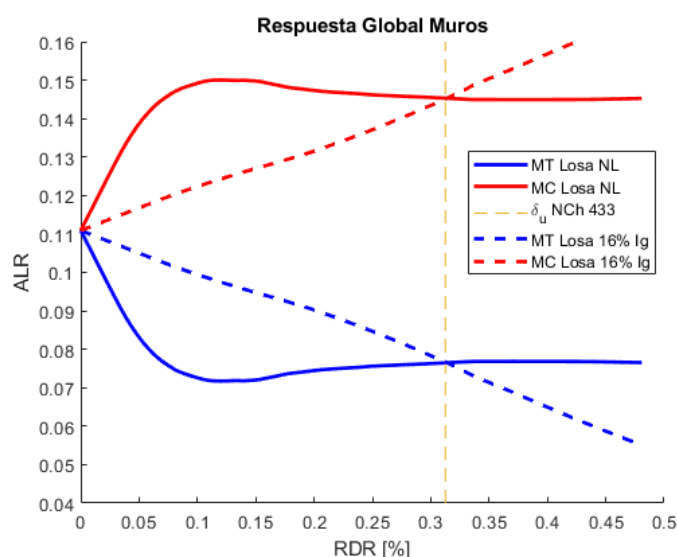


Ilustración 18. ALR v/s RDR. Modelo no lineal y lineal equivalente.

Se aprecia que el factor de reducción, que para un desplazamiento relativo de techo de 0.31% (δ_u) genera la equivalencia de carga axial, es un 16% la inercia bruta (I_g) de la sección. La respuesta en términos de la carga axial que recibe cada muro es prácticamente lineal en compresión y tracción, lo que da cuenta que la transferencia de corte de la losa a los muros es lineal, precisamente porque en este modelo la losa se consideró de esa forma.

La reducción de 16% de la inercia bruta presentada en la Ilustración 18 fue considerada igual en todas las losas de piso de la estructura. En búsqueda de corroborar dicha rigidez efectiva, se estudia en el modelo completamente no lineal, el comportamiento de las losas de cada piso analizando la fuerza de corte y la deformación relativa que se genera en ella, utilizando la aproximación de rotación del eje neutro (chord rotation) propuesta por ASCE 41-13. La deformación relativa se presenta en la Ilustración 19.

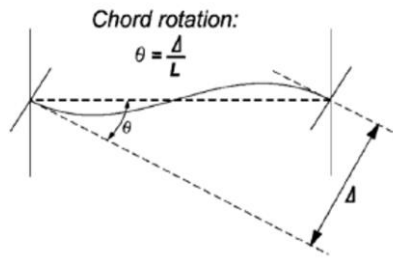


Ilustración 19. Definición de deformación relativa en losas. (ASCE41-13)

La longitud para considerar en el cálculo, corresponde a la de la porción de losa en la zona de corredor: $L=1.8$ [m]. El objetivo es analizar la distribución del factor de reducción de rigidez de las losas (α) a lo largo de la altura del edificio. Para esto, se construye una curva de fuerza de corte v/s deformación relativa de la losa, determinando en esta la rigidez inicial ($k_{\text{elástica}}$) y la rigidez secante o efectiva (k_{efectiva}) asociada al instante en que el edificio alcanza el desplazamiento de techo deseado. El factor α , esta vez se calcula como la razón entre la rigidez secante y la rigidez inicial de esta curva. A continuación, las Ilustraciones 20, 21, 22 y 23 muestran la curva “Fuerza de corte v/s Deformación relativa en losa” para algunos pisos de la estructura a partir de las cuales se obtiene el factor mencionado. Particularmente, se presentan los pisos 1, 4, 8 y 16. En las curvas, la fuerza de corte se normaliza por el corte asociado a la capacidad nominal en flexión de la losa ($V_n=194$ [kN]). La Ilustración 24 presenta los factores de reducción “ α ” obtenidos a partir de este análisis para las losas de cada uno de los pisos de la estructura.

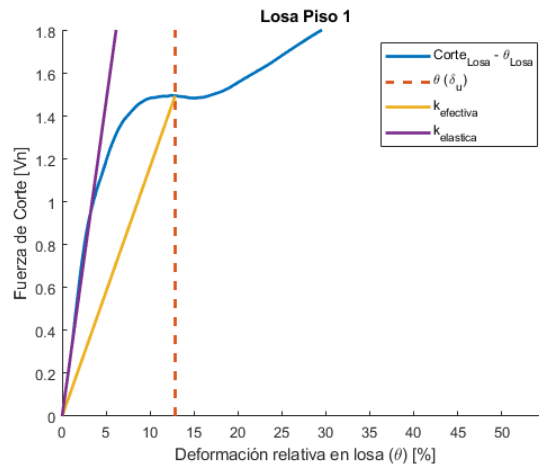


Ilustración 20. Curva fuerza de corte-deformación losa piso 1, factor obtenido $\alpha = 40\%$.

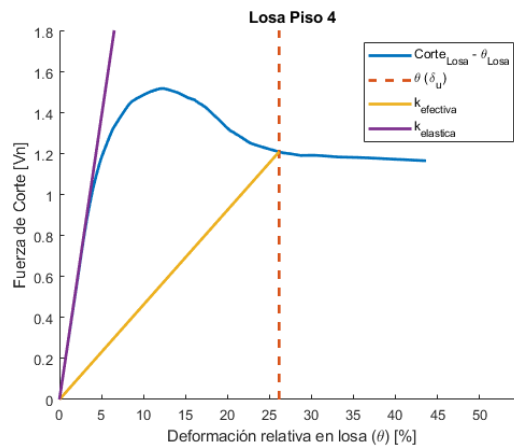


Ilustración 21. Curva fuerza de corte-deformación losa piso 4, factor obtenido $\alpha = 17\%$.

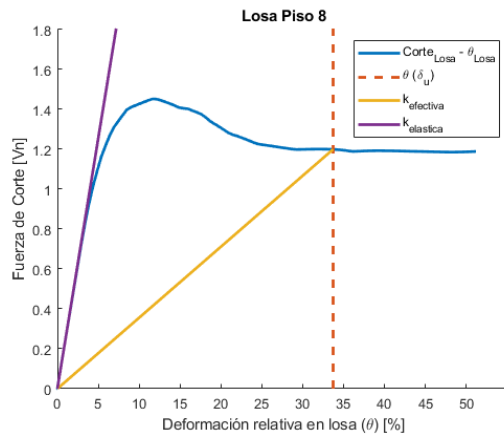


Ilustración 22. Curva fuerza de corte-deformación losa piso 8, factor obtenido $\alpha = 14\%$.

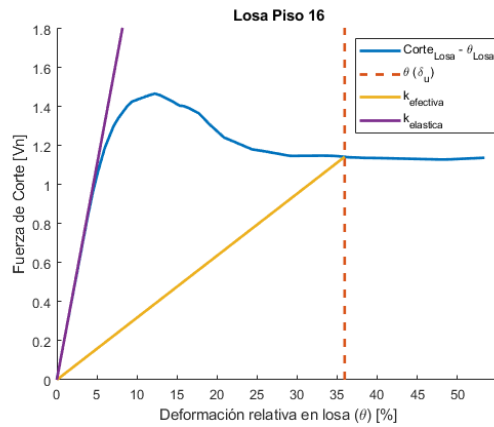


Ilustración 23. Curva fuerza de corte-deformación losa piso 16, factor obtenido $\alpha = 15\%$.

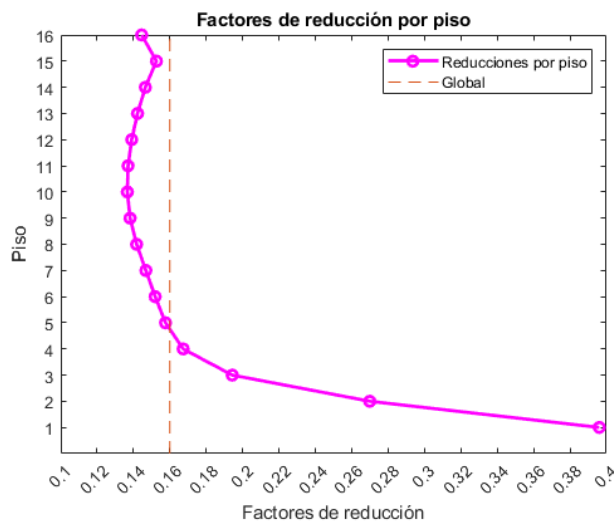


Ilustración 24. Análisis por pisos de factores de reducción de rigidez en losas “ α ”.

La curva de la Ilustración 20 muestra que la losa del primer piso presenta un comportamiento distinto al resto de los pisos en su curva fuerza-desplazamiento, por lo que el factor de reducción obtenido en

dicho caso escapa de la tendencia del resto de la estructura. No se ahonda mayormente en las posibles causas de la irregularidad en dicho piso, ya que la tendencia de las curvas presentadas en las Ilustraciones 21, 22 y 23 así como las calculadas internamente del resto de los pisos resultan mucho más usuales. Los resultados, dan cuenta de que la losa incursiona en el rango no lineal de forma importante en casi todos los pisos cuando el edificio alcanza el desplazamiento de techo δ_u .

Es relevante mencionar, que tanto en las curvas presentadas, así como en las del resto de los pisos, la ordenada fuerza de corte normalizada por V_n , alcanza valores peak superiores a la unidad (cercanos a 1.4), lo cual no es del todo consistente, ya que preliminarmente significaría que la losa adquiere fuerza de corte aun cuando su capacidad a flexión ya fue superada. No obstante, se debe tener en cuenta que el cálculo de capacidad a flexión para el cual se obtuvo V_n , se realizó en base a ecuaciones simplificadas entregadas por el código de diseño, lo cual puede distar de lo que arroje el elemento de fibras basado en desplazamientos considerado en el modelo. Por ejemplo, posibles diferencias son que el código ACI 318 utiliza una distribución rectangular de esfuerzos en el concreto. Además, el modelo de fibras considera una curva de comportamiento del acero con endurecimiento por deformación, no así la ecuación del código, por lo cual se omite un énfasis mayor en esto, ya que el objetivo principal de dichas curvas es obtener una rigidez elástica, en la cual el valor peak de la curva no genera mayor influencia, así como una rigidez efectiva, la cual considera valores para los que la meseta de fluencia del elemento ya se ha formado y ha alcanzado un valor más cercano a la unidad.

La Ilustración 24 presenta los factores de reducción de rigidez (α) obtenidos con el análisis antes descrito para cada uno de los pisos, se aprecia que en los pisos 1, 2 y 3 el comportamiento es irregular, como ya se había previsto, alejándose de la tendencia que presentan los pisos a medida que aumenta la altura. El comportamiento anormal en las reducciones de rigidez de dichos pisos se explica en las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas, como es el caso del piso 1 en la Ilustración 20. En la misma gráfica se muestra junto a la curva, el factor de reducción $\alpha=0.16$ considerado en el caso global. Para comparar el factor del caso global con los resultados del análisis por piso, se calcula el factor de reducción promedio de los distintos pisos omitiendo los valores asociados al primer y segundo piso, los cuales clasifican como atípicos según el diagrama de la Ilustración 25. Además, según el mismo diagrama, la mediana toma un valor igual a 0.15. El valor promedio de reducción que se obtiene al omitir en el cálculo los datos atípicos también es de 0.15, valores que resultan semejantes al factor 0.16 obtenido anteriormente en el caso global.

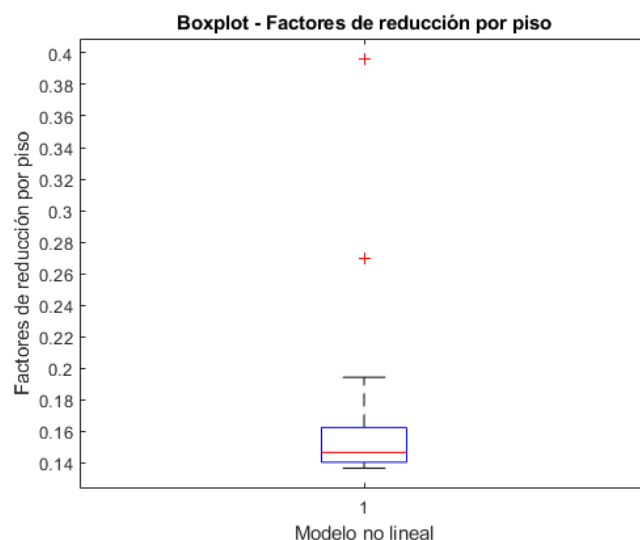


Ilustración 25. Diagrama de caja y bigotes de factores de reducción por piso.

Con la finalidad de analizar cómo los parámetros de diseño varían la reducción de rigidez a considerar en la modelación lineal equivalente, se realiza un análisis de sensibilidad variando en el modelo la cuantía total de acero de refuerzo (refuerzo en tracción y compresión) así como el espesor de losa. Para lo anterior, se ejecuta el análisis estático incremental en ambos modelos (modelo no lineal y lineal

equivalente), repitiendo el procedimiento descrito anteriormente para el modelo original, es decir, barriendo un rango de factores de reducción de rigidez en el modelo que contempla la losa lineal, de forma tal de hallar el factor que genere el mismo nivel de carga axial en el modelo equivalente que el alcanzado en el modelo completamente no lineal al nivel de desplazamiento δ_u de la normativa. Cabe destacar que en este procedimiento, el modelo lineal varía únicamente el parámetro espesor de losa (ya que el acero de refuerzo no es incorporado en el modelo elástico de la losa, simulando el criterio que se usa comúnmente en los modelos de elementos lineales), mientras que el completamente no lineal, varía tanto la cuantía total de acero de refuerzo como el espesor de la losa. La Ilustración 26 muestra la variación del factor de reducción de rigidez en losas expresado como $\alpha = I_{\text{efectiva}}/I_g$, según la cuantía de acero de refuerzo total de la losa. La Ilustración 27 muestra la variación del factor según el espesor de losa.

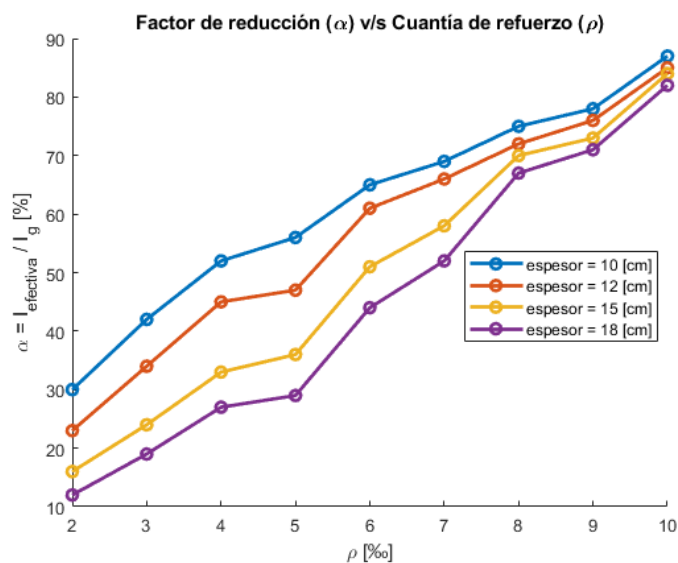


Ilustración 26. Factor de reducción de rigidez en losas “α” según cuantía de acero de refuerzo.

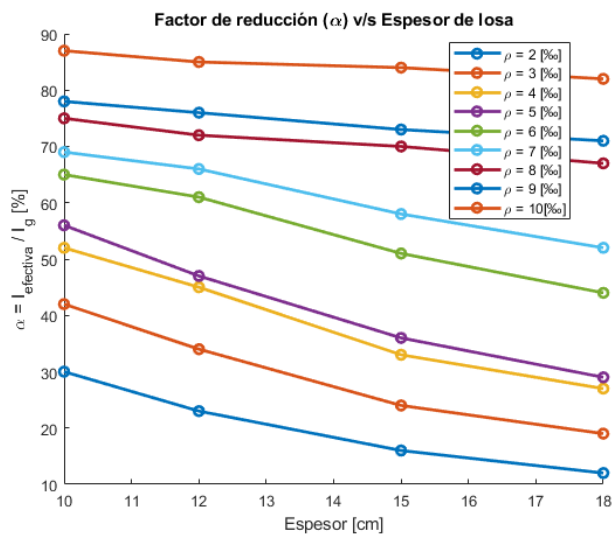


Ilustración 27. Factor de reducción de rigidez en losas “α” según espesor de losa.

Las curvas de la Ilustración 26 muestran que conforme aumenta la cuantía de refuerzo en la losa, mayor es el valor del factor α que se obtiene, en referencia a esto, se debe tener presente que este factor pondera a la inercia bruta de la sección para obtener la inercia (rigidez) efectiva de la misma, es decir, a medida que aumenta α , menor es la reducción de rigidez que se está contemplando en la losa, ergo más cercana es la inercia efectiva a la inercia bruta de la sección. En la misma gráfica de la Ilustración 26, se aprecia que para cuantías elevadas, aun cuando estas resultan poco realistas en diseño, independiente del espesor de losa, el factor de reducción α muestra una tendencia a valores cercanos al 80%, es decir una inercia efectiva de 80% la inercia bruta de la sección. En consecuencia, para cuantías elevadas no es necesario reducir mucho la inercia de la losa para generar la equivalencia de carga axial. En la Ilustración 26 como en la Ilustración 27 se aprecia que para el rango de cuantías estudiado, conforme aumenta el espesor de la losa, menor es el valor del factor α que genera la rigidez efectiva en la losa, siendo mayor la disminución de rigidez a contemplar, esto último se explica en que un aumento del espesor genera un gran incremento en la inercia bruta, así, para una inercia efectiva ligeramente mayor, el factor presenta disminución. Particularmente, esta tendencia se aprecia para cuantías bajas, ya que, para cuantías altas la reducción es prácticamente insensible a variaciones en el espesor de losa a considerar. En general, en ambas ilustraciones se nota que el factor es más sensible a variaciones en la cuantía de refuerzo en comparación a variaciones en el espesor.

5.2 Análisis tiempo-historia

Con el propósito de corroborar el factor de reducción de rigidez propuesto a partir del análisis estático para la estructura original ($\alpha=16\%$), se ejecuta en los modelos un análisis dinámico tiempo-historia. A continuación, se describe el procedimiento para su ejecución, así como los resultados obtenidos.

De acuerdo con la ubicación geográfica que representa la estructura (Santiago de Chile), se considera un set de 30 registros sísmicos obtenidos en suelo tipo C según la clasificación de la normativa sísmica nacional. La información fue facilitada por el profesor Pablo Heresi del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María. La información asociada a los registros se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Registros sísmicos asociados a suelo tipo C.

| ID | Código Estación | Terremoto | Magnitud [Mw] | Profundidad [km] | Fecha |
|----|-----------------------|----------------|---------------|------------------|------------|
| 1 | 707A | Iquique 2014 | 8.2 | 38 | 03-04-2014 |
| 2 | MATANZAS | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 3 | VALP04S | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 4 | VIÑA DEL MAR CENTRO | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 5 | GO04 | Coquimbo 2015 | 8.4 | 11 | 16-09-2015 |
| 6 | VIÑA DEL MAR EL SALTO | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 7 | SANTIAGO LA FLORIDA | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 8 | VALP06R | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 9 | T10A | Iquique 2014 | 8.2 | 38 | 03-04-2014 |
| 10 | VALP08R | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 11 | VALP06R | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 12 | MAUL03R | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |

| | | | | | |
|----|----------------------|----------------|-----|------|------------|
| 13 | HUALANE | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 14 | VALP08R | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 15 | SAN PEDRO DE ATACAMA | Tocopilla 2007 | 7.7 | 39 | 14-11-2007 |
| 16 | GO07 | Chiloé 2016 | 7.6 | 30 | 27-02-2010 |
| 17 | VALP07S | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 18 | C26O | Coquimbo 2015 | 8.4 | 11 | 16-09-2015 |
| 19 | MAUL03R | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 20 | VALP05S | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 21 | SANTIAGO CENTRO | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 22 | LL07 | Chiloé 2016 | 7.6 | 30 | 27-02-2010 |
| 23 | A07Y | Chiloé 2016 | 7.6 | 30 | 27-02-2010 |
| 24 | STGO01S | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 25 | CONSTITUCION | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 26 | SANTIAGO PUENTE ALTO | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 27 | SANTIAGO PEÑALOEN | Maule 2010 | 8.8 | 30 | 27-02-2010 |
| 28 | IQUIQUE | Tarapacá 2005 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |
| 29 | MEJILLONES | Tocopilla 2007 | 7.7 | 39 | 14-11-2007 |
| 30 | VALP13S | Algarrobo 1985 | 7.9 | 40.7 | 03-03-1985 |

Esta parte del trabajo escapa de aspectos normativos o de diseño prescriptivo y se enmarca principalmente en el contexto de ingeniería basada en desempeño y análisis no lineales. El estudio de la respuesta sísmica de la estructura mediante análisis dinámico no lineal es uno de los tópicos propuestos en el trabajo base sobre el cual se desarrolla esta memoria (Ramos & Hube, 2021), por ello también su realización. El objetivo es generar en la estructura incursión en el rango no lineal, de manera tal de poder corroborar y comparar la respuesta dinámica del modelo completamente no lineal junto con el modelo de losas lineales con la reducción de rigidez equivalente previamente obtenida del análisis estático. Para lo anterior, los registros se escalan en amplitud, sin modificar el contenido de frecuencias a un espectro objetivo. El espectro objetivo que se escoge es el asociado al sismo máximo probable (SMP) de NCh NCh 2745 Of. 2013, cuya intensidad es estimable al nivel de movimiento sísmico del suelo que tiene un 10% de probabilidad de excedencia en 100 años. Este espectro se calcula como 1.2 veces el espectro de diseño (SDI) de la misma norma, el cual se presenta en la Ilustración 28. El criterio utilizado para el escalamiento, es que el espectro de aceleraciones de cada registro para un 5% de amortiguamiento, tenga la misma ordenada espectral que el espectro objetivo para el período fundamental de la estructura lineal elástica. Cada registro disponible es un par de aceleraciones (direcciones X e Y), sin embargo, a efectos de este trabajo cada dirección se trabaja como un registro independiente.

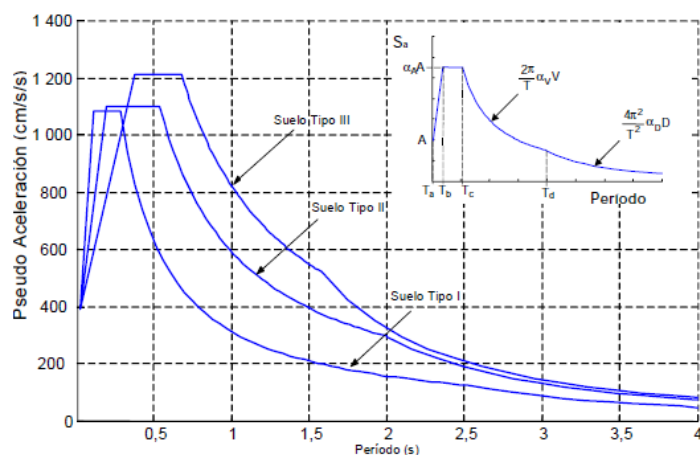


Ilustración 28. Espectro base de diseño para zona sísmica 2. (NCh 2745 Of. 2013)

Posteriormente, se realiza un filtro por factor de escala, de modo tal de considerar solo los registros cuyo factor de escala sea igual o menor a 3 y mayor a 1/3. Por último, se realiza un filtro en base a la dispersión que presentan los registros ya escalados respecto al espectro objetivo. Para este punto, se utiliza una metodología simplificada de lo recomendado por ASCE 7-16, realizando el cálculo de dispersión a través del error cuadrático medio para períodos entre $0.2 \cdot T_e$ y $1.5 \cdot T_e$, siendo T_e el período elástico de la estructura. En base a lo expuesto, del set de 30 pares de registros, se obtiene un total de 26 registros sísmicos escalados a considerar en el análisis, cuyos espectros se presentan en la Ilustración 29.

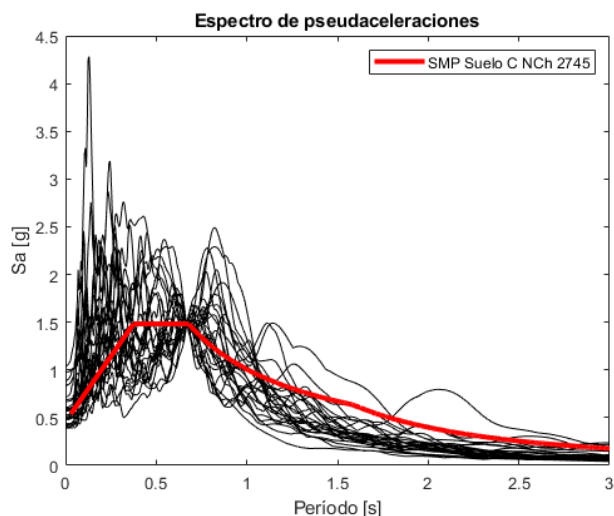


Ilustración 29. Espectros de registros escalados a SMP para suelo C – NCh2745.

Se ejecutan los 26 registros escalados en el modelo no lineal y lineal equivalente. Lo que se busca, es estudiar el comportamiento de carga axial y momento volcante en la base de los muros, así como la variación de rigidez que presentan las losas a lo largo de la altura de la estructura. Debido a la extensión a la que se limita este documento, se presentan las respuestas antes mencionadas para un registro en particular. Como criterio, el registro utilizado para mostrar la respuesta en detalle de la estructura se definió en base al registro que presenta menor RMSE respecto al promedio del espectro de desplazamientos de los 26 registros ya escalados, resultando a utilizar el registro escalado correspondiente a la estación C260, terremoto de Coquimbo 2015, dirección X. El criterio en base al promedio de espectro de desplazamientos en lugar de espectro de aceleraciones, se considera ya que todo el análisis de factores de reducción de rigidez se realizó en base a la respuesta del sistema para un nivel de desplazamiento dado.

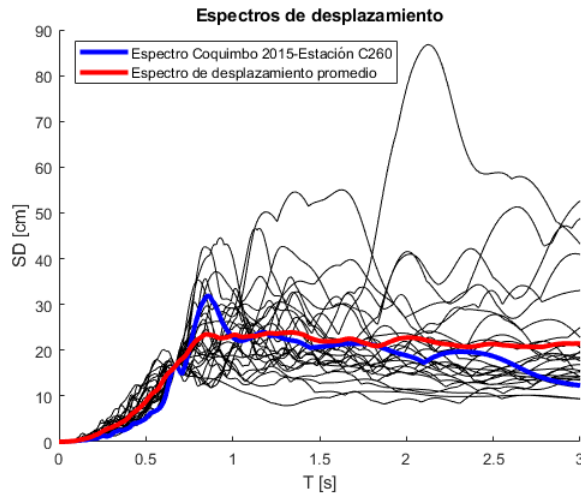


Ilustración 30. Espectro de desplazamientos: espectro promedio de los registros, registro Coquímbo 2015 - Estación C260 y resto de los registros.

Los resultados obtenidos se presentan en la Ilustración 31, 32 y 33. El comportamiento de carga axial en el tiempo de cada muro, se contrasta con la respuesta obtenida con el modelo que considera losas lineales con la reducción de rigidez antes obtenida, es decir con una rigidez efectiva igual a $16\%I_g$. En ambos gráficos, resulta claro que en la respuesta inicial, ambos modelos responden de manera diferente. Esto se explica ya que el modelo lineal equivalente comienza el análisis asumiendo la losa “agrietada”, no así el modelo no lineal. Al aumentar la intensidad del registro sísmico, la respuesta entre modelos comienza a asemejarse terminando por quedar prácticamente superpuestas, lo que permite inferir que al experimentar la demanda sísmica, la rigidez con la que queda el modelo no lineal se ajusta a la considerada en el modelo lineal equivalente. En relación a lo anterior, es importante notar que entre los 70 y 85 segundos de registro, el modelo no lineal presenta una respuesta mayor en términos de magnitud ALR, lo cual se explica nuevamente en que este modelo comienza el análisis sin reducción de rigidez, por lo tanto, inicialmente transfiere una mayor fuerza a los muros en comparación al modelo lineal equivalente, pero luego al agrietarse debido a una mayor demanda sísmica, termina por equipararse con las fuerzas transferidas en el modelo lineal equivalente. En la respuesta obtenida, el modelo no lineal producto de la carga axial adicional debido al acoplamiento, presenta una variación máxima de ALR respecto al caso gravitacional de 0.08 (por equilibrio de fuerzas en los muros, el valor representa indistintamente compresión y tracción). La misma variación en el modelo lineal equivalente alcanza un valor de 0.09, obteniéndose gran similitud en términos de variaciones máximas por acoplamiento en ambos modelos. Se indica en línea segmentada y punteada los valores máximos y mínimos de carga axial obtenidos anteriormente en el análisis pushover al nivel de desplazamiento de techo asociado a δ_u . Se observa que la máxima carga axial obtenida en el análisis dinámico para el modelo no lineal, presenta una diferencia en términos de ALR igual a 0.05 respecto al valor de carga axial obtenido al nivel de desplazamiento δ_u en el análisis pushover. En el modelo lineal equivalente la diferencia es de 0.06. Esto último indica que los valores peak de carga axial en el análisis dinámico difieren del obtenido en el análisis estático. La diferencia podría radicar en el desplazamiento máximo de techo que ocasiona el registro versus el considerado en el análisis pushover. Para el registro en cuestión, el modelo no lineal de la estructura alcanza un desplazamiento máximo de techo de 19 [cm] y el modelo lineal equivalente 20 [cm]. Los valores obtenidos resultan bastante cercanos entre sí, pero mayores al considerado en el análisis estático, lo cual podría explicar la discrepancia del valor de ALR obtenido con el registro sísmico respecto a lo sugerido por el análisis pushover. Pese a lo anterior, si se analiza el conjunto de valores altos de carga axial de la respuesta dinámica, es decir, no exclusivamente el de mayor valor sino el rango de valores altos que le siguen, se puede notar que en ambos muros la respuesta de ambos modelos es similar, rondando en $\pm 10\%$ el valor de carga axial obtenido al nivel de desplazamiento δ_u en el análisis pushover.

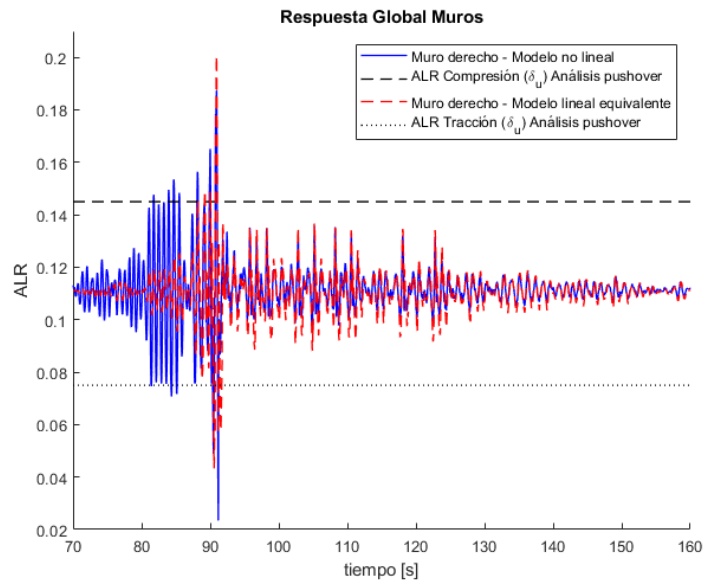


Ilustración 31. Respuesta carga axial en el tiempo muro derecho.

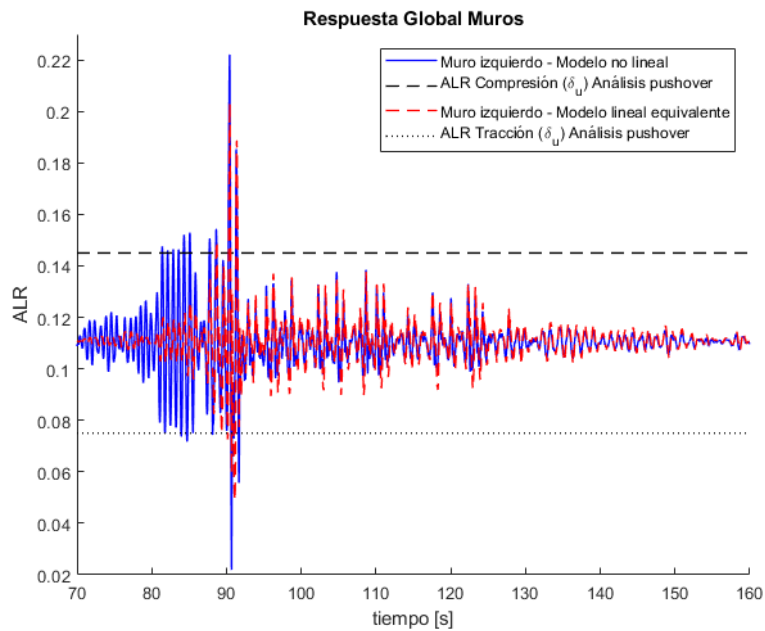


Ilustración 32. Respuesta carga axial en el tiempo muro izquierdo.

La Ilustración 33 exhibe el comportamiento del momento volcante en la base de los muros normalizado por el peso sísmico y la altura efectiva de patrón de cargas antes considerado en el análisis estático. En la misma, se aprecia la diferencia de rigidez en cada muro producto de la asimetría de la sección en el eje de carga, pero principalmente debido al rango de carga axiales al que queda sometido el muro por acción del acoplamiento, lo cual se traduce para determinados valores en una mayor capacidad a flexión. En cuanto a la curva de histéresis del modelo lineal equivalente, esta resulta semejante a la que presenta el modelo no lineal, lo cual se nota tanto en el rango elástico, como en la zona de gran incursión no lineal. La diferencia entre modelos en el momento basal es en el muro izquierdo de 9.1% (momento máximo) y 5.2% (momento mínimo), mientras que en el muro derecho es de 0.73% y 10.8% respectivamente. Lo anterior resulta relevante, ya que aun cuando se producen diferencias en los niveles

de acoplamiento (lo cual repercute en el comportamiento a flexocompresión), y a pesar de la diferencia en disipación de energía entre modelos, la diferencia en la respuesta histerética resulta mínima.

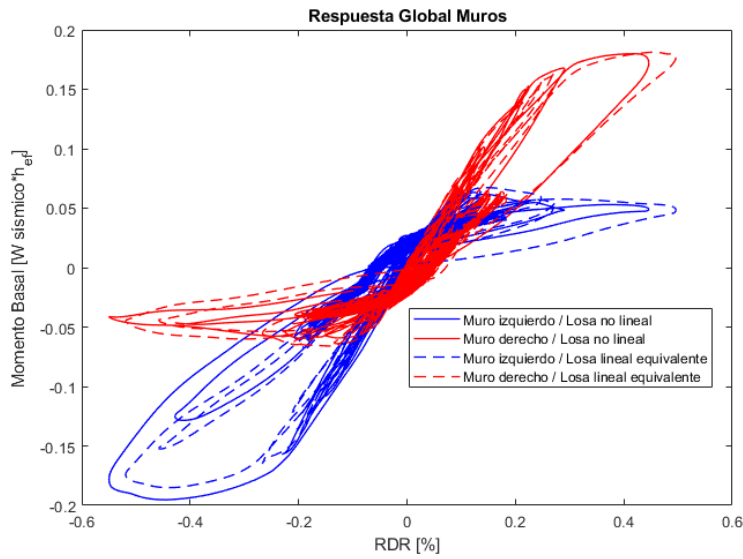


Ilustración 33. Respuesta momento volcante en base de muros, análisis dinámico tiempo-historia.

De manera análoga a lo realizado en el análisis estático, se lleva a cabo el análisis de respuesta fuerza de corte-desplazamiento relativo en las losas de cada piso, de acuerdo al esquema de la Ilustración 19. El objetivo es corroborar el factor de reducción de rigidez propuesto para la estructura ($\alpha=16\%$) pero esta vez con análisis dinámico. Las Ilustraciones 34, 35 y 36 muestran la respuesta histerética obtenida para las losas del piso 4, 8 y 16 respectivamente. Esta vez, con la intención de disminuir efectos de modos superiores, la respuesta se presenta en términos de la curva momento flector en losa normalizado por el momento nominal según el cálculo del código ACI 318-14, versus deformación relativa.

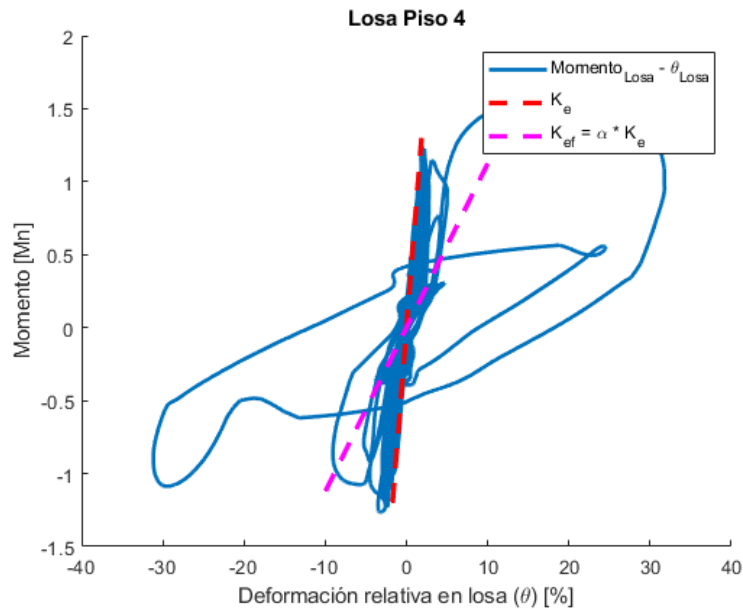


Ilustración 34. Respuesta dinámica flexión-deformación relativa, losa piso 4.

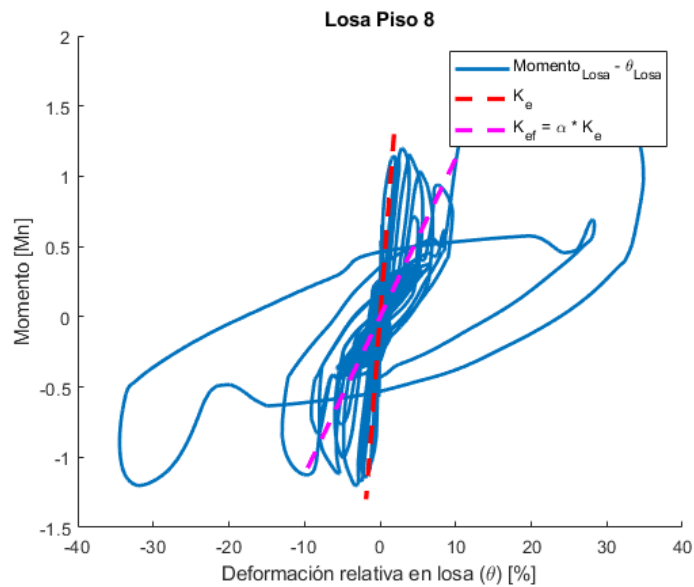


Ilustración 35. Respuesta dinámica flexión-deformación relativa, losa piso 8.

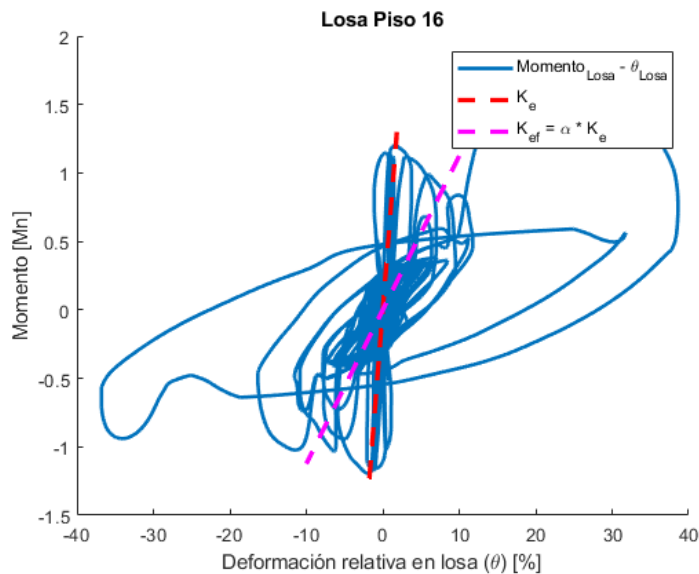


Ilustración 36. Respuesta dinámica flexión-deformación relativa, losa piso 16.

En las curvas presentadas, la rigidez efectiva se estima considerando el factor antes obtenido $\alpha=16\%$, como ponderador a la rigidez elástica estimada en la misma curva. En todas las curvas, la respuesta obtenida resulta consistente, ya que la rigidez efectiva calculada con el factor se aproxima de buena forma a la tendencia de la rigidez efectiva que presenta la losa al incursionar en el comportamiento no lineal. Aun así, existen ligeras diferencias, como se aprecia en la curva de la losa del piso 16 (Ilustración 36), donde la rigidez efectiva calculada pareciera sobreestimar a la tendencia de rigidez efectiva producida por la demanda sísmica. Lo anterior, tiene relación con que el factor de 16% se estimó para el caso global de la estructura (igual en todos los pisos), sin embargo, previamente se analizó que los factores de reducción por cada losa de piso presentan cierta variabilidad respecto al valor global

(Ilustración 24). Particularmente, la losa del piso 16, presentó un factor que quedaba por debajo del 16% considerado, justificándose de esta manera la ligera sobreestimación de rigidez que ocurre con el factor del caso global. En cuanto a las formas de las curvas propiamente tal, las ramas que se escapan del comportamiento histerético esperado podrían explicarse por efectos de modos superiores. Otra posible razón, es que en el presente modelo no se asignó un diafragma rígido para compatibilizar los desplazamientos de los muros. Es la propia losa la encargada de compatibilizar los desplazamientos horizontales. De esta forma, la losa está sometida a ciclos de carga y descarga de fuerza axial, lo que podría modificar su comportamiento en ciertos instantes de tiempo debido al acoplamiento inherente que poseen los modelos de fibras. Cabe señalar, que en una estructura real efectivamente la losa es la encargada de compatibilizar los desplazamientos en la horizontal, por lo que la carga axial efectivamente no es nula, pero eventualmente podría estar siendo sobreestimada en el modelo de este trabajo. Una mirada más detallada al modelamiento de estos elementos se hace necesaria para futuros trabajos.

Como evaluación final de este análisis, se utiliza el total de los registros escalados para obtener en cada uno de ellos el valor máximo y mínimo de carga axial que se produce en los muros. A partir de estos valores obtenidos para los 26 registros, se genera una curva de frecuencia de no excedencia para la variación máxima de carga axial respecto al caso gravitacional producto del acoplamiento que ocurre en los muros. La Ilustración 37 presenta la curva obtenida.

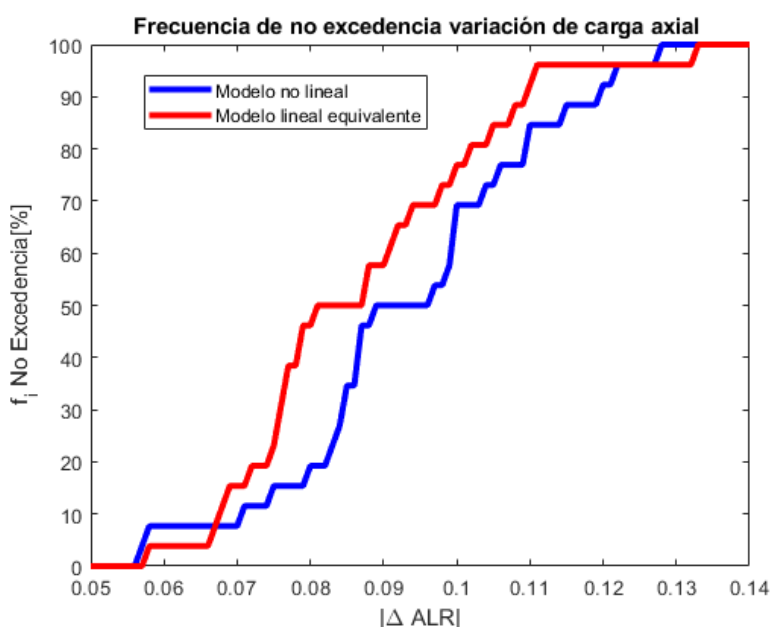


Ilustración 37. Frecuencia de no excedencia de variación máxima de carga axial (ΔALR) en muros.

Lo esperado en esta curva, es que la variación de carga axial alcanzada al nivel de desplazamiento δ_u en el análisis estático, se aproxime al 50% de no excedencia en ambos modelos en el análisis dinámico. Sin embargo, el comportamiento observado se aleja de aquello, resultando valores notoriamente mayores de acoplamiento. La respuesta observada, podría deberse a que tal como se describió a partir de las Ilustración 31 y 32, el nivel de carga axial del análisis pushover para el cual ocurre la equivalencia de carga axial entre el modelo no lineal y el modelo lineal equivalente, no se acerca al valor peak del comportamiento dinámico (que son precisamente los valores que se consideraron de cada registro para obtener la curva frecuencia de no excedencia). Las curvas de ambos modelos resultan semejantes, exceptuando el rango $|\Delta ALR|$ entre 0.076 y 0.087, en el cual el modelo lineal equivalente tiene una frecuencia de no excedencia mayor. En general, el modelo no lineal presenta una frecuencia de no excedencia de variación de carga axial menor al modelo lineal equivalente. Lo anterior, permite inferir que para los registros considerados, el modelo no lineal captura mayores niveles de acoplamiento en los muros. Si bien los resultados de valores máximos de ALR obtenidos en el análisis dinámico no se parecen a los arrojados por el análisis pushover, la respuesta tiempo historia del modelo lineal equivalente y no lineal son similares entre sí. Esto último cobra relevancia, ya que en realidad el análisis

estático y dinámico no son del todo comparables. Mientras el análisis estático en este trabajo representa la demanda a través de un patrón de cargas lineal en altura, el análisis dinámico lo hace mediante registros de aceleraciones basales, existiendo así variaciones en la respuesta. Considerando lo expuesto y a pesar de las diferencias en la respuesta entre los dos tipos de análisis sísmico llevados a cabo en este trabajo, es un aspecto destacable del modelo lineal equivalente que su respuesta dinámica se asimile a la del modelo no lineal.

6 Comentarios y conclusiones

Este trabajo propone y evalúa factores de reducción de rigidez para la modelación lineal equivalente de losas de acoplamiento en muros de hormigón armado en la tipología estructural estándar de edificio residencial chileno. Se propone el factor de reducción de rigidez para losas a partir de un análisis estático incremental (pushover), aplicado a un modelo de muros no lineales utilizando el elemento de modelación de muros MVLEM-3D en el software OpenSees y variando la modelación de la losa, contemplándola no lineal (mediante elementos basado en secciones fibras) en el modelo que busca simular la respuesta esperada del edificio, y lineal con reducción de rigidez en el modelo en que se evalúan los factores. El factor permite obtener una equivalencia de carga axial en los muros al nivel de desplazamiento δ_u de la normativa de diseño sísmico nacional, buscando ser un aporte como recomendación práctica de diseño al momento de modelar una estructura en forma totalmente lineal, como ocurre actualmente en muchas oficinas de cálculo estructural. También, los resultados del trabajo buscan ser útiles al momento realizar modelación no lineal de este tipo de sistemas estructurales, pero sin necesidad de modelar la losa como elemento no lineal. A través de una aproximación del comportamiento fuerza-desplazamiento en la losa, se estudia la variación de rigidez efectiva en la losa de cada piso respecto al factor de reducción de rigidez obtenido de manera global en la estructura, es decir, a partir de la carga axial obtenida en muros y considerándolo idéntico en todas las losas de pisos. Adicionalmente a la obtención del factor para las características estructurales del edificio utilizado y sus respectivos parámetros de diseño, se realiza un análisis de sensibilidad variando los parámetros cuantía de acero de refuerzo en losa y espesor de losa, con el objetivo de ampliar el rango de valores que podría tomar el factor según las características de esta, quedando propuesto para futuros trabajos estudiar la variación del factor de acuerdo a otras características sísmicas y estructurales, tales como otra clasificación de suelo y altura del edificio. En una última etapa del trabajo, con el objetivo de corroborar el factor propuesto se estudió la respuesta dinámica de la estructura considerando un set de 30 pares de registros sísmicos asociados a suelo tipo C, de los cuales 26 se utilizaron para estudiar el comportamiento de carga axial en el tiempo en los muros. Particularmente, se analizaron valores máximos y mínimos de carga axial en muros, así como la respuesta en flexión en la base de estos, contrastando el comportamiento del modelo completamente no lineal y el de losas lineales con la reducción de rigidez propuesta. A continuación, se presentan algunos comentarios y conclusiones de lo descrito.

- A partir del análisis estático incremental aplicado a los dos modelos antes descritos, se obtiene que el factor de reducción de rigidez en losas que para las características del caso en estudio, genera una equivalencia de carga axial en los muros de ambas modelaciones al nivel de desplazamiento δ_u es $\alpha=16\%$, por lo que este trabajo recomienda para edificios con una altura, espesor y cuantía de acero de refuerzo similar, considerar una inercia efectiva en losas igual a $16\% \cdot I_g$, siendo I_g la inercia bruta de la sección de losa para la tipología estudiada. El factor propuesto es menor al recomendado por el código ACI 318-14 en la Tabla 6.6.3.1, el cual recomienda un valor de 25%. La diferencia radica en que la recomendación del código busca abarcar variadas condiciones que podría tener la estructura a diseñar, sin centrarse únicamente en representar el nivel de acoplamiento que presenta el sistema estructural. Además, se basa en tipologías estructurales extranjeras que pueden distar del caso nacional. Por otra parte, este trabajo propone el factor $\alpha=16\%$, teniendo como objetivo principal aproximarse al nivel de acoplamiento que presentan los muros a un determinado nivel de desplazamiento, para la tipología y condiciones de diseño asociadas al caso en estudio. La diferencia entre considerar el factor recomendado por el código, este trabajo u otro, es un punto para tener en cuenta al

momento de modelar. Esto, ya que el nivel de acoplamiento guarda directa relación con la carga axial que recibe un muro, y dependiendo del rango de cargas axiales al que este quede sometido, la correcta estimación de su carga axial podría implicar un aumento o disminución de la capacidad a flexión en el diagrama de interacción. Adicionalmente, como muestran los resultados del análisis no lineal, el nivel de carga axial que recibe un muro interactúa con la rigidez tangente a flexión del mismo y así, con la carga asociada que este adquiere, por lo cual, simular el acoplamiento de la losa en un modelo lineal con la reducción de rigidez propuesta, se aproximará de mejor forma a lo que estará experimentando la estructura cuando incurSIONA en el rango no lineal.

- El factor propuesto se obtuvo a partir de una losa de acoplamiento que contempla cuantía mínima según ACI318-19. Para cuantías mayores, según el análisis de sensibilidad realizado, el factor tiende a aumentar, lo cual podría aproximarse al propuesto actualmente en el código o bien distar aún más para la tipología en estudio, quedando propuesto a futuros trabajos ahondar en su corroboración.
- La variación del espesor de la losa tiende a mantener un comportamiento constante en el factor de reducción, resultando más sensible a una variación en la cuantía de acero de refuerzo que en el espesor de losa.
- Existe una variación en la rigidez efectiva estudiada por cada piso según el análisis realizado en este trabajo, no obstante, la mediana de los factores de reducción de rigidez en losas por piso, así como la media sin datos extremos (ambos valores iguales a 15%), corroboran con una diferencia mínima el factor de reducción propuesto (16%). Se omite estudiar en mayor profundidad la causa de los valores extremos en los dos primeros pisos de la estructura, quedando propuesto la realización de un análisis más detallado de la influencia de la altura en la reducción de rigidez a considerar.
- El análisis dinámico realizado a la estructura da cuenta que el comportamiento de la carga axial que recibe cada muro en el modelo completamente no lineal y el de losas elásticas con reducción de rigidez difiere al iniciar la demanda sísmica, pero desde que ocurre la mayor demanda, el comportamiento de los modelos resulta bastante similar, dando cuenta que la rigidez estimada en la modelación lineal de losas representa de buena forma el comportamiento que tendrían los muros desde que la máxima demanda ocurre. Pese a que lo anterior es un aspecto positivo del factor propuesto, se debe considerar también que la modelación con dicho factor no es capaz de captar en el análisis dinámico (comparando con el máximo y mínimo nivel de carga axial del análisis estático) el mayor y menor peak de carga axial que generan los registros, pero sí los valores altos que siguen en la zona de mayor demanda sísmica.
- En la respuesta tiempo historia de carga axial que recibe cada muro, para algunos rangos temporales, el elemento de modelación MVLEM-3D arroja discrepancias en términos del equilibrio de fuerzas que el sistema debe satisfacer, resultando diferencias en el valor de carga axial que toma cada muro para un mismo instante de tiempo. Se realizaron test en el modelo en busca de corregirlas, pero no hubo mayor éxito. Si bien se desconoce la razón, una de las posibles causas podría ser la reciente implementación del elemento en el software OpenSees. Lo mencionado, es un punto que advertir, el cual se debe tener en consideración en futuros trabajos con el elemento, particularmente en análisis dinámico.
- La respuesta tiempo-historia corrobora las variaciones en la rigidez a flexión en los muros según el nivel de carga axial y cómo el muro que incurSIONA una mayor compresión es capaz de adquirir mayor momento volcante en la base en comparación al muro en tracción, fenómeno que es posible captar exclusivamente gracias a la modelación no lineal.

- La reducción de rigidez propuesta para las losas, se aproxima de manera aceptable a la rigidez efectiva que presenta su respuesta histerética, lo cual ratifica el factor de reducción de rigidez propuesto ($\alpha=16\%$) para la mayoría de los pisos. Sin perjuicio de lo anterior, se debe tener en consideración que existe una variabilidad en la rigidez efectiva en la altura de la estructura, así como un comportamiento irregular en los dos primeros pisos, lo cual también es captado con el análisis dinámico y requiere de un estudio mayor.

Se espera que los resultados expuestos en este trabajo puedan corroborarse abordando los tópicos que se han mencionado a lo largo de los resultados, análisis y posterior discusión, particularmente estudiando variaciones en parámetros de diseño y utilizando distintos elementos de modelación no lineal. Se recomienda profundizar la evaluación de factores a partir de análisis dinámico, el cual, debido a los diversos análisis teóricos previos que requiere, acompañado del costo computacional de su ejecución, se utilizó únicamente en este trabajo como herramienta de corroboración.

7 Agradecimientos

Primero que todo, mis sinceros agradecimientos a mi familia. Especialmente a mi madre Marissa, mi padre Aldo y mi abuela Mariela, fueron ellos quienes me formaron en lo valórico y me dieron la oportunidad de educarme durante estos años con la tranquilidad de un apoyo incondicional, creyendo y confiando siempre en mí, tanto en lo académico como en lo personal. Extiendo el agradecimiento al resto de mi familia, quienes siempre me han visto capaz de lograr objetivos a través de la constancia, esfuerzo y dedicación.

Durante mis seis años de universidad, he tenido grandes compañeros. He vivido jornadas maratónicas de estudio, así como momentos de relajación y diversión, agradezco todas las amistades que la universidad me permitió forjar. En el desarrollo de este trabajo, agradezco el ánimo y compañía de mi polola, sobre todo en la finalización de esta memoria.

Llevar a cabo este trabajo, en ningún caso hubiese sido posible sin el apoyo constante, buena disposición, paciencia y gran pedagogía de mi profesor guía Claudio Sepulveda, quien a varios kilómetros de distancia aceptó trabajar conmigo y sugerirme un tema de mi total agrado. Agradezco también a los profesores que me brindaron la oportunidad de realizar ayudantías, aportando a otros compañeros y permitiéndome fortalecer mis competencias académicas.

8 Referencias

- ACI Committee 318. (2014). *ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- American Society of Civil Engineers. (2013). *ASCE 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412855>
- American Society of Civil Engineers. (2016). *ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Carvalho, J., & Alcaíno, Pablo. (2012). Behavior of Reinforced Concrete Buildings in Viña del Mar: Lessons of February 27th 2010 Earthquake. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Computers and Structures, Inc. (2020). *SAP2000 v22.1.0 - Integrated Software For Structural Analysis and Design*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *NCh 433 Of. 1996 (Modificada en 2009): Diseño sísmico de edificios*.

- Instituto Nacional de Normalización. (2013). *NCh 2745 Of. 2013: Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*.
- Jünemann, R., de la Llera, J. C., Hube, M. A., Cifuentes, L. A., & Kausel, E. (2015). A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures*, 82, 168–185. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.10.014>
- Kolozvari, K., Kalbasi, K., Orakcal, K., & Wallace, J. (2021). Three-dimensional model for nonlinear analysis of slender flanged reinforced concrete walls. *Engineering Structures*, 236, 112105. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112105>
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical StressStrain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- McKenna, F., Fenves Gregory L., & Scott Michael H. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation*.
- Paulay, T., & Taylor, R. G. (1981). Slab Coupling of Earthquake-Resisting Shearwalls. *Journal Proceedings*, 78(2), 130–140. <https://doi.org/10.14359/6931>
- Pozo, J. D., Hube, M. A., & Kurama, Y. C. (2020). Quantitative assessment of nonlinear macro-models for global behavior and design of planar RC walls. *Engineering Structures*, 224, 111190. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111190>
- Ramos, L., & Hube, M. (2020). Contribution of coupling elements to the seismic demand of walls in reinforced concrete buildings. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17(2). <https://doi.org/10.1590/1679-78255931>
- Ramos, L., & Hube, M. A. (2021). Seismic response of reinforced concrete wall buildings with nonlinear coupling slabs. *Engineering Structures*, 234, 111888. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.111888>
- Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam–Column Elements. *Journal of Structural Engineering*, 132(2), 244–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:2(244))
- Scott, M. H., Franchin, P., Fenves, G. L., & Filippou, F. C. (2004). Response Sensitivity for Nonlinear BeamColumn Elements. *Journal of Structural Engineering*, 130(9), 1281–1288. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:9\(1281\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:9(1281))