



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**ESTRATEGIAS PARA LA INSTALACIÓN  
DE DISIPADORES DE ENERGÍA  
METÁLICOS EN EDIFICIOS DE  
PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO  
RELLENOS CON MUROS DE  
ALBAÑILERÍA**

**SILVANA MAGDALENA ROMERO CORTEZ**

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado  
como parte de los requisitos para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

JOSÉ LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY

JORGE GUSTAVO CREMPIEN DE LA CARRERA

Santiago de Chile, (Septiembre, 2021)

© MMXXI, SILVANA MAGDALENA ROMERO CORTEZ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

# ESTRATEGIAS PARA LA INSTALACIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA METÁLICOS EN EDIFICIOS DE PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO RELLENOS CON MUROS DE ALBAÑILERÍA

**SILVANA MAGDALENA ROMERO CORTEZ**

Miembros del Comité:

JOSÉ LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY 

JORGE GUSTAVO CREMPIEN DE LA CARRERA

CRISTIÁN ELISEO SANDOVAL MANDUJANO 

ROBERTO RODRIGO AGUIAR FALCONÍ

NÉSTOR GUILLERMO ESCALONA BURGOS

 Firmado electrónicamente por:  
ROBERTO RODRIGO  
WASHINGTON AGUIAR  
FALCONI

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado  
como parte de los requisitos para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Septiembre, 2021)

© MMXXI, SILVANA MAGDALENA ROMERO CORTEZ

*Dedicado a Dios por la fortaleza,  
sabiduría y bendiciones que me dio  
día a día, a mis padres Cheyla  
María y José Vicente por ser mi  
inspiración de superación, a mis  
hermanos Mayra Rocío, Fátima  
Aracely y José Luis por su  
confianza en mí, y a todos los que  
fueron parte de este logro.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis Supervisores, Profesor José Luis Almazán Campillay por sus enseñanzas, paciencia y apoyo en el desarrollo de la tesis, y Profesor Jorge Gustavo Cremien de la Carrera por sus valiosos aportes para mejorar la tesis; y, a todos los que me ayudaron y apoyaron en este proceso lleno de un gran aprendizaje.

Agradezco a mis padres y mis hermanos por su apoyo incondicional y confianza en mí, por sus frases de motivación, alegría y fortaleza para siempre seguir adelante.

Agradezco a aquellas personas y amigos por todas las bendiciones y deseos de éxito que me expresaron.

Agradezco a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación - SENESCYT, por financiar mi beca de estudios.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |     |
|--|-----|
| AGRADECIMIENTOS  | iv  |
| ABSTRACT   | vi  |
| RESUMEN  | vii |
| 1. INTRODUCCIÓN  | 1   |
| 1.1. Motivación del estudio . . . . .  | 1   |
| 1.2. Estado del arte . . . . .   | 4   |
| 1.2.1. Disipadores de energía metálicos . . . . .  | 4   |
| 1.2.2. Elementos secundarios para instalación de dispositivos de disipación . . . . .                    | 5   |
| 1.2.3. Muros de albañilería . . . . .  | 7   |
| 1.3. Metodología . . . . .   | 9   |
| 2. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA PROPUESTA EN BASE A UN<br>MODELO BIDIMENSIONAL DE 2 PISOS Y 1 VANO        | 11  |
| 2.1. Esquema de la propuesta: disipadores metálicos mediante albañilería<br>confinada dilatada . . . . . | 12  |
| 2.2. Descripción del Modelo 2D . . . . .   | 15  |
| 2.3. Propiedades de la albañilería . . . . .   | 16  |
| 2.4. Disipadores de energía . . . . .  | 18  |
| 2.4.1. Elemento link . . . . .   | 18  |
| 2.4.2. Modelo de plasticidad de Wen . . . . .  | 19  |
| 2.4.3. Propiedades de los disipadores . . . . .  | 20  |
| 2.5. Modelamiento del muro . . . . .   | 21  |
| 2.5.1. Muro con elementos shell - ACD . . . . .  | 21  |
| 2.5.2. Muro con diagonal equivalente - ACD . . . . .   | 23  |
| 2.5.3. Muro con elementos shell - ACPD . . . . .   | 25  |
| 2.6. Resultados de los análisis . . . . .  | 25  |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.6.1. | Análisis Estático Lineal (AEL) - muros con elementos shell . . . . .                            | 26 |
| 2.6.2. | Análisis Estático no-lineal (AENL) . . . . .  | 30 |
| 3.     | MODELACIÓN NUMÉRICA - ESTRUCTURA 3D   | 49 |
| 3.1.   | Descripción de la estructura . . . . .  | 49 |
| 3.2.   | Materiales . . . . .  | 50 |
| 3.3.   | Cargas gravitacionales . . . . .  | 52 |
| 3.4.   | Amortiguamiento de la estructura . . . . .  | 53 |
| 3.5.   | Rótulas plásticas . . . . .   | 55 |
| 3.5.1. | Relación Momento - Curvatura . . . . .  | 55 |
| 3.5.2. | Reducción de rigidez o rigidez efectiva en elementos estructurales . . . . .                    | 57 |
| 3.5.3. | Curva esqueleto (backbone curve) de las rótulas plásticas . . . . .                             | 58 |
| 3.5.4. | Modelo histerético de las rótulas plásticas . . . . .   | 60 |
| 3.5.5. | Propiedades que definen las rótulas plásticas en vigas y columnas . . . . .                     | 61 |
| 3.6.   | Disipadores de energía . . . . .  | 63 |
| 3.7.   | Registro sísmico . . . . .  | 63 |
| 3.8.   | Análisis realizados . . . . .   | 65 |
| 3.9.   | Ecuación de movimiento . . . . .  | 65 |
| 4.     | RESPUESTA DEL ANÁLISIS ELÁSTICO EQUIVALENTE E INELÁSTICO<br>DE LA ESTRUCTURA 3D SIN DISIPADORES | 67 |
| 4.1.   | Variables analizadas en la respuesta . . . . .  | 67 |
| 4.2.   | Derivas efectivas de entrepiso . . . . .  | 67 |
| 4.3.   | Energía disipada . . . . .  | 69 |
| 4.4.   | Resultados - dirección X (lado corto) . . . . .   | 70 |
| 4.4.1. | Desplazamientos y derivas efectivas . . . . .   | 70 |
| 4.4.2. | Rótulas plásticas y energía disipada: vigas y columnas . . . . .                                | 70 |
| 5.     | RESPUESTA DEL ANÁLISIS INELÁSTICO DE LA ESTRUCTURA 3D SIN<br>Y CON DISIPADORES                  | 75 |
| 5.1.   | Variables analizadas en la respuesta . . . . .  | 75 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2. Resultados en dirección X (lado corto) . . . . .   | 76 |
| 5.2.1. Desplazamientos y derivas efectivas . . . . .  | 76 |
| 5.2.2. Reducción y/o aumento de formación de rótulas plásticas por efecto de<br>los disipadores . . . . . | 77 |
| 5.2.3. Rótulas plásticas y energía disipada: vigas y columnas . . . . .                                   | 78 |
| 6. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA  | 83 |
| 6.1. Conclusiones . . . . .   | 83 |
| 6.2. Investigación futura . . . . .   | 84 |
| BIBLIOGRAFÍA  | 85 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Ejemplos de dispositivos metálicos . . . . .  | 5  |
| 1.2  | Elementos secundarios para colocación de dispositivos de disipación . . . . .   | 6  |
| 2.1  | Esquema del muro de albañilería confinada dilatada (ACD) con disipadores . . . . .  | 12 |
| 2.2  | Detalle A - Dilatación del muro ACD con viga inferior y disipadores . . . . .   | 13 |
| 2.3  | Esquema albañilería confinada dilatada (ACD) con disipadores y refuerzo en elementos de confinamiento . . . . .             | 14 |
| 2.4  | Esquema albañilería confinada dilatada (ACD) y albañilería confinada parcialmente dilatada (ACPD) sin disipadores . . . . . | 14 |
| 2.5  | Detalles de los esquemas ACD y ACPD . . . . .   | 15 |
| 2.6  | Modelo 2D . . . . .   | 15 |
| 2.7  | Esquema del muro de ACD modelado con shell con disipadores . . . . .  | 22 |
| 2.8  | Esquema del muro de ACD modelado con diagonales equivalentes con disipadores . . . . .                                      | 24 |
| 2.9  | Elementos elásticos e inelásticos del sistema ACD con disipadores - Muro representado con diagonales equivalentes . . . . . | 24 |
| 2.10 | Esquema del muro de ACPD modelado con shell sin disipadores . . . . .   | 25 |
| 2.11 | Fuerza lateral aplicada en el pórtico e identificación de elementos - AEL . . . . .   | 26 |
| 2.12 | Desplazamiento de techo muros conectados al pórtico - AEL . . . . .   | 27 |
| 2.13 | Desplazamiento de techo muros desconectados al pórtico - AEL . . . . .  | 27 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.14 | Esfuerzos internos en vigas y columnas con muros desconectados al pórtico - AEL . . . . .                                 | 29 |
| 2.15 | Esquema de rótula plástica al final del nudo rígido - muro de ACD con shell y disipadores . . . . .                       | 31 |
| 2.16 | Formación de rótulas en función al corte y desplazamiento de techo de PL, ACD y ACPD muros desconectados - AENL . . . . . | 32 |
| 2.17 | Estado final de formación de rótulas, muros desconectados - AENL . . . . .  | 34 |
| 2.18 | Esfuerzos internos en la viga 2, muros desconectados - AENL . . . . .   | 35 |
| 2.19 | Esfuerzos internos en la columna 1, muros desconectados - AENL . . . . .  | 36 |
| 2.20 | Tensiones de corte con capacidad total de disipadores de 400 $kN$ - AENL . . . . .  | 38 |
| 2.21 | Tensiones de corte con 2 disipadores por muro - AENL . . . . .  | 39 |
| 2.22 | Tensiones máximas (Tracción ) y mínimas (Compresión) con capacidad total de disipadores de 400 $kN$ - AENL . . . . .      | 40 |
| 2.23 | Tensiones máximas (Tracción ) y mínimas (Compresión) con 2 disipadores por muro - AENL . . . . .                          | 41 |
| 2.24 | Formación de rótulas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL . . . . .                                     | 45 |
| 2.25 | Estado final de formación de rótulas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL . . . . .                     | 46 |
| 2.26 | Esfuerzos internos en vigas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL . . . . .                              | 47 |
| 2.27 | Esfuerzos internos en columnas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL . . . . .                           | 48 |
| 2.28 | Deformación en los disipadores mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL . . . . .                           | 48 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Configuración geométrica de la estructura . . . . .   | 50 |
| 3.2 | Refuerzo de vigas . . . . .   | 51 |
| 3.3 | Refuerzo de columnas . . . . .  | 51 |
| 3.4 | Curva esqueleto . . . . .   | 58 |
| 3.5 | Registro sísmico y espectros de diseño NEC-15 y del registro . . . . .  | 64 |
| 4.1 | Parámetros para determinar deriva efectiva . . . . .  | 68 |
| 4.2 | Desplazamiento - Piso 10 . . . . .  | 70 |
| 4.3 | Desplazamientos, derivas efectivas, y formación de rótulas plásticas . . . . .  | 71 |
| 4.4 | Rotación plástica, energía disipada y ductilidad - vigas . . . . .  | 72 |
| 4.5 | Momento vs rotación plástica y energía disipada - vigas . . . . .   | 72 |
| 4.6 | Curva de interacción - columnas . . . . .   | 74 |
| 4.7 | Momento vs rotación plástica y energía disipada - columnas . . . . .  | 74 |
| 5.1 | Desplazamiento - Piso 10 . . . . .  | 76 |
| 5.2 | Desplazamientos, derivas efectivas, y disipadores . . . . .   | 77 |
| 5.3 | Formación de rótulas plásticas en vigas y columnas . . . . .  | 78 |
| 5.4 | Rotación plástica, energía disipada y ductilidad - vigas . . . . .  | 79 |
| 5.5 | Momento vs rotación plástica y energía disipada - vigas . . . . .   | 80 |
| 5.6 | Curva de interacción - columnas . . . . .   | 81 |
| 5.7 | Momento vs rotación plástica y energía disipada - columnas . . . . .  | 82 |
| 5.8 | Porcentaje de reducción de derivas efectivas, rotación plástica y energía<br>disipada en vigas al incorporar disipación . . . . . | 82 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Resumen de propiedades mecánicas de albañilería de bloques de hormigón .                    | 10 |
| 2.1 | Propiedades del material - Modelo 2D . . . . .  | 16 |
| 2.2 | Propiedades de las rótulas plásticas en vigas y columnas con $P = 0$ - Modelo 2D . . . . .  | 16 |
| 2.3 | Propiedades de la albañilería confinada - Modelo 2D . . . . .                               | 17 |
| 2.4 | Tensiones en muros de ACD y ACPD conectados y desconectados de los pórticos - AEL . . . . . | 29 |
| 2.5 | Tensiones en muros de ACD con 1 disipador . . . . .   | 42 |
| 2.6 | Tensiones en muros de ACD con 2 disipadores . . . . .                                       | 42 |
| 2.7 | Tensiones en muros de ACD con 3 disipadores . . . . .                                       | 42 |
| 2.8 | Tensiones en muros de ACD con 5 disipadores . . . . .                                       | 43 |
| 3.1 | Propiedades del material . . . . .  | 52 |
| 3.2 | Propiedades de la albañilería confinada . . . . .   | 52 |
| 3.3 | Sobrecargas aplicadas en vigas . . . . .  | 53 |
| 3.4 | Coefficientes proporcionales o que escalan a las matrices de masa y rigidez . .             | 55 |
| 3.5 | Propiedades de las rótulas plásticas en vigas - $P = 0$ . . . . .                           | 62 |
| 3.6 | Propiedades de las rótulas plásticas en columnas . . . . .                                  | 62 |
| 3.7 | Propiedades de los disipadores - Modelo tipo Bouc-Wen . . . . .                             | 63 |

## ABSTRACT

This research studies a proposal seismic structural reinforcement in concrete frame buildings through out the approach based on the installation of metallic energy dissipators on expanded confined masonry walls.

The structural response is reduced through out the application of the proposal reinforcement, which uses the own structural elements of a building such as the masonry walls which are utilized as supports of energy dissipators devices. This approach minimizes both the economic and architectural issues which are essential parameters in the reinforcement of structures. The capacity of the dissipators depends on the shear strength average of the confined masonry walls.

Moreover, considering a limited capacity of the energy dissipators is assumed that masonry walls have either elastic behavior or minimum damage allows their modelling through out equivalent diagonal struts.

The results show that both the proposal reinforcement and an adequate height distribution of the dissipators capacity allow reduce the damage mainly on beams. The damage in columns can reduce, increase or remain similar in comparison to the structure without reinforcement.

**Keywords:** Frame, masonry, expanded, dissipators, and hinges.

## RESUMEN

Esta investigación estudia una propuesta de reforzamiento estructural sísmico en edificios de pórticos de hormigón armado, utilizando disipadores de energía metálicos instalados sobre muros de albañilería confinada dilatada.

La respuesta estructural se reduce con la aplicación de la propuesta de reforzamiento, la cual utiliza la albañilería propia de la estructura como soporte de los disipadores. Con ello, se minimiza las limitaciones económicas y arquitectónicas que representa el reforzamiento de estructuras. La capacidad de los disipadores es dependiente de la resistencia promedio al corte de los muros de albañilería confinada.

Además, al considerar una capacidad limitada de los disipadores, es posible representar de forma aproximada los muros de albañilería mediante diagonales equivalentes, asumiendo que los mismos permanecen elásticos o con daños mínimos.

Los resultados muestran que, con la propuesta de reforzamiento y una adecuada distribución de la capacidad de los disipadores en altura, se logra disminuir el daño, principalmente en vigas. En el caso de las columnas, el daño puede reducirse, incrementarse o mantenerse de forma similar en comparación con la estructura sin reforzamiento.

**Palabras Claves:** Pórtico, albañilería, dilatado, disipadores, y rótulas.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación del estudio

En países como Ecuador y Perú las construcciones de edificios mediante sistemas estructurales en base a pórticos de hormigón armado rellenos con muros de albañilería han sido y siguen siendo actualmente muy utilizados. Esto se debe principalmente por el bajo costo económico que representan frente a otras alternativas estructurales como sistemas duales o muros rígidos. Al ser países que se encuentran en zonas de alta sismicidad, han sido afectados por terremotos de gran magnitud en los últimos años, ocasionando muchas pérdidas, principalmente pérdidas humanas, sin dejar de lado las pérdidas económicas. Dichos eventos también han dejado claro la importancia de contar con alternativas que busquen mejorar la respuesta estructural ante acciones sísmicas. Un factor que es importante tener en cuenta es el factor socio-económico, que muchas veces es un limitante, debido a los altos costos que representan las soluciones de reforzamiento en las estructuras.

(Butenweg y Marinković, 2018; Butenweg y Marinković, 2019; Marinković, Flores y Butenweg, 2020) hacen referencia a que las paredes de relleno de albañilería se utilizan ampliamente para rellenar pórticos de hormigón y de acero en una gran parte de las estructuras en el mundo y en las construcciones modernas. Estas representan el sistema de cerramiento más tradicional por la necesidad de separar el espacio interno y externo del entorno de los edificios, ya que son fáciles de instalar y reorganizar. Además, cumplen con todos los requisitos estándar en términos de aislamiento acústico, aislamiento térmico, protección contra incendios y durabilidad, por lo tanto, son atractivos para las demandas de la arquitectura moderna.

(Wijaya, et al., 2020) mencionan que estudios realizados demuestran que el relleno de albañilería contribuye significativamente a la demanda sísmica impuesta a los edificios de hormigón armado. Sin embargo, en general, estos muros de relleno se consideran como elementos no estructurales en el diseño y evaluación sísmica de edificios, lo cual

conlleva a una predicción inexacta del comportamiento sísmico de los edificios. La modelación de muros de relleno de albañilería sigue siendo un desafío, especialmente porque estos ejercen un comportamiento de material no lineal complejo, y están sujetos a una gran variación en las propiedades del material. El Manual para la Regulación de Procesos Constructivos de Ecuador (2019) muestra también información referencial sobre el comportamiento y el diseño sísmico de la pared no estructural, respecto al comportamiento probable inferido de los daños observados en el terremoto de Ecuador en 2016.

(Carrillo, 2008) en su tesis, muestra el uso de muros de albañilería desacoplados de la estructura principal mediante una junta de dilatación, y señala que el aislamiento de los muros de albañilería evitó serios problemas a la estructura principal. Así mismo, indica que el uso de muros desacoplados, es una técnica constructiva que permite realizar el análisis sísmico de edificios de la forma tradicional, es decir, considerando para el modelado solo las vigas y columnas de la estructura principal. Y al estar el muro desacoplado del pórtico mediante la junta de dilatación, la albañilería solo interactúa con los elementos de confinamiento y no con los elementos del pórtico.

Existen muchas alternativas de reforzamiento para mejorar el comportamiento de una estructura, las cuales dependen de la necesidad y del costo. Una de esas alternativas, son los dispositivos de disipación de energía pasivos. La razón principal para usar dispositivos pasivos de disipación de energía en una estructura, es limitar las deformaciones inelásticas en elementos estructurales (Symans, et al., 2008). La tecnología más usada actualmente, por su relación costo/beneficio, son los denominados disipadores metálicos (Constantinou, Soong y Dargush, 1998). Los disipadores metálicos tienen un comportamiento predecible, estable, y confiable a largo plazo. Sin embargo, uno de los grandes retos prácticos del proyectista cuando diseña una estructura con disipadores de energía, es el acordar con el arquitecto la ubicación de estos dispositivos, tanto en planta como en altura. Esta dificultad es aún mayor en edificios habitacionales conformados con pórticos de hormigón armado rellenos de mampostería de ladrillos (cerámicos o de hormigón).

Con lo antes mencionado, se puede decir que, actualmente los sistemas estructurales utilizando pórticos de hormigón armado rellenos con albañilería aún representan un considerable porcentaje en las construcciones en algunos países. Por otra parte, varios estudios demuestran que cuando los muros de albañilería son utilizados como rellenos de pórticos y que dependiendo de como estén provistos, estos tienen un efecto sobre la respuesta de la estructura. Así mismo, que los disipadores metálicos, son una tecnología ampliamente usada para reforzamiento de estructuras. Por tal razón, esta investigación buscó entregar algunas soluciones plausibles aplicables para el sistema estructural en mención. La finalidad, es mejorar la respuesta estructural y aprovechar algunos componentes que forman la estructura como parte de la solución.

La propuesta del estudio consiste en que, la albañilería de relleno de los pórticos sea confinada y dilatada con respecto a las columnas y a las vigas, buscando evitar que estas impidan la flexibilidad de la estructura y aprovechar esa flexibilidad para disipar energía. Al tener un muro que se encuentra dilatado de la estructura principal, se logra que la estructura sea flexible, y además, se estaría evitando que los muros sufran daños o que los daños sean mínimos. Los muros de albañilería antes de fisurarse o frente a fisuras mínimas presentan una rigidez alta y por ende una resistencia considerable. La idea es aprovechar la capacidad de resistencia de los muros de albañilería confinada y utilizarlos como elementos secundarios para la instalación de los disipadores de energía metálicos. El objetivo es conseguir que la deformabilidad del pórtico sea transmitida a los disipadores, logrando así, reducir el daño en los elementos estructurales, tales como vigas y columnas. Al mismo tiempo, es importante tener en cuenta que la capacidad de los disipadores es limitada por la capacidad de resistencia al corte de los muros de albañilería. Por otra parte, se pretende utilizar pocos planos resistentes, considerando de esta manera las limitaciones económicas y arquitectónicas que representan los reforzamientos en las estructuras. Por último, aprovechar que los muros de albañilería siguen siendo atractivos para las demandas de la arquitectura moderna, ya que cumplen con todos los requisitos estándar en términos de aislamiento acústico, aislamiento térmico, protección contra incendios, durabilidad, entre otros.

El objetivo general de la tesis es estudiar un par de alternativas de reforzamiento estructural sísmico de edificios de pórticos de hormigón armado rellenos de albañilería, mediante disipadores de energía metálicos, considerando limitaciones arquitectónicas y económicas. Como objetivos específicos se tienen los siguientes: (1) Estimar la resistencia al corte de los muros de albañilería confinada dilatada (ACD). (2) Minimizar la interferencia estructural entre la ACD y las vigas y columnas del pórtico que la circunscriben. (3) optimizar la posición de los disipadores de energía en la interfaz viga-ACD.

## **1.2. Estado del arte**

### **1.2.1. Disipadores de energía metálicos**

La razón principal para usar dispositivos pasivos de disipación de energía en una estructura, es limitar las deformaciones inelásticas en elementos estructurales (Symans, et al., 2008).

(Constantinou, Soong y Dargush, 1998) mencionan que uno de los mecanismos más eficaces para la disipación de energía que entra a una estructura durante un terremoto, es a través de la deformación inelástica de sustancias metálicas. Por otro lado, señalan que la idea de utilizar disipadores histeréticos metálicos como suplementos dentro de la superestructura con la finalidad de lograr absorber una gran parte de la energía sísmica inició con el trabajo conceptual y experimental de Kelly et al. (1972) y Skinner et al. (1975). Además, que durante los años siguientes, se ha avanzado considerablemente en el desarrollo de disipadores metálicos y se han propuesto muchos diseños nuevos. En síntesis, independientemente de la configuración geométrica de los distintos dispositivos metálicos, el mecanismo esencial de disipación en todos los casos resulta de la deformación inelástica de un metal.

En la figura 1.1 se muestran algunos ejemplos de dispositivos metálicos: ADAS (Added Damped And Stiffness), TADAS (Triangular Plate Added Damping And Stiffness), BRB



Figura 1.1. Ejemplos de dispositivos metálicos

(Buckling-Restrained Brace), SLB (Shear Link Bozzo), UFP (U-shape Flexural Plates), entre otros.

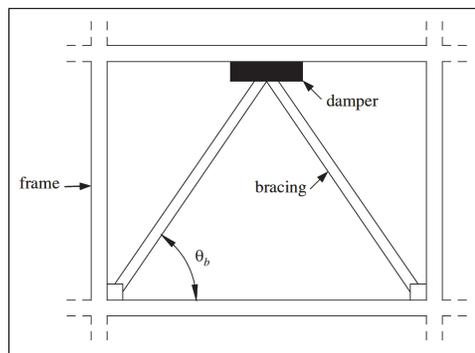
En general, estos disipadores presentan un comportamiento predecible, estable, y confiable a largo plazo, y poseen buena resistencia ante factores ambientales y de temperatura (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012).

### 1.2.2. Elementos secundarios para instalación de dispositivos de disipación

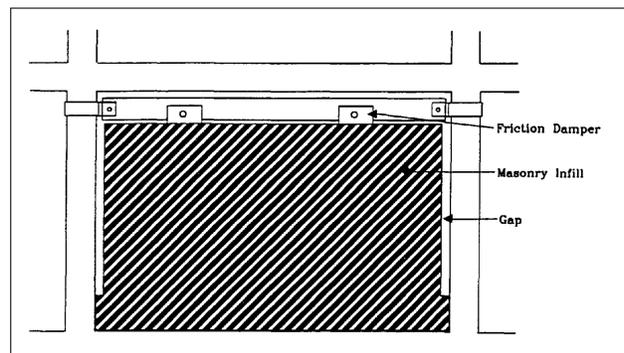
Los disipadores de energía histeréticos se activan mediante el desplazamiento relativo a través del dispositivo, por lo que entonces, aprovechan la deformación de entrepiso de la estructura para activarse. A continuación, se describen algunos elementos secundarios utilizados para instalación de dispositivos de disipación.

Los elementos Chevron o V invertida son ampliamente utilizados para conectar los disipadores de energía a la estructura principal. El disipador va conectado en su parte superior con la viga de la estructura y en su parte inferior va conectado a la viga que se apoya sobre el Chevron, en la figura 1.2(a) se muestra la típica configuración Chevron-Amortiguador.

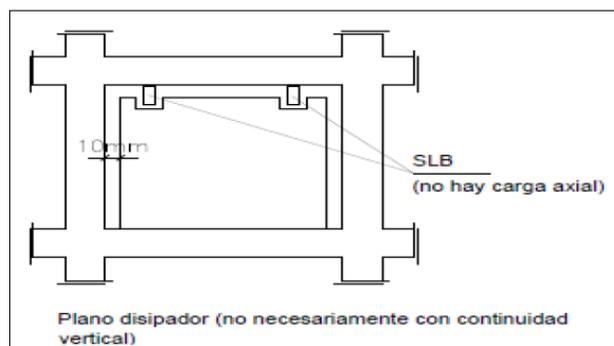
Los elementos que forman el Chevron o V invertida deben ser lo suficientemente rígidos para conseguir que trabajen en el rango elástico ante un sismo de gran magnitud. De esta manera, se logra que el desplazamiento lateral en la parte inferior del disipador sea similar al desplazamiento del entrepiso inferior (Aguiar, Rodríguez y Mora, 2016).



(a) Típica configuración Chevron-Amortiguador (Moreschi, 2000)



(b) Amortiguador de fricción en muros de mampostería (Rao, Gergely y White, 1995)



(c) Muro de hormigón desacoplado y disipador SLB (Bozzo y Gaxiola, 2015)

Figura 1.2. Elementos secundarios para colocación de dispositivos de disipación

(Rao, Gergely y White, 1995) proponen un esquema para la instalación de amortiguadores de fricción con relleno de albañilería (figura 1.2(b)). Realizaron tests sobre una mesa vibratoria utilizando dos movimientos de suelo diferentes en un pórtico de un piso de acero a escala. Observaron que, para un movimiento de suelo hubo reducción de corte y drifts con el sistema muro-amortiguador. Mientras que, para el otro movimiento se produjo un incremento en el drifts y corte, esto se debió a que la característica del movimiento de suelo era impulsivo.

Dentro del estudio, en base a consultas realizadas a varios consultores respecto del esquema propuesto, se hizo mención a lo siguiente: la albañilería debe ser reforzada, que los muros de albañilería tienen problemas fuera del plano e incrementan el corte en la base. Por otro lado, que si no hubiese problemas de espacio y que la fundación estuviese comprometida, el uso de muros de albañilería podría ser una elección óptima de retrofit. Además, que estos muros tienen la ventaja de que son fáciles de construir, entre otras.

(Bozzo y Gaxiola, 2015) presentan un estudio en el cual buscan unificar los campos de control moderno y diseño clásico de estructuras mediante los conceptos de rigidez, flexibilidad y ductilidad incorporando conexiones tipo “Shear Link Bozzo (SLB)”. Dentro de los alcances de la investigación plantean una diversidad de sistemas estructurales más eficientes y seguros a los empleados en la actualidad, y muestran algunas alternativas de acoplamiento o colocación entre el sistema rígido y el flexible. Así mismo, se observa el uso de muros desacoplados de hormigón armado con dispositivos de disipación de energía tipo SLB (figura 1.2(c)). Finalmente, señalan que todas las alternativas han sido ejecutadas en edificios construidos.

### **1.2.3. Muros de albañilería**

(Astroza y Schmidt, 2004), en base a la información de estudios experimentales de muros de albañilería confinada realizados en Chile, México y Venezuela, establecen niveles de deformación asociados con diferentes estados límites. Mencionan que, el comportamiento de muros de albañilería confinada depende de la calidad de la albañilería,

las dimensiones y cuantía de refuerzo del confinamiento. Así mismo, también dependen del trabajo conjunto entre el paño de albañilería y el confinamiento, esbeltez del muro y existencia de armadura horizontal en el paño. En las conclusiones, entre otras cosas indican que la capacidad de deformación aumenta con la presencia de carga vertical, que el comportamiento de los muros estuvo controlado por corte.

(Ogaz, Astroza y Sierra, 2005) realizaron ensayos de muros de albañilería estructural contruidos con bloques huecos de hormigón y cuantía reducida de refuerzos. Y señalan que las conclusiones de la investigación se encuentran limitadas por la calidad de los materiales, por el tipo y cuantía de refuerzo utilizados. Con respecto a las conclusiones entre otras cosas se indica que la capacidad resistente de los muros ensayados no depende de la modalidad de refuerzo utilizada, sino que está determinada por la capacidad de la albañilería. Además, que los muros de albañilería confinada resultan más rígidos que los muros de mampostería armada, debido principalmente a la presencia de los pilares de confinamiento. Sin embargo, una vez que se producen los primeros daños en la albañilería la rigidez cae fuertemente, llegando a ser un 50 % y un 70 % de la rigidez elástica en el caso de los muros de albañilería confinada y armada, respectivamente. Por otra parte, que la capacidad de deformación se ve favorecida por la presencia de los pilares de confinamiento. Dicho confinamiento permite alcanzar altas distorsiones angulares sin un deterioro importante de la capacidad resistente, manteniendo la integridad del paño de albañilería, lo que se traduce en menores anchos de grietas.

(Ramírez, Sandoval y Almazán, 2016) ensayaron 10 muros de corte de albañilería parcialmente rellenos de hormigón armado, sometidos a cargas cíclicas laterales inversas en el plano. De entre los resultados mencionan que la evolución del daño se propagó de manera similar en todos los muros ensayados hasta alcanzar el nivel de resistencia máxima. Además, observaron que la evolución y extensión del daño dependió de las características y condiciones de cargas propias de cada muro. Así mismo, examinaron la predicción de ciertas expresiones analíticas reportadas en códigos para predecir la resistencia máxima de corte de muros. Al contrastarlas con los resultados experimentales, encontraron que

con algunas expresiones se tenía resultados no tan confiables y en otros casos más fiables y conservadores.

(Calderón, et al., 2020) ensayaron 8 muros de albañilería parcialmente rellenos de hormigón, bajo carga axial constante y desplazamientos cíclicos impuestos, con una condición de límite similar a un voladizo. En los resultados entre otras cosas se menciona que se logró un ligero incremento en la rigidez lateral al emplear bloques más fuertes, mientras que la resistencia al corte se mantuvo constante. El aumento de la relación de aspecto de la pared, redujo la fragilidad de la respuesta y la resistencia al corte. La reducción de la cantidad de refuerzo vertical, redujo la resistencia al corte resultante, aunque también ralentizó la degradación de la resistencia posterior al valor máximo. Los elementos de borde transversales proporcionaron integridad a la respuesta de la pared, generaron una degradación de la resistencia más suave y mejoraron la simetría de la respuesta, pero no elevaron la resistencia lateral.

En la tabla 1.1 se resumen algunas de las propiedades mecánicas de la albañilería que fueron utilizadas en los estudios y ensayos descritos.

### **1.3. Metodología**

En la presente investigación, se utilizó una metodología numérica empleando el software comercial de análisis estructural SAP2000 (Computers & Structures, Inc), y MATLAB (Mathworks, Inc.) para el procesamiento de los resultados. La investigación estuvo dividida en dos partes:

La primera parte consistió en evaluar preliminarmente un modelo bidimensional de 2 pisos y 1 vano, que representa un pórtico relleno de albañilería en base a la propuesta planteada de muros de albañilería confinada dilatada (ACD) con disipadores metálicos, mediante un análisis estático no-lineal. La evaluación estuvo orientada a comprender de mejor manera el comportamiento estructural de la propuesta en relación a la flexibilidad del pórtico y la capacidad de los disipadores. El objetivo fue asegurar el comportamiento

Tabla 1.1. Resumen de propiedades mecánicas de albañilería de bloques de hormigón

| <i>Autor</i>                                       | <i>Descripción</i>              | <i>Valores [MPa]</i> |
|--|---------------------------------|----------------------|
| Astroza y Schmidt, 2004                            | $f'_m$                          | 5.00 - 15.00         |
|  | $\tau_m$                        | 0.70 - 1.00          |
| Ogaz, Astroza y Sierra, 2005                       | $f'_m$                          | 6.89                 |
|  | $\tau_m$                        | 0.55                 |
|  | $E_m$                           | 4849.00              |
|  | $G_m$                           | 528.00               |
|  | $f'_c$ ( <i>Confinamiento</i> ) | 23.90                |
| Ramirez, Sandoval y Almazán, 2016                  | $f'_m$                          | 5.54                 |
|  | $\tau_m$                        | 0.61                 |
|  | $E_m$                           | 6465.00              |
|  | $G_m$                           | 1976.00              |
| Calderón, Vargas, Sandoval y Araya-Letelier, 2020) | $f'_m$                          | 9.67 - 12.47         |
|  | $\tau_m$                        | 0.37 - 0.66          |
|  | $E_m$                           | 6078.00 - 8174.00    |

elástico de los muros de ACD modelado con elementos shell y posteriormente con diagonales equivalentes.

La segunda parte consistió en analizar un modelo estructural idealizado, que representa edificios típicos de múltiples pisos con planta alargada de pórticos de hormigón armado, empleando las técnicas usuales de análisis dinámico no-lineal. Para tal efecto, se analizó la respuesta del edificio sin disipadores, evaluando principalmente el daño asociado a la degradación de rigidez y resistencia por deformaciones inelásticas repetitivas en vigas. Posteriormente, se procedió a incluir los disipadores de energía mediante los muros de ACD, los cuales fueron incorporados con la finalidad de lograr una reducción de daño en las vigas.

## **2. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA PROPUESTA EN BASE A UN MODELO BIDIMENSIONAL DE 2 PISOS Y 1 VANO**

Según la literatura investigada, en general los muros de albañilería están dilatados en la estructura principal con respecto a las columnas, y en algunos casos dilatados desde las columnas y de la viga inferior o de las columnas y la viga superior. En este trabajo, se estudió una propuesta de relleno de muros de albañilería confinada para estructuras de pórticos de hormigón armado, buscando evitar que estos impidan la flexibilidad de la estructura y aprovechar esa flexibilidad para disipar energía. Por otra parte, lograr que los muros permanezcan elásticos y puedan ser utilizados como elementos secundarios para la colocación de disipadores histeréticos metálicos en la estructura principal. El objetivo es conseguir que las deformaciones del pórtico sean transmitidas a los disipadores, logrando así reducir el daño a los elementos estructurales, tales como vigas y columnas. Al mismo tiempo considerar las limitaciones económicas y arquitectónicas que representan los reforzamientos en las estructuras.

La propuesta consistió en dilatar los muros de albañilería con respecto a las columnas y a las vigas superior e inferior. Es decir, los muros están únicamente conectados a la estructura principal mediante sus extremos en la parte inferior en la unión viga-columna y por los disipadores en la parte superior. Se utilizó esta propuesta debido a que se hipotetizó que al estar dilatado de las columnas y conectados a la viga inferior sobre toda su longitud, podría haber alguna interferencia en la respuesta de la estructura. La evaluación de la propuesta, considerando que el muro está unido a la viga inferior, fue con la finalidad de observar y/o de alguna manera evidenciar las diferencias con la propuesta planteada sin disipadores. La comparación estuvo orientada principalmente a observar el mecanismo de formación de rótulas en vigas y columnas sin considerar los disipadores.

## 2.1. Esquema de la propuesta: disipadores metálicos mediante albañilería confinada dilatada

En las figuras 2.1 y 2.2 se esquematizó la propuesta presentada y analizada, y se describen los elementos que la componen. En dichas figuras se observa que el muro de albañilería confinada se encuentra dilatado, tanto de las columnas como de la viga inferior de la estructura, apoyado únicamente en sus extremos en un nudo rígido formado por la unión viga-columna. El nudo rígido se encuentra ensanchado, a fin de que soporte al muro, donde se conectan los elementos verticales y horizontales de confinamiento (ver figura 2.3). Finalmente, los disipadores metálicos fueron colocados sobre el muro de albañilería confinada y dilatada, y conectados con el borde inferior de la viga superior de la estructura principal.

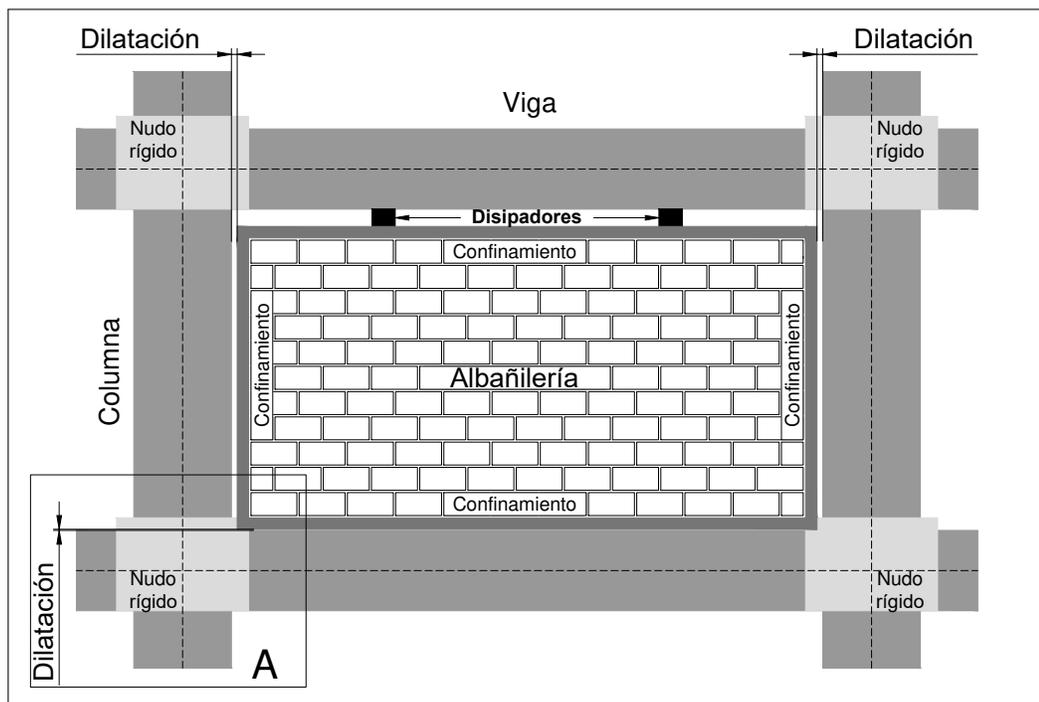


Figura 2.1. Esquema del muro de albañilería confinada dilatada (ACD) con disipadores

La elaboración de un modelo donde existe dilatación del muro de albañilería confinada de la viga inferior, se realiza con la finalidad de que la viga se deforme libremente, es

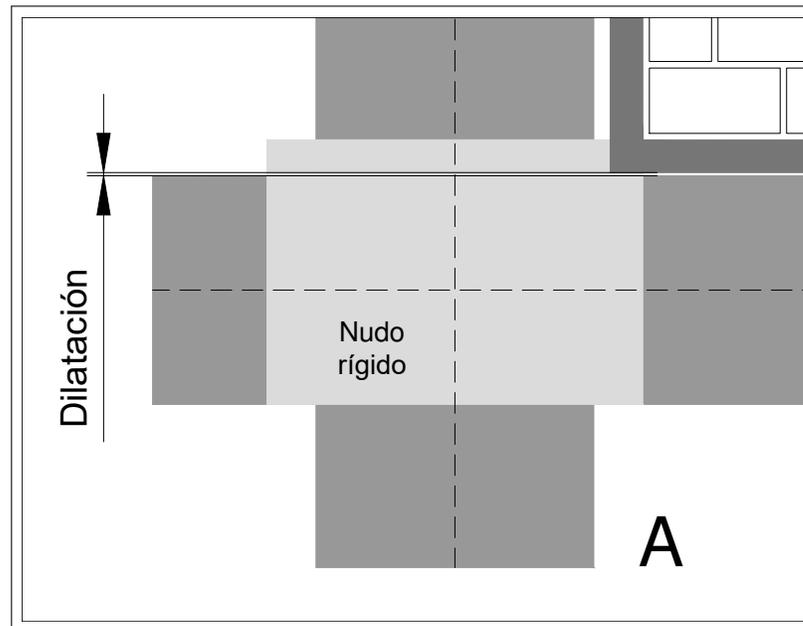


Figura 2.2. Detalle A - Dilatación del muro ACD de la viga inferior

decir, que permita la formación de rótulas plásticas, y que la estructura tenga un comportamiento dúctil. Al tener un muro que se encuentra dilatado de la estructura principal, se logra que esta sea flexible, y además se evita que los muros tengan daños, o que de haber, estos no sean severos. Al evitar el daño en los muros, la idea fue aprovechar la capacidad de resistencia al corte y utilizarlos como elementos de soporte para la colocación de disipadores de energía metálicos. Los disipadores ayudan a absorber parte de la energía que entra a la estructura.

Por otra parte, estudios demuestran que agregar disipación de energía en una estructura da como resultado una mejora en la capacidad de absorción de energía y una reducción en el desplazamiento. Esta reducción en el desplazamiento está asociada con la reducción de la rotación en los elementos estructurales, lo cual implica que podría haber menor formación de rótulas plásticas o inclusive que no se formen. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la fuerza total sobre la estructura puede aumentar como resultado del aumento de rigidez y/o resistencia proporcionada por el sistema de disipación de energía. Por lo que, con la propuesta planteada, el objetivo es justamente analizar el comportamiento que tendrá la estructura.

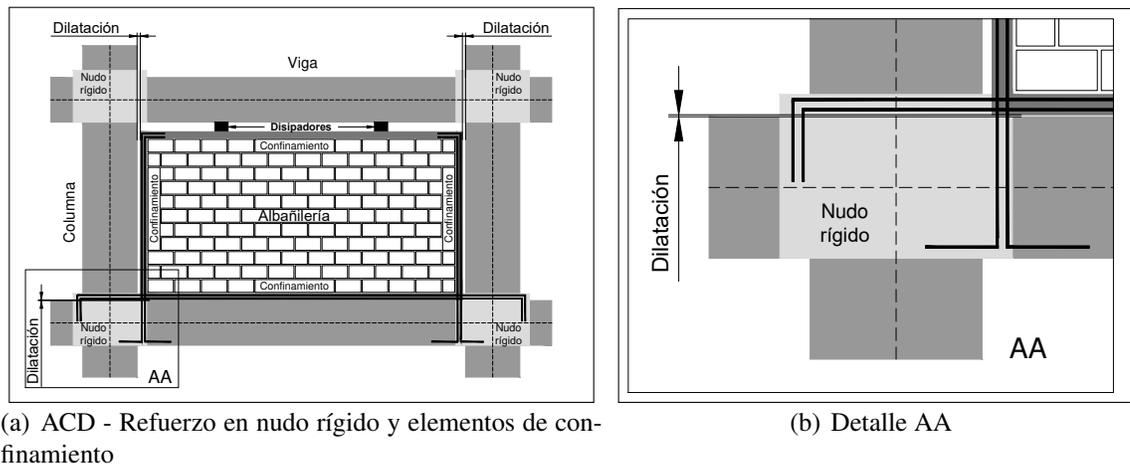


Figura 2.3. Esquema albañilería confinada dilatada (ACD) con disipadores y refuerzo en elementos de confinamiento

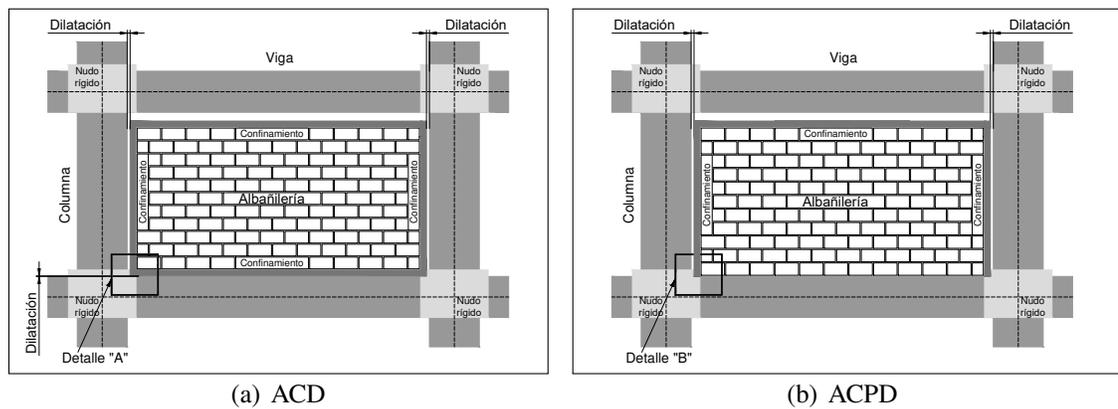


Figura 2.4. Esquema albañilería confinada dilatada (ACD) y albañilería confinada parcialmente dilatada (ACPD) sin disipadores

Como se mencionó previamente, parte del análisis consistió en estudiar el muro dilatado de las columnas, pero unido a la viga inferior sobre toda su longitud, para realizar la comparación y observar las diferencias y/o ventajas de la propuesta, pero sin considerar los disipadores, a fin de observar el mecanismo de formación de rótulas plásticas. En las figuras 2.4 y 2.5 se muestran los esquemas de la propuesta planteada y la propuesta para la comparación. Para facilidad de identificación a la propuesta planteada, se la denominó albañilería confinada dilatada, con las siglas **ACD**, y a la propuesta para la comparación se

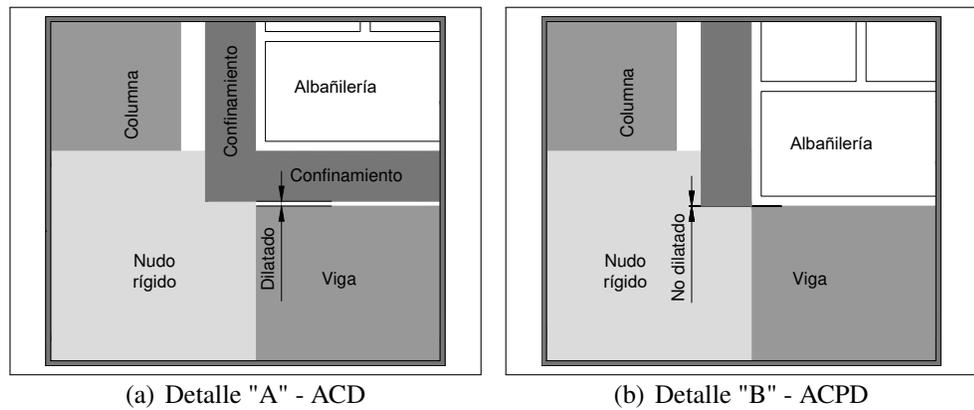


Figura 2.5. Detalles de los esquemas ACD y ACPD

la denominó albañilería confinada parcialmente dilatada, con las siglas **ACPD**. Al pórtico libre (sin muros) se lo identificó con las siglas **PL**.

## 2.2. Descripción del Modelo 2D

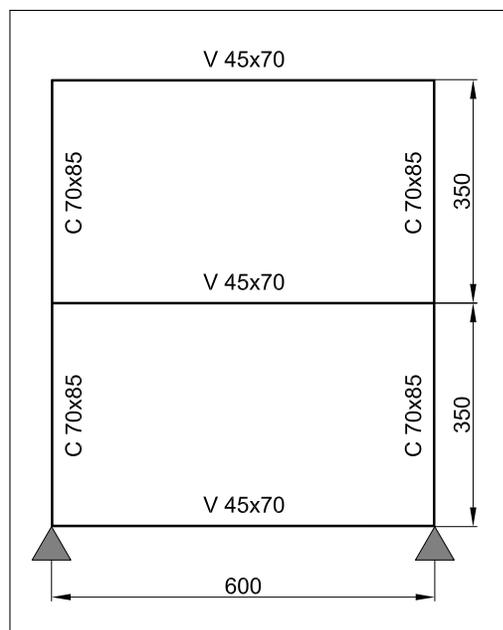


Figura 2.6. Modelo 2D (unidades en *cm*)

El modelo 2D analizado fue de 2 pisos, el cual fue definido en base a las características de longitud entre ejes, altura de entrepiso, secciones de columnas y vigas de la estructura

tridimensional como se observa en la figura 2.6. Así mismo, se utilizó las propiedades de los materiales y parámetros para la definición de rótulas plásticas de la estructura 3D, los cuales se resumen en las tablas 2.1, y 2.2 (para mayor detalle ver el apartado 3). Se consideró  $P = 0$  para las columnas debido a que en el modelo 2D de 2 pisos la carga axial en las columnas no es representativa. Las sobrecargas utilizadas fueron las correspondiente a las vigas externas, siendo la sobrecarga de losa y/o terminaciones  $13.20 \text{ kN/m}$  y la sobrecarga de uso  $3.00 \text{ kN/m}$ . La consideración de apoyo sin restricción a momento fue considerada a fin de que el modelo sea más aproximado a cualquier piso intermedio.

Tabla 2.1. Propiedades del material - Modelo 2D

| <i>Propiedad</i>                                    | <i>Hormigón</i> | <i>Acero de refuerzo</i> |
|---|-----------------|--------------------------|
| Peso específico [ $kN/m^3$ ]                        | 240.00          | 78.50                    |
| Modulo de elasticidad [ $MPa$ ]                     | 25267.13        | 200000.00                |
| Coefficiente de Poisson                             | 0.20            | 0.30                     |
| Coefficiente de dilatación térmica [ $1/^\circ C$ ] | 9.90E-06        | 1.17E-05                 |
| Modulo de corte [ $MPa$ ]                           | 10527.97        | 78419.30                 |

Tabla 2.2. Propiedades de las rótulas plásticas en vigas y columnas con  $P = 0$  - Modelo 2D

| <i>Propiedad</i>                   | <i>Viga</i>             | <i>Columna</i> |
|------------------------------------|-------------------------|----------------|
| Momento plástico [ $kN - m$ ]      | 545.13 (734.46)         | 1090.70        |
| Curvatura de fluencia [ $rad/cm$ ] | 3.3547E-05 (4.5198E-05) | 1.5062E-05     |
| Longitud plástica [ $cm$ ]         | 68.33                   | 48.33          |
| Rotación de fluencia [ $rad$ ]     | 0.0023 (0.0031)         | 0.0007         |

*Nota: Datos en paréntesis corresponden a valores de refuerzo negativo.*

### 2.3. Propiedades de la albañilería

De la literatura revisada se observa variabilidad en cuanto a las propiedades mecánicas de la albañilería, ya que las mismas están en función de los materiales y proceso de fabricación de las muestras que se utilicen en dichos ensayos. En este estudio la idea

fue utilizar muros de albañilería confinada de bloques de hormigón. Al ser una propuesta teórica, se utilizaron los datos descritos por Ogaz, Astroza y Sierra (2005), en base a la información de la bibliografía revisada descrita en el apartado 1.2.3. En la tabla 2.3, se resume las propiedades de la albañilería confinada utilizada para el análisis.

Los parámetros adicionales, como peso específico de la albañilería  $\gamma_m$ , y coeficiente de Poisson  $\nu_m$ , fueron obtenidos en base a los datos de Ogaz, Astroza y Sierra (2005) y las definiciones de la norma Chilena mencionadas en la tesis de Aguilar (2013).

Tabla 2.3. Propiedades de la albañilería confinada - Modelo 2D

| <i>Propiedad</i>                | <i>Alb. confinada</i> | <i>H. confinamiento</i> |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Peso específico [ $kN/m^3$ ]    | 20.00                 | 24.00                   |
| Modulo de elasticidad [ $MPa$ ] | 4849.00               | 23344.03                |
| Coeficiente de Poisson          | 0.175                 | 0.20                    |
| Modulo de corte [ $MPa$ ]       | 1939.60 (0.4 $E_m$ )  | 9726.68                 |

Otro parámetro importante a considerar en este estudio es la fuerza de corte que resisten los muros de albañilería confinada para lograr que estos permanezcan elásticos o evitar que se produzcan grandes daños. Existen fórmulas empíricas con las cuales se puede obtener de forma aproximada la resistencia que tendría un muro en función de los diferentes tipos de fallas que se presentan en un muro de albañilería. Sin embargo, la única forma de obtener valores más realistas es mediante la realización de ensayos. Como en este trabajo no se cuenta con información específica al respecto, se hizo uso de la información disponible de la bibliografía revisada. Por esta razón, para el análisis se consideró la resistencia básica de corte  $\tau_m = 0.55 MPa$  (Ogaz, Astroza y Sierra, 2005) como resistencia promedio de corte, con la cual se determinó de forma aproximada la fuerza de corte del muro en función del área y longitud del muro.

En base a las dimensiones del muro y a la resistencia promedio de corte asumida, se puede decir que:

$$\tau_m = \frac{F_{\tau_m}}{A_m} = \frac{F_{\tau_m}}{L_m t_m} \quad (2.1)$$

Y de la ecuación 2.1, se obtuvo que la fuerza de corte del muro de albañilería es:

$$F_{\tau_m} = \tau_m A_m = \tau_m L_m t_m, \quad (2.2)$$

donde,

$A_m$  : Área del muro.

$L_m$  : Longitud del muro.

$t_m$  : Espesor del muro.

Como uno de los objetivos es lograr que los muros de albañilería confinada permanezcan elásticos o con daños mínimos, para este estudio se consideró utilizar no más del 80% de la capacidad resistente de los muros determinada en base a la resistencia promedio de corte descrita previamente.

## 2.4. Disipadores de energía

Se han propuesto varios diseños de dispositivos metálicos, siendo su mecanismo esencial de disipación la deformación inelástica del metal, con ejemplos de ellos mostrados en la figura 1.1. En este estudio, no se utilizó un diseño en específico, se trabajó únicamente en base a la capacidad y resistencia, donde la capacidad estuvo limitada por la resistencia promedio de corte asumida, la cual fue descrita en el apartado 2.3.

### 2.4.1. Elemento link

En el software, el elemento link permite unir dos nodos, y está compuesto por seis "springs" separados, uno para cada uno de los seis grados de libertad de deformación

(axial, cortante, torsión y flexión pura). Cada elemento link puede exhibir hasta tres tipos diferentes de comportamiento: lineal, no-lineal y dependiente de la frecuencia, según los tipos de propiedades asignadas y el tipo de análisis que se esté realizando.

Existen varios tipos de no-linealidades que pueden definirse con el elemento link. En este estudio, el elemento link empleado para representar los disipadores fue el de tipo *Plastic (Wen)*. Este tipo modelo considera un comportamiento histerético no-lineal, y el modelo de plasticidad se basa en el comportamiento histerético propuesto por Wen.

#### 2.4.2. Modelo de plasticidad de Wen

En el software, la relación fuerza-deformación no-lineal está dada por:

$$f = \alpha k d + (1 - \alpha) f_y z \quad (2.3)$$

La variable  $z$  tiene un rango entre  $|z| \leq 1$ , con la superficie de fluencia representada por  $|z| = 1$ . El valor inicial de  $z$  es cero y evoluciona según la ecuación diferencial:

$$\dot{z} = \frac{k}{f_y} \begin{cases} \dot{d}(1 - |z|^n) & \text{si } \dot{d} z > 0 \\ \dot{d} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.4)$$

La ecuación para  $\dot{z}$  es equivalente al modelo de Wen con  $A = 1$  y  $\gamma = \beta = 0.5$ .

donde,

$f$  : Fuerza no-lineal.

$\alpha$  : Relación de rigidez post-fluencia y rigidez elástica.

$k$  : Rigidez elástica.

$d$  : Desplazamiento.

$f_y$  : Fuerza de fluencia.

$z$  : Variable histerética interna.

$\dot{z}$  : Variable histerética de la ecuación diferencial.

$n$  : Parámetro adimensional que suaviza la transición entre el rango elástico e inelástico.

$A, \gamma,$  y  $\beta$  : Parámetros que controlan la forma del ciclo histerético.

Cabe señalar que algunas variables que definen los parámetros del modelo de Wen fueron cambiadas por otras, únicamente por facilidad de definición y visualización sin alterar el concepto utilizado por el software.

### 2.4.3. Propiedades de los disipadores

Los parámetros no-lineales utilizados para la definición del link tipo *Plastic (Wen)* que representa los disipadores de fluencia de metales son: rigidez elástica, fuerza de fluencia, factor de rigidez post-fluencia y parámetro adimensional que suaviza la transición entre el estado elástico e inelástico en la curva de histéresis.

En este estudio no se consideró factor de rigidez post-fluencia, debido a que la capacidad de los disipadores está limitada por la capacidad resistente del muro de albañilería confinada. Con respecto al parámetro adimensional  $n$ , se asumió un valor de 8, con el cual se obtiene una transición aceptable. La fuerza de fluencia  $F_y$  de cada disipador fue determinada en función a la cantidad de disipadores colocados en cada muro. Dicha fuerza fue determinada tomando en cuenta la capacidad resistente al corte del muro y considerando un factor de seguridad ( $f_s$ ), no mayor al 80% de la capacidad del muro para garantizar que estos permanezcan elásticos. Por lo que, la fuerza total ( $F_{total(D)}$ ) producto de la suma de todos los disipadores en cada muro no debe ser mayor a  $f_s \times F_{\tau_m}$ , es decir  $F_{total(D)} \leq f_s \times F_{\tau_m}$ . Con respecto a la deformación de fluencia, al no considerar un modelo de disipador en específico, se asumió  $\delta_y = 0.40 \text{ cm}$ , siendo finalmente la rigidez de fluencia del disipador  $K_y = F_y/\delta_y$ .

## 2.5. Modelamiento del muro

El modelamiento del muro de albañilería confinada dilatada fue realizado primero considerando un modelo con elementos shell y luego mediante diagonales equivalentes. El modelo con elementos shell es principalmente para observar las tensiones que se producen en el muro. Además, observar la flexibilidad del pórtico al incorporar los muros de forma dilatada con la propuesta planteada (ACD) vs la propuesta comparativa (ACPD). Mientras que, con el modelo de diagonal equivalente, se busca lograr que el comportamiento del pórtico sea aproximadamente igual al modelo representado con elementos shell. Por otra parte, el modelo de la diagonal equivalente se consideró con el fin de disminuir el costo computacional, teniendo en cuenta que se realizará un análisis tiempo-historia no-lineal en una estructura tridimensional. Los análisis no-lineales tienen un alto costo computacional, más aún si se consideran modelos con elementos finitos (elementos tipo shell).

### 2.5.1. Muro con elementos shell - ACD

El elemento shell es un tipo de objeto de área que se utiliza para modelar el comportamiento de elementos tipo membrana, placa y shell en estructuras planas y tridimensionales. El material del shell puede ser homogéneo o en capas a través del espesor, y la no-linealidad del material puede ser considerado usando el shell en capas. El elemento shell es una formulación de tres o cuatro nodos que combina el comportamiento de flexión de la membrana y la placa. El elemento shell con un comportamiento de tipo shell considera grados de libertad de traslación y rotación, soporta todas las fuerzas y momentos. Además, es de material lineal y homogéneo, y puede ser formulado despreciando y considerando la deformación por corte. Para el análisis se utilizó el shell de tipo *shell thin*, es decir, no se consideró las deformaciones por corte.

En la figura 2.7 se esquematizó el modelamiento del muro de albañilería confinada dilatada (ACD) de un vano y un nivel con elementos shell. En dicha figura se detallaron los componentes utilizados para representar cada uno de los elementos que definen al

muro como se indicó en el apartado 2.1. Para la evaluación de los muros sin considerar los disipadores, el modelamiento es similar, únicamente no se colocan los links.

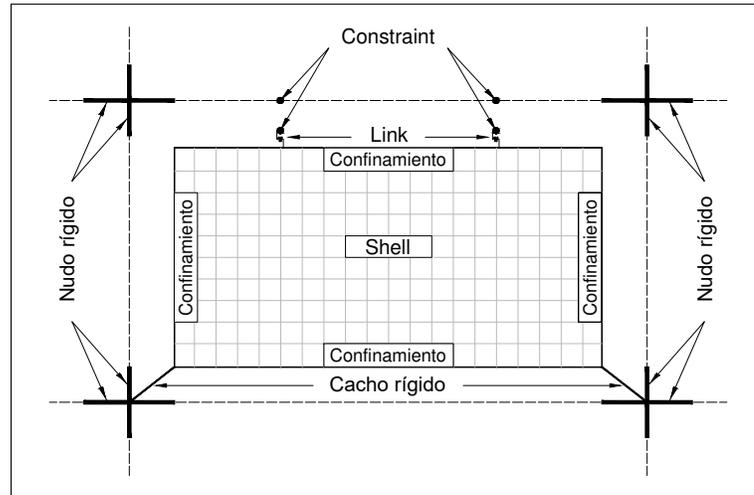


Figura 2.7. Esquema del muro de ACD modelado con shell con disipadores

La unión viga-columna se consideró como un nudo rígido con un factor de 0.5, es decir no 100% rígido. El elemento utilizado para conectar el extremo inferior del muro con la unión viga-columna fue un cacho rígido. El cacho rígido consistió en un elemento frame que se definió considerando una rigidez muy alta ( $E_c \times 10^2$ ) a fin de lograr que sea un elemento muy rígido (es decir "*casi indeformable*"). Además, los cachos rígidos fueron rotulados en conexión con el muro para evitar que haya concentración de tensiones, por efecto de una unión a momento.

Los elementos shell que representaron la albañilería fueron discretizados utilizando una malla de  $25 \times 25$  cm. Los disipadores de energía fueron definidos mediante links. Los links estuvieron conectados desde el borde superior del muro (eje del elemento superior de confinamiento) hacia la cara inferior de la viga de la estructura principal. Por otra parte, teniendo en cuenta que el análisis en el software se realiza de eje a eje de elementos, fue necesario utilizar elementos constraints. El software permite definir varios tipos de constraints, en este caso se utilizó un *body constraint*, con el cual se logra que las uniones restringidas se muevan juntas como un cuerpo rígido tridimensional. Es decir, con este

constraint se logró que el nudo definido en la cara inferior de la viga superior, tenga el mismo comportamiento que el nudo definido en el eje de dicha viga, que es de donde se considera el análisis. La deformación por cortante puede deberse tanto a rotaciones como a traslaciones, y al considerar una longitud mayor probablemente se tendría mayores rotaciones, lo cual podría conllevar a resultados pocos realistas. Con esta definición, se buscó establecer una longitud más realista en el elemento link.

### **2.5.2. Muro con diagonal equivalente - ACD**

El modelo de la diagonal equivalente es considerado como un macro-modelo. Hoy en día, es ampliamente aceptado como una forma simple y racional de describir la influencia de los paneles de albañilería en el pórtico relleno, siendo este atractivo desde el punto de vista práctico. En consecuencia, mucha investigación experimental se ha dirigido a definir las relaciones entre las características del sistema de pórtico relleno y este modelo simplificado. Las propiedades requeridas para definir el modelo con diagonales equivalentes dependen del tipo de análisis (lineal o no-lineal), y del tipo de carga (monotónica, cíclica o dinámica). En el análisis lineal solo se necesitan el área, la longitud de la diagonal, y el módulo de elasticidad para calcular la rigidez elástica (Crisafulli, Carr y Park, 2000). En Crisafulli, et al. (2000) y Tarque, et al. (2015) se describen algunas ecuaciones empíricas para determinar el ancho equivalente  $w$  de la diagonal equivalente.

El modelamiento del muro con diagonales equivalentes es similar al modelamiento realizado con elementos shell en relación a la forma de apoyo y confinamiento. La diferencia radica en que el área del muro no está representada por los shell sino por dos diagonales en sentido contrario (Una diagonal en compresión y una en tracción) como se observa en la figura 2.8. Al considerar el modelo utilizando dos diagonales, el ancho  $w$  se divide por dos, debido a que, en este caso las diagonales actúan simultáneamente. Por lo tanto, a cada diagonal le corresponde un ancho equivalente  $w/2$ . Las diagonales son rotuladas en los extremos. Es posible utilizar una diagonal en compresión únicamente y para ello se

utiliza el ancho  $w$  total. Sin embargo, pensando en el análisis tiempo-historia no-lineal de la estructura tridimensional, se consideró dos diagonales.

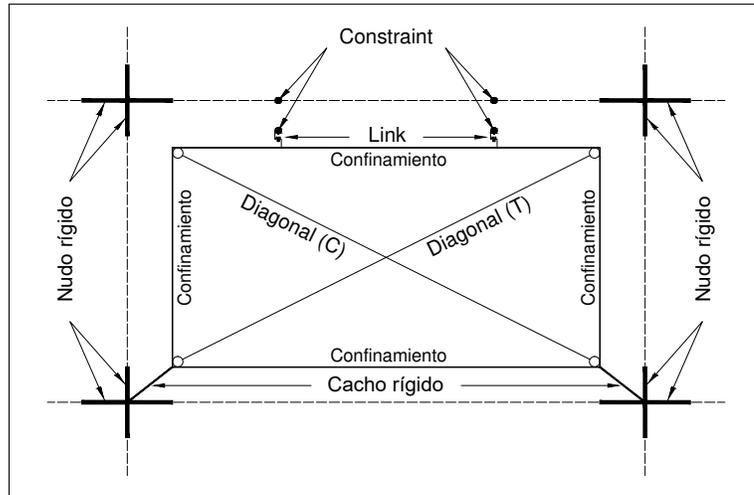


Figura 2.8. Esquema del muro de ACD modelado con diagonales equivalentes con disipadores

Adicionalmente, en la figura 2.9 se indica los elementos considerados como elásticos e inelásticos que ayudan a comprender de mejor manera el modelamiento del sistema ACD con disipadores (muro de albañilería representado con diagonales equivalentes).

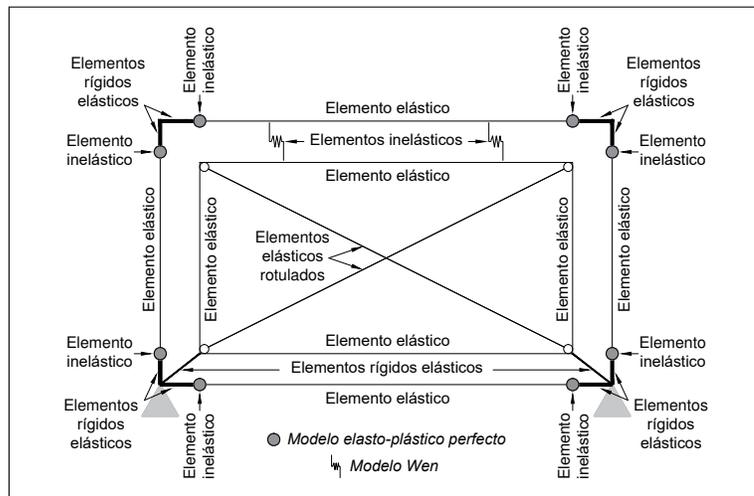


Figura 2.9. Elementos elásticos e inelásticos del sistema ACD con disipadores - Muro representado con diagonales equivalentes

### 2.5.3. Muro con elementos shell - ACPD

EL modelamiento del muro con elementos shell para la propuesta comparativa de ACPD sin considerar los disipadores, es muy similar al de la propuesta planteada de ACD sin disipadores. La diferencia es su forma de apoyo, en lugar de utilizar los cachos rígidos el muro está apoyado sobre la viga inferior como se observa en la figura 2.10.

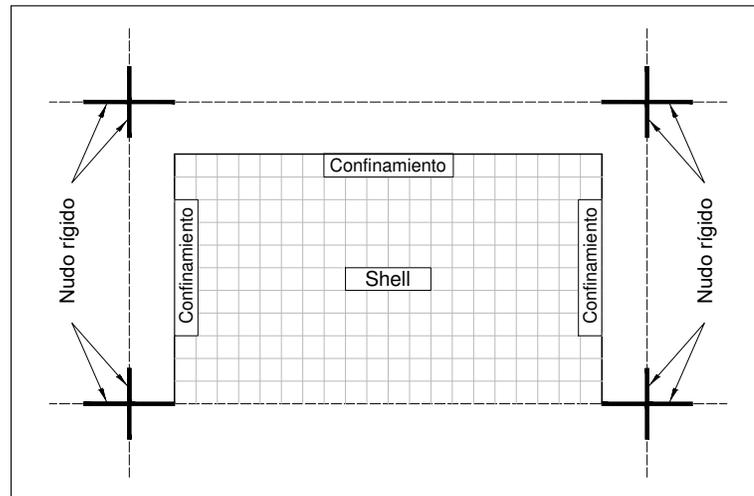


Figura 2.10. Esquema del muro de ACPD modelado con shell sin disipadores

## 2.6. Resultados de los análisis

Para este trabajo se asumió que la dilatación del muro de albañilería confinada con respecto a las columnas es de  $5\text{ cm}$  y la dilatación con respecto a la viga inferior es de  $1\text{ cm}$ . Con respecto a la distancia libre para la colocación de los disipadores, esta dependerá del tamaño del disipador a utilizar. Para este caso se definió una distancia libre de  $10\text{ cm}$ , medida entre la cara inferior de la viga superior y el eje del elemento superior de confinamiento del muro. El espesor del muro fue  $t_m = 20\text{ cm}$ , y la longitud del muro fue  $L_m = 505\text{ cm}$  (incluido los elementos de confinamiento). En los análisis se consideró el efecto de las cargas gravitacionales, aplicando un 100% de la carga muerta más un 25% de la carga viva.

La evaluación numérica de la propuesta buscó observar los siguientes aspectos:

- Flexibilidad del pórtico al incorporar los muros de albañilería confinada en base a la propuesta de ACD.
- Tensiones de corte promedio en el muro de la ACD modelado con shell que sean menores al 80 % de las tensiones de corte promedio asumidas en base a la literatura investigada, con varias alternativas respecto al número y capacidades de disipadores y considerando muros llenos.
- Comportamiento del pórtico debe ser aproximadamente igual al representar el modelamiento de los muros de ACD con elementos shell y con diagonales equivalentes.

Es importante señalar que, la comparación entre muros de ACD y ACPD no es indicar que la propuesta comparativa de ACPD no es factible. La comparación fue realizada únicamente para observar las diferencias y/o ventajas que podría tener los muros de ACD haciendo un análisis estático no-lineal en un modelo bidimensional.

### 2.6.1. Análisis Estático Lineal (AEL) - muros con elementos shell

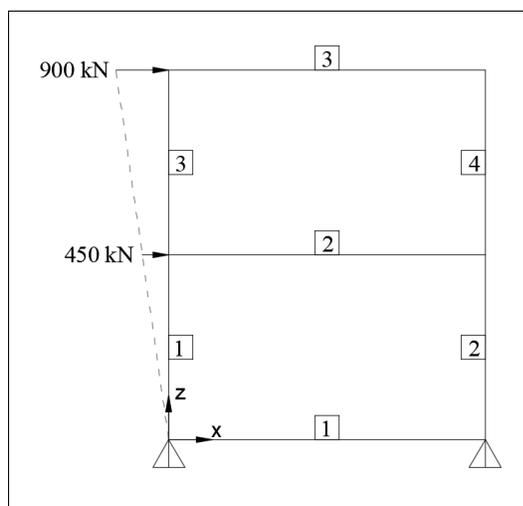


Figura 2.11. Fuerza lateral aplicada en el pórtico e identificación de elementos - AEL

Con el análisis estático lineal se pretendió observar en primera instancia y de forma simplificada, la influencia que tiene la albañilería en la respuesta global del pórtico, sin considerar el daño de los muros. De igual manera, observar el comportamiento respecto a los esfuerzos internos de los elementos, así como a las tensiones en los muros. En la figura 2.11 se indica el patrón de carga lateral utilizado en el análisis estático lineal, y la identificación de cada elemento del pórtico.

***Desplazamiento de techo***

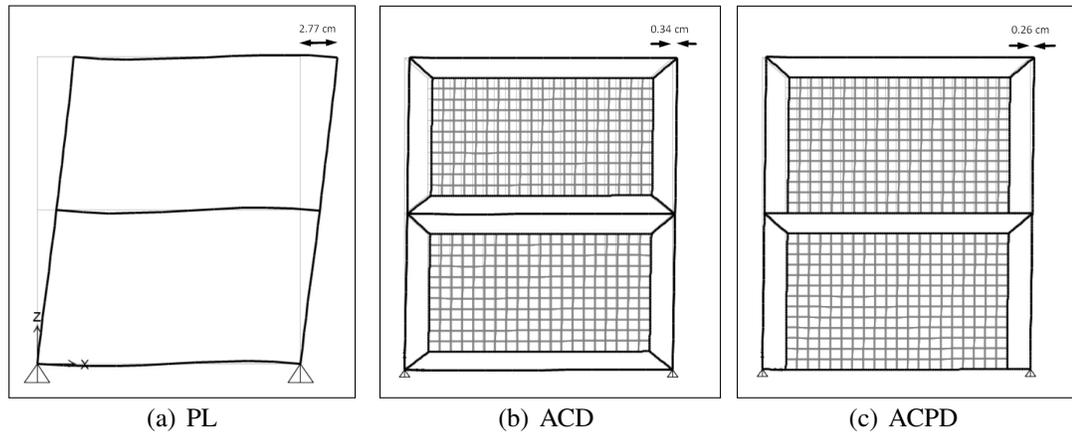


Figura 2.12. Desplazamiento de techo muros conectados al pórtico - AEL

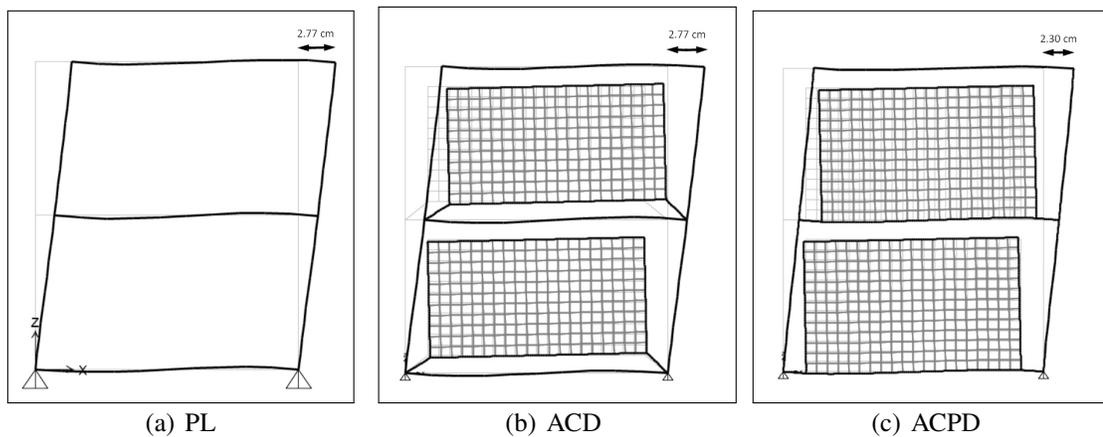


Figura 2.13. Desplazamiento de techo muros desconectados al pórtico - AEL

La figura 2.12 muestra los desplazamientos de techo obtenidos del pórtico libre (PL) y considerando los muros de ACD y ACPD adheridos a los pórticos. Los resultados mostraron como disminuyen los desplazamientos de techo cuando se tiene los muros conectados a la estructura. Así mismo, se ve claramente la rigidez que aportan los muros. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esto sucede hasta que los muros no presenten daños, y sin considerar el efecto que los muros tendrían sobre los elementos estructurales. La figura 2.13 en cambio, muestra los desplazamientos que se producen cuando los muros no están adheridos a los pórticos. Al considerar que los muros de ACD están desconectados de la estructura principal, el desplazamiento de techo es prácticamente igual al pórtico libre, como se observa en las figuras 2.13(a) y 2.13(b)

#### ***Esfuerzos internos en vigas y columnas***

Cuando los muros están desconectados del pórtico, se evidenció que los esfuerzos internos en las vigas para el PL y con muros de ACD son similares, debido a que los muros no están conectados a las vigas. Mientras que, son diferentes para la ACPD donde los muros si están conectados sobre la viga. En este caso, la pendiente del momento es más inclinada y por ende los esfuerzos de corte son mayores, tal como se observa en la figura 2.14(a). Respecto a las columnas, son similares para el PL, ACD y ACPD (figura 2.14(b)), debido a que a las columnas se transfieren los esfuerzos que se producen en el muro, y eso sucede para ambos casos de la misma manera.

#### ***Tensiones en muros***

Las tensiones máximas generadas en los muros con ACD y ACPD al estar conectados al pórtico, no difieren grandemente, ya que estarían conectadas de manera tradicional. Sin embargo, al estar desconectados se observan variaciones, pero hay que tener en cuenta que los cachos rígidos se encuentran rotulados en conexión con el muro. Las altas tensiones se producen en la unión del cacho rígido con el muro (ACD), y en la unión con la viga en sus extremos (ACPD). Con la finalidad de evitar la concentración de tensiones por la conexión empotrada, se decidió considerar el cacho rígido rotulado en conexión con el muro de

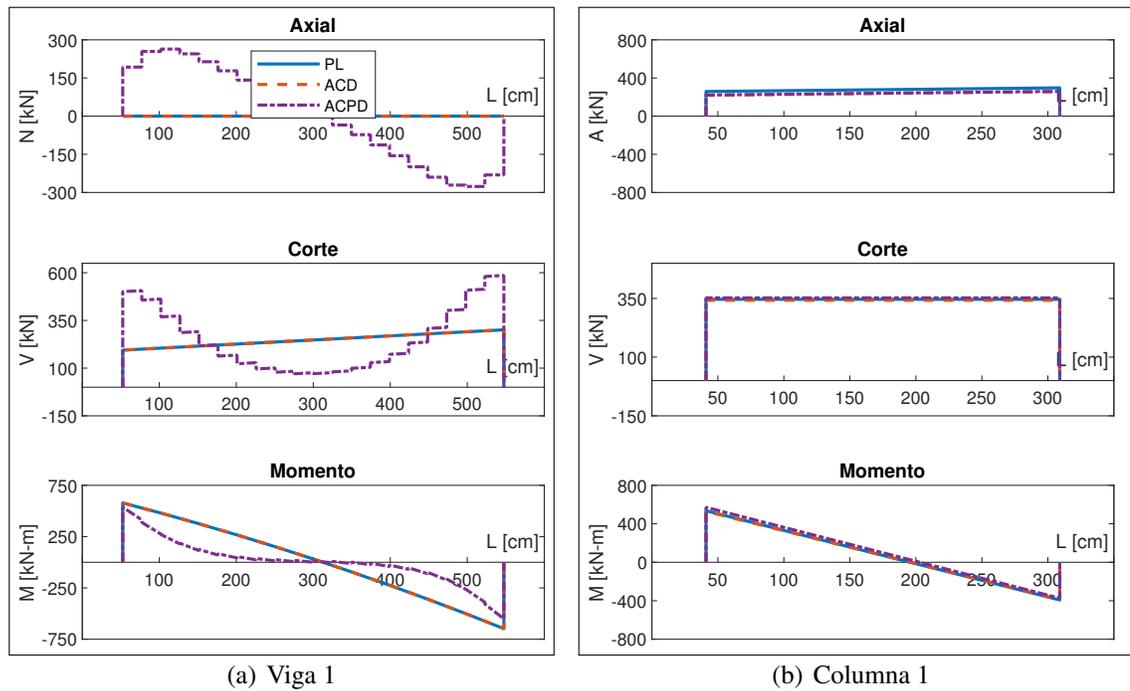


Figura 2.14. Esfuerzos internos en vigas y columnas con muros desconectados al pórtico - AEL

ACD. En la tabla 2.4 se muestra un resumen con las tensiones máximas (compresión), tensiones mínimas (tracción) y tensiones de corte máxima (producidas en los extremos de: unión cacho rígido y muro de ACD, y unión de viga con muro de ACPD) y las tensiones de corte promedio.

Tabla 2.4. Tensiones en muros de ACD y ACPD conectados y desconectados de los pórticos (unidades en  $kgf/cm^2$ ) - AEL

| N° Piso | Descripción        | ACD       |                | ACPD      |              |
|---------|--------------------|-----------|----------------|-----------|--------------|
|         |                    | conectada | desconectada   | conectada | desconectada |
| Piso 1  | $\sigma_{min} (C)$ | -41.75    | -3.79 (-43.07) | -31.36    | -46.17       |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 35.03     | 1.67 (39.14)   | 33.85     | 38.31        |
|         | $\tau_{max}$       | 18.48     | 1.74 (25.51)   | 15.58     | -22.36       |
|         | $\tau_{prom}$      | 6.71      | 0.00 (0.12)    | 5.80      | 0.07         |
| Piso 2  | $\sigma_{min} (C)$ | -34.54    | -4.07 (-48.04) | -27.73    | -52.31       |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 24.96     | 1.78 (42.62)   | 26.06     | 44.61        |
|         | $\tau_{max}$       | 15.35     | 1.86 (28.39)   | 12.11     | -25.61       |
|         | $\tau_{prom}$      | 5.15      | 0.00 (0.13)    | 4.81      | 0.08         |

Nota: Tensiones con cacho rígido sin rotular en paréntesis.

### **2.6.2. Análisis Estático no-lineal (AENL)**

El análisis estático no-lineal permitió evaluar la flexibilidad del pórtico al colocar muros de ACD mediante la formación de rótulas plásticas para disipar energía, es decir, lograr un comportamiento dúctil en la estructura. Por otra parte, observar el estado de tensiones en los muros, para considerar la hipótesis de que permanecen elásticos. Además, que puedan ser utilizados como elementos secundarios para la instalación de disipadores metálicos. En definitiva, conseguir que la deformabilidad del pórtico sea transmitida a los disipadores, para así lograr reducir el daño en los elementos estructurales.

Inicialmente se realizó un análisis no-lineal de la estructura sin disipadores y con los muros desconectados del pórtico, para observar la flexibilidad del pórtico. La finalidad fue evaluar el mecanismo de formación de rótulas plásticas del PL y luego con los muros de ACD y ACPD. En síntesis, se realizó un análisis estático no-lineal, para identificar las diferencias y/o ventajas de la propuesta de desconectar los muros de la viga inferior. Posteriormente, se realizó el análisis incluyendo los disipadores para observar las tensiones en los muros y evaluar el estado elástico de los mismos. Para ello se utilizó varias capacidades, así como distinto número de disipadores.

Para observar la flexibilidad del pórtico al colocar los muros de ACD, se realizó un análisis estático no-lineal basado en un desplazamiento objetivo. Este análisis permitió identificar el mecanismo de formación de rótulas plásticas en los elementos estructurales cuando los tres sistemas son llevados al mismo nivel de desplazamiento. El desplazamiento objetivo fue colocado en el nodo del techo, siendo este de 10.00 *cm*, con el cual se logró observar un claro mecanismo de formación de rótulas.

Una de las ventajas que se pretendió mostrar al usar muros de ACD, es que, al estar los muros dilatados de la viga inferior de la estructura principal, se descarta la posibilidad de que los muros interfieran en la formación de rótulas plásticas en poca o gran medida. Puesto que, se hipotetizó que no sucede lo mismo en el caso de los muros de ACPD. En otras palabras, la propuesta de usar muros de ACD es presentar una alternativa de

instalación de muros de albañilería, que permitan que los pórticos resistentes rellenos de muros de albañilería se comporten lo más cercano a pórticos resistentes sin muros de relleno. Por consiguiente, garantizar la flexibilidad en los pórticos y lograr que la estructura tenga un comportamiento dúctil mediante la formación de rótulas plásticas.

Las rótulas plásticas utilizadas en este estudio son concentradas. Estas se modelan como un punto sobre la longitud del elemento. Este modelo permite evaluar la plasticidad que se producen en los elementos a “un bajo costo computacional”. En general, las rótulas plásticas se forman en los extremos de los elementos. Por esta razón, el ACI, dentro de los parámetros de diseño sismo-resistente, señala proporcionar un refuerzo de confinamiento en cierta longitud de los extremos de las vigas y columnas. Esta longitud es considerada como zona de rótula plástica, en la cual se refuerza a la viga para que no falle por corte y más bien se tenga una falla controlada por flexión.

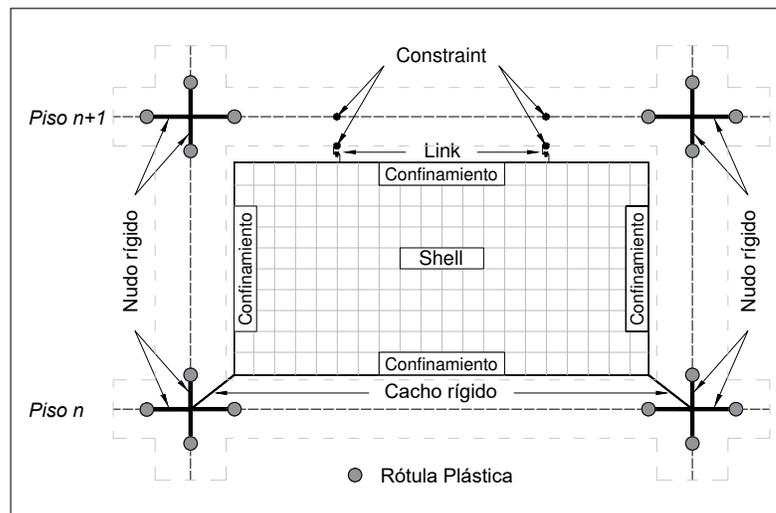


Figura 2.15. Esquema de rótula plástica al final del nudo rígido - muro de ACD con shell y disipadores

Para evaluar el mecanismo de formación de rótulas plásticas para los sistemas analizados, se realizó un análisis considerando tres posiciones diferentes para la asignación de rótulas plásticas en vigas: Al final del nudo rígido (inicio del elemento flexible), es decir, a 52.50 cm (ver figura 2.15), 70.00 cm, y 73.00 cm del eje de columnas respectivamente.

Para las columnas, la posición de las rótulas plásticas fue de 41.00 *cm* con respecto al eje de vigas, es decir, al final del nudo rígido (inicio del elemento flexible) como se observa en la figura 2.15. La posición de las rótulas plásticas fue la misma en el sistema de PL, ACD y ACPD, y tanto para los muros modelados con elementos shell y diagonales equivalentes.

### 2.6.2.1. Análisis Estático no-lineal - muros con elementos shell

#### i) AENL sin disipadores y muro desconectado del pórtico

##### Formación de rótulas plásticas

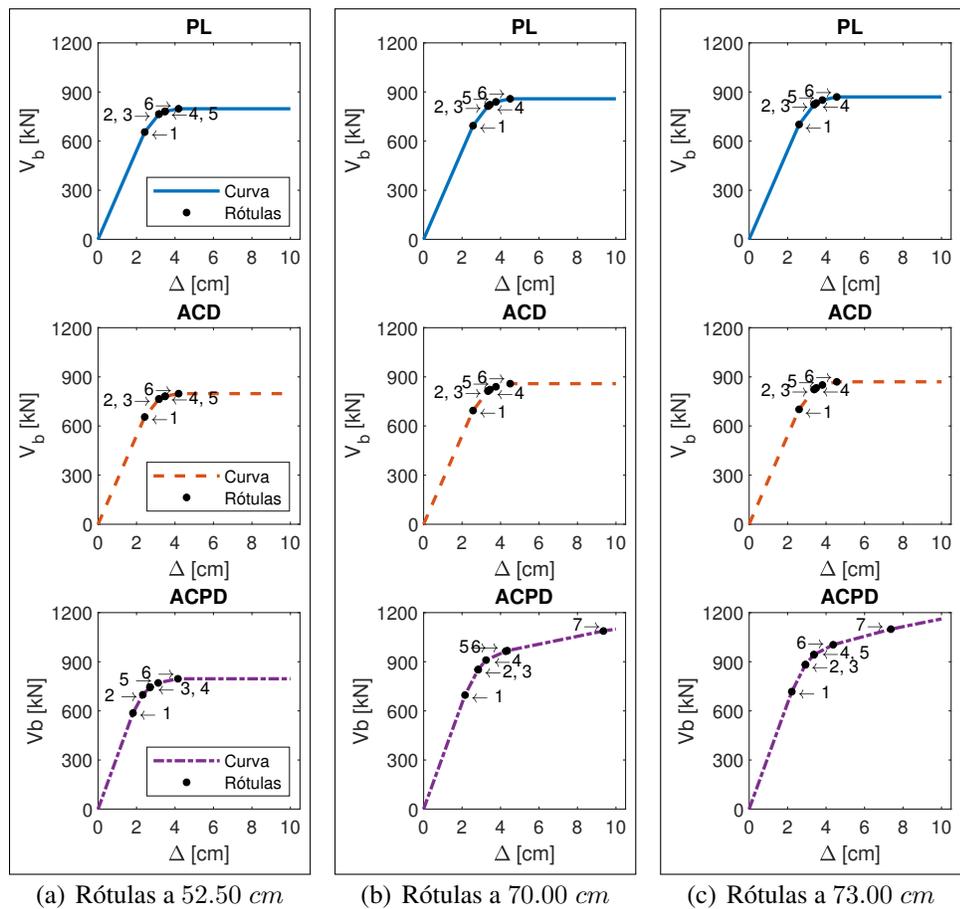


Figura 2.16. Formación de rótulas en función al corte y desplazamiento de techo de PL, ACD y ACPD muros desconectados - AENL

La figura 2.16 describe la secuencia de formación de rótulas en función del corte basal y desplazamiento de techo para el PL, pórtico con muro de ACD y pórtico con muro de ACPD cuando la posición de las rótulas plásticas en vigas se encuentran ubicadas a 52.50 cm, 70.00 cm y 73.00 cm de eje de columnas como se mencionó previamente.

Cuando la posición de las rótulas en las vigas es 52.50 cm, se observó que para el sistema PL y ACD, la formación de rótulas es prácticamente la misma. Mientras que, para el sistema ACPD presenta pequeñas variaciones, por ejemplo, la primera rótula se forma primero en el sistema ACPD, al compararlo con el sistema de PL y ACD. De igual manera, sucede con las demás rótulas hasta llegar a la rótula número 6. Para ninguno de los tres sistemas se formaron rótulas en columnas (figura 2.16(a)).

Luego, cuando la posición de las rótulas en vigas es 70.00 cm, se observó que para los sistemas PL y ACD el mecanismo de formación de rótulas sigue siendo igual entre ambos. Mientras que, para el sistema de ACPD la capacidad corte basal aumentó en relación a los sistemas PL y ACD. En consecuencia, el mecanismo de formación también cambia. Además, no solo se formaron rótulas en las vigas, sino que se formó una rótula en la columna izquierda del piso 1 como se observa en la figura 2.16(b).

Finalmente, cuando las rótulas en vigas están ubicadas a 73.00 cm se observó un comportamiento muy similar a cuando las rótulas están ubicadas a 70.00 cm. La diferencia radica en que para el caso de sistema ACPD, el corte basal sigue aumentando (figura 2.16(c)).

### ***Estado final de formación de rótulas plásticas***

En este trabajo no se realizó una revisión respecto a definir un nivel de daño en las vigas y columnas referente a un criterio de aceptación (por ejemplo, IO, LS, CP de acuerdo a ASCE, 2014). Sin embargo, se evaluó el cambio que se produce en la formación de rótulas en base a la propuesta de disipadores metálicos mediante muros de ACD. Esta evaluación fue con la finalidad de evidenciar como va cambiando el nivel de daño en el proceso de formación de rótulas para los tres sistemas analizados (PL, ACD y ACPD) cuando son

llevados al mismo nivel de desplazamiento. Los parámetros fueron definidos en función a la ductilidad (para mayor detalle ver apartado 3), los cuales se resumen a continuación:

- Punto B  $\rightarrow \theta_y \leq \theta_p < 3 \theta_y$
- Punto IO  $\rightarrow 3 \theta_y \leq \theta_p < 4 \theta_y$
- Punto LS  $\rightarrow 4 \theta_y \leq \theta_p < 5 \theta_y$
- Punto CP  $\rightarrow 5 \theta_y \leq \theta_p < 6 \theta_y$
- Punto C  $\rightarrow 6 \theta_y \leq \theta_p < 7 \theta_y$
- Punto D  $\rightarrow 7 \theta_y \leq \theta_p < 8 \theta_y$
- Punto E  $\rightarrow \theta_p \geq 8 \theta_y$

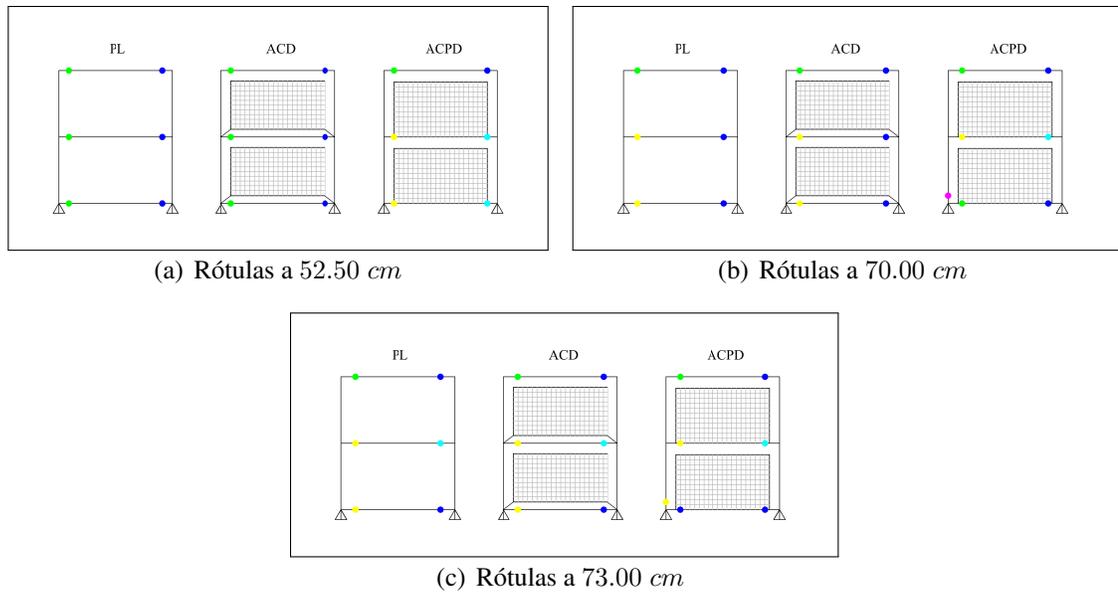


Figura 2.17. Estado final de formación de rótulas, muros desconectados - AENL

Con el estado final de formación de rótulas se evidenció que al usar ACD la respuesta es prácticamente igual a analizar un PL. Mientras que, al usar ACPD el mecanismo de formación de rótulas es diferente. De acuerdo a este análisis simplificado, para el caso de los muros de ACPD se producen daños en columnas. Por otra parte, este aumenta al considerar que la rótula plástica en vigas se produce en una posición más lejana de los extremos como se observa en la figura 2.17. Además, se observó diferentes niveles de daños en vigas. No obstante, hay que tener en cuenta que en este análisis la definición de rótulas plásticas para el caso de los muros de ACPD fue realizada en función a la capacidad

que presenta la viga de forma independiente. Es decir, no se consideró el aporte que le proporcionaría el muro al trabajar en conjunto. De modo que, si se tomara en cuenta la resistencia viga-muro, la viga sería un elemento más rígido y fuerte. Por lo tanto, existe la posibilidad de que cambie el mecanismo de formación de rótulas, siendo probablemente un sistema que ya no tenga el concepto de columna fuerte viga débil, sino más bien viga fuerte columna débil. Por consiguiente, no sería benéfico para la estructura, puesto que en ingeniería generalmente se espera que la formación de rótulas plásticas se presente en vigas y no en columnas, para evitar el colapso parcial o total de la estructura.

### *Esfuerzos internos en vigas y columnas*

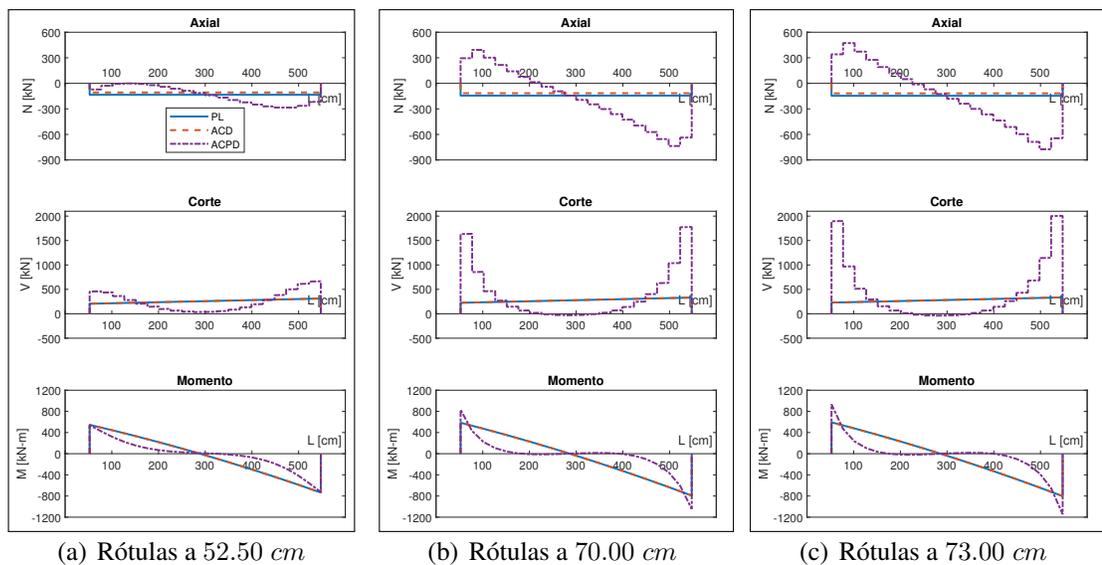


Figura 2.18. Esfuerzos internos en la viga 2, muros desconectados - AENL

Con respecto a los esfuerzos internos en vigas y columnas, se evidenció que para los sistemas de PL y ACD tanto para cuando las rótulas se ubican a 52.50 cm, 70.00 cm y 73.00 cm los resultados son iguales. Sin embargo, esto no sucede en el caso del sistema de ACPD como se observa en la figura 2.18. En el caso de muros de ACPD sucede que se tiene mayores momentos y con una pendiente mayor en los extremos por lo que entonces eso radica en que se tenga mayores esfuerzos de corte en dichos extremos. Al tener mayores momentos, esto conlleva a que se inicie la formación de rótulas primero (a menores

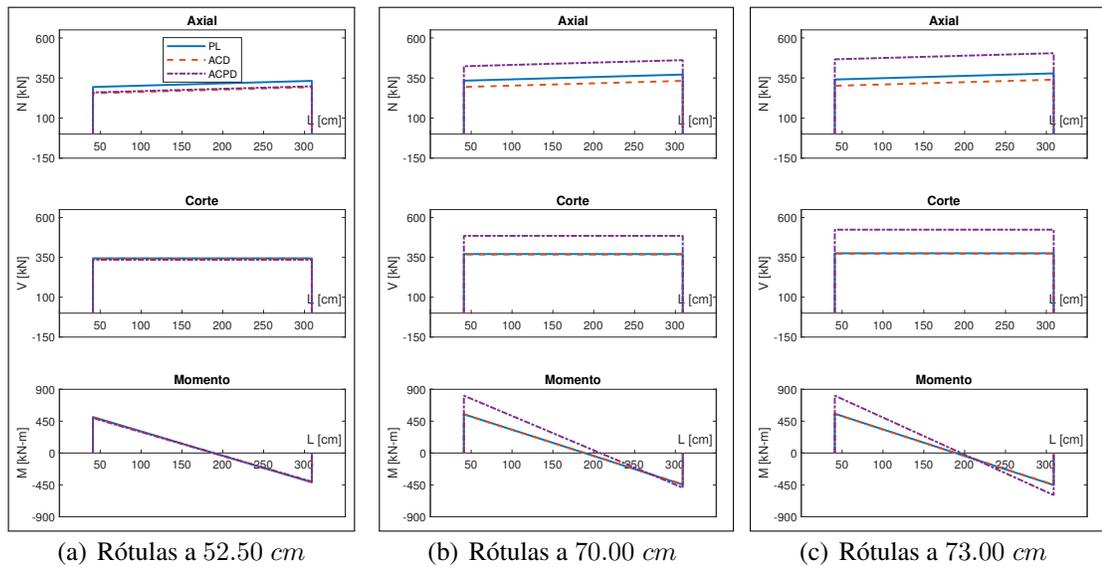


Figura 2.19. Esfuerzos internos en la columna 1, muros desconectados - AENL

desplazamientos) que en el caso del PL y con ACD, lo cual se logró ver claramente en la figura 2.16. La figura muestra la formación de rótulas en función del corte basal y desplazamiento de techo, recordando que en este análisis solo se consideró la resistencia de la viga, más no la resistencia que tendría el conjunto viga-muro. En las figuras 2.19(b) y 2.19(c) se observa que para el sistema con muros de ACPD, la columna izquierda del piso 1 alcanzó mayor momento, lo cual ocasionó que se forme la rótula en dicha columna. En otras palabras, mediante este análisis simplificado, se pudo evidenciar que el comportamiento del sistema cuando se tiene muros de ACPD es diferente, pero no se logró establecer la poca o mucha afectación que tendría sobre la flexibilidad de la estructura principal. Para establecer aquello, sería necesario un análisis más profundo, mismo que está fuera del alcance de este trabajo.

### **ii) AENL con disipadores**

Al colocar los disipadores de energía y hasta que estos entren en fluencia y empiecen a disipar energía, los muros teóricamente están conectados a la estructura y forman un solo conjunto. Sin embargo, la diferencia radica en que los disipadores al entrar en fluencia

transmiten una fuerza de corte no mayor al 80% de su capacidad resistente. Puesto que, la capacidad de los disipadores fue limitada, considerando ese factor de uso en función de la resistencia de corte promedio de los muros de albañilería confinada, como se indicó previamente.

Debido a que el efecto de disipar energía que tienen los disipadores metálicos ha sido demostrado en varios estudios, en este apartado el análisis estático no-lineal se lo realizó con la finalidad de evaluar el estado de tensiones a corte que presentan los muros. Las tensiones fueron evaluadas con distintas capacidades de disipadores y con varios disipadores. Esta evaluación permitió definir la capacidad y el número de disipadores que se pueden colocar para considerar que los muros permanezcan elásticos en base a la resistencia de corte promedio en el muro. La eficiencia de los disipadores con las capacidades definidas se observará en el análisis de la estructura tridimensional en el apartado 5.

Para definir la mejor alternativa en cuanto a capacidades y número de disipadores sobre los muros, se hizo en función de las tensiones que se producen en el muro por efecto de la capacidad y de la distribución de disipadores. Por esta razón, se definieron 5 capacidades de disipadores de 120, 150, 200, 300 y 400  $kN$ , las cuales fueron menores al 80% de la capacidad resistente a corte promedio del muro. Una vez definidas las capacidades, se eligió 4 distribuciones de disipadores diferentes sobre el muro, se inició considerando un disipador con cada una de las capacidades antes señaladas, luego dos, tres y cinco disipadores. Para conocer la capacidad de los disipadores cuando son más de uno, se divide la capacidad elegida por el número de disipadores a colocar sobre el muro.

Las tensiones de corte en los muros dependen de la capacidad del disipador y de la distribución. Por lo tanto, para conocer como se distribuyen dichas tensiones sobre el muro en función a la capacidad y número de disipadores a ubicar, se puede hacer un análisis estático no-lineal basado en un desplazamiento objetivo o basado en una fuerza. Para ambos análisis, los disipadores se van a activar siempre que alcancen su deformación de fluencia. Como el objetivo es evaluar las tensiones de corte, el análisis solo se realizó con la propuesta de muros de ACD. Además, como posteriormente se modelará los muros mediante

diagonales equivalentes y con la finalidad de poder realizar la comparación respectiva, se realizó un análisis estático no-lineal aplicando un patron de fuerza triangular similar al definido para el AEL. Siendo la diferencia el valor de las magnitudes de las fuerzas, en este caso son  $430\text{ kN}$  para el primer piso y  $860\text{ kN}$  para el segundo piso.

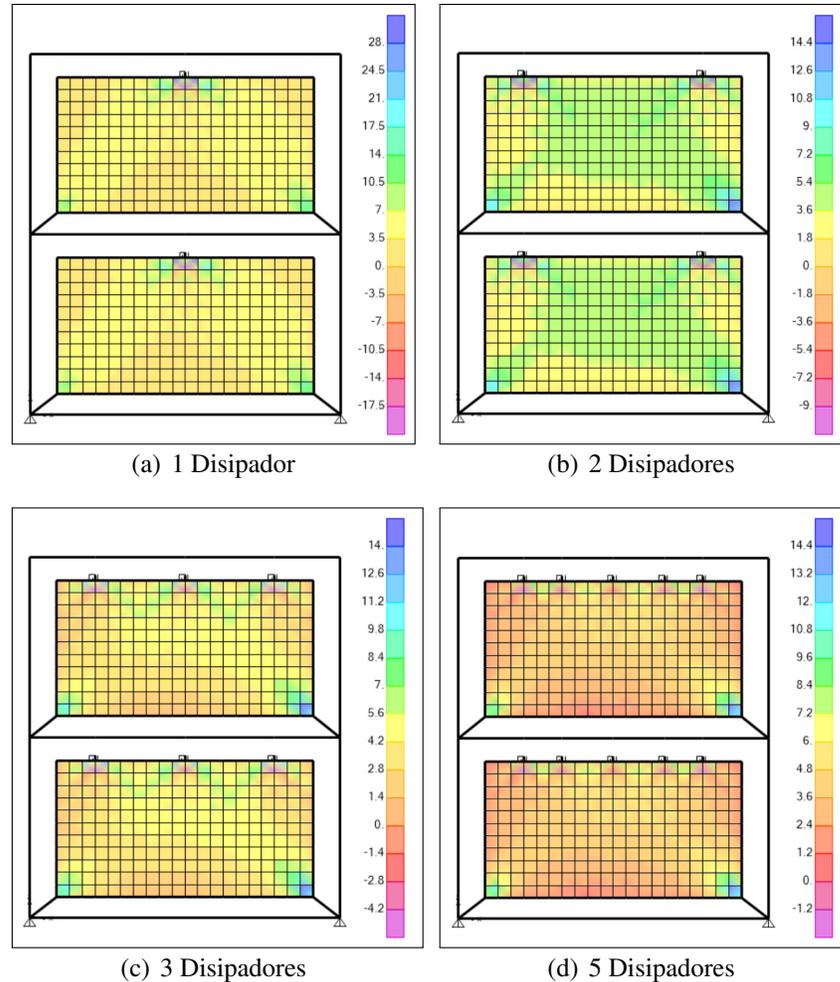


Figura 2.20. Tensiones de corte (unidades en  $kgf/cm^2$ ) con capacidad total de disipadores de  $400\text{ kN}$  - AENL

En este estudio se evaluó las tensiones de corte que se producen en el muro, tanto la tensión máxima  $\tau_{max}$  como la tensión promedio  $\tau_{prom}$ , especialmente la tensión de corte promedio que es con la que se determinó la fuerza aproximada que resiste el muro a corte. Sin embargo, también se mostraron los resultados respecto a la distribución de tensiones de

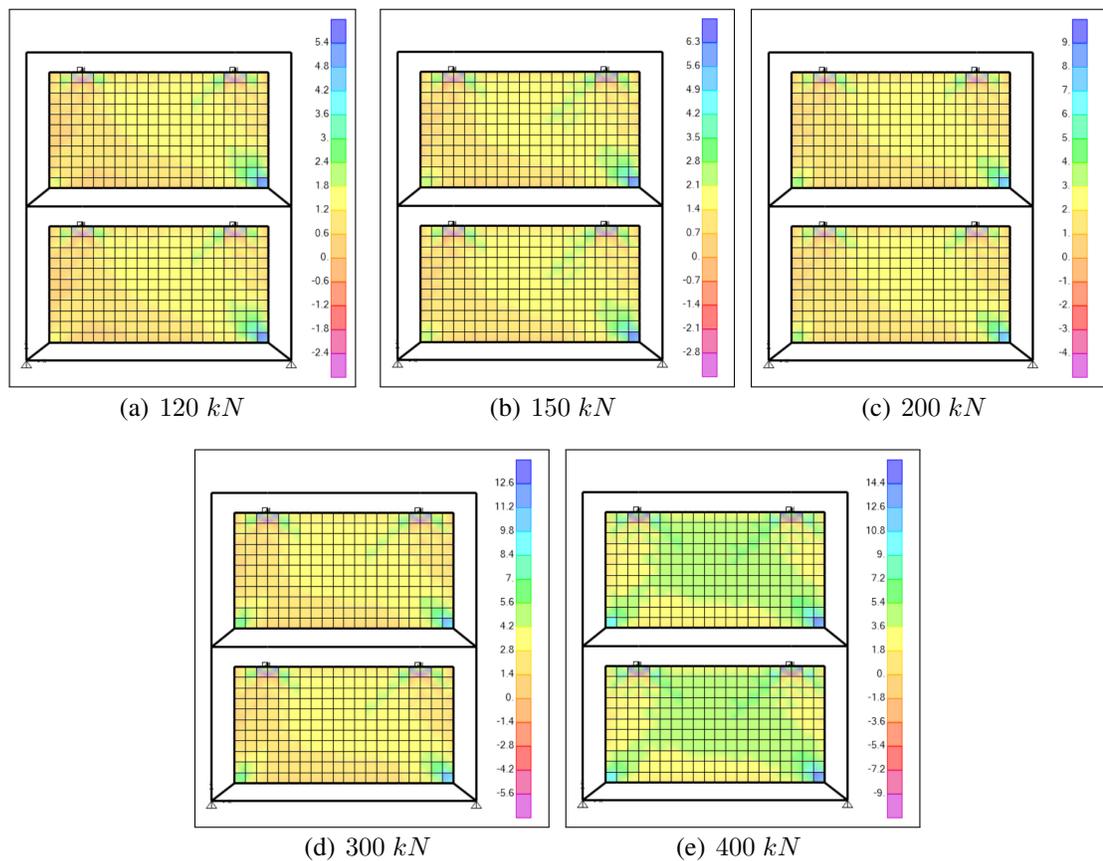


Figura 2.21. Tensiones de corte (unidades en  $kgf/cm^2$ ) con 2 disipadores por muro - AENL

compresión y tracción sobre el muro a manera informativa, considerando que estos fueron modelados sin ningún tipo de no-linealidad, es decir, solo se consideró sus propiedades elásticas.

Los resultados mostraron que, al colocar disipadores con mayor capacidad, se produjeron mayores tensiones de corte, tanto en la posición del disipador como en la unión del muro con el cacho rígido (extremos inferiores del muro). A mayor número de disipadores, las tensiones en la posición del disipador fueron disminuyendo. En la figura 2.20 se observa como se distribuyeron las tensiones de corte al ubicar 1, 2, 3 y 5 disipadores con una capacidad total de 400 kN. Fue evidente que al colocar un disipador se produjeron mayores tensiones que al colocar 2, 3 y 5 disipadores. Dichas tensiones iban disminuyendo a

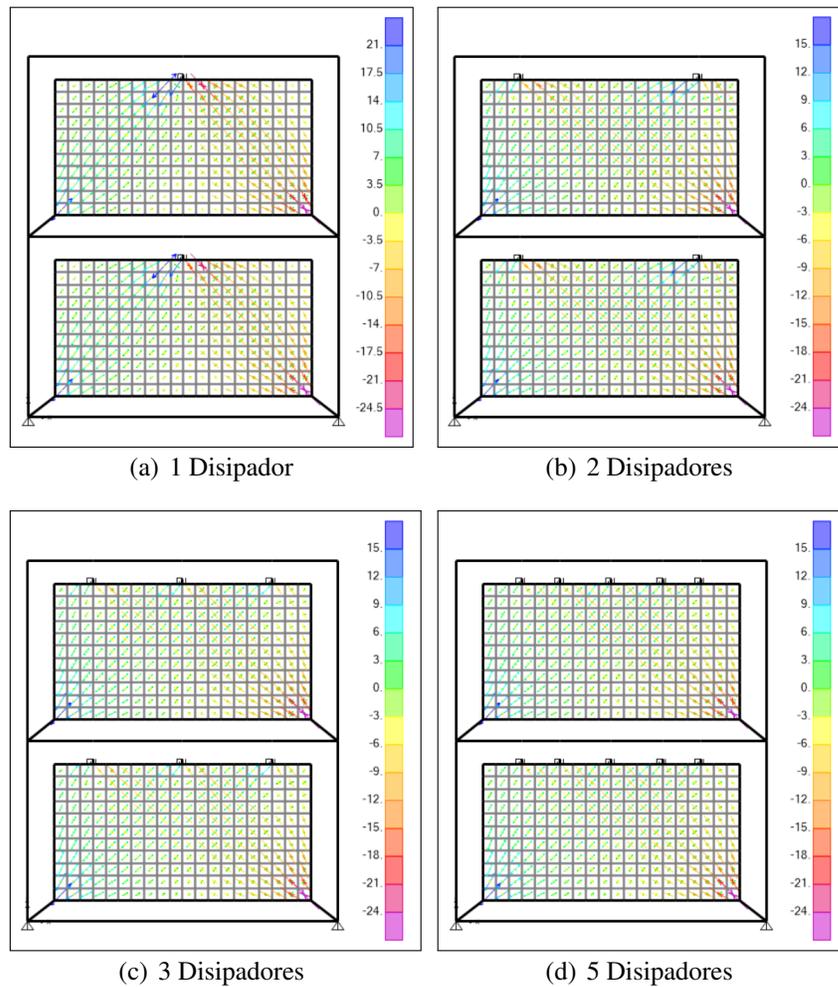


Figura 2.22. Tensiones máximas (Tracción ) y mínimas (Compresión) (unidades en  $kgf/cm^2$ ) con capacidad total de disipadores de  $400 kN$  - AENL

mayor número de disipadores sobre el muro. Así mismo, se logró ver que las tensiones no variaron grandemente al colocar 2, 3 y 5 disipadores.

La figura 2.21 en cambio muestra la distribución de tensiones al considerar 2 disipadores y capacidades de 120, 150, 200, 300 y  $400 kN$ . Con este análisis, se evidenció que las tensiones de corte aumentaron según la capacidad del disipador ubicado.

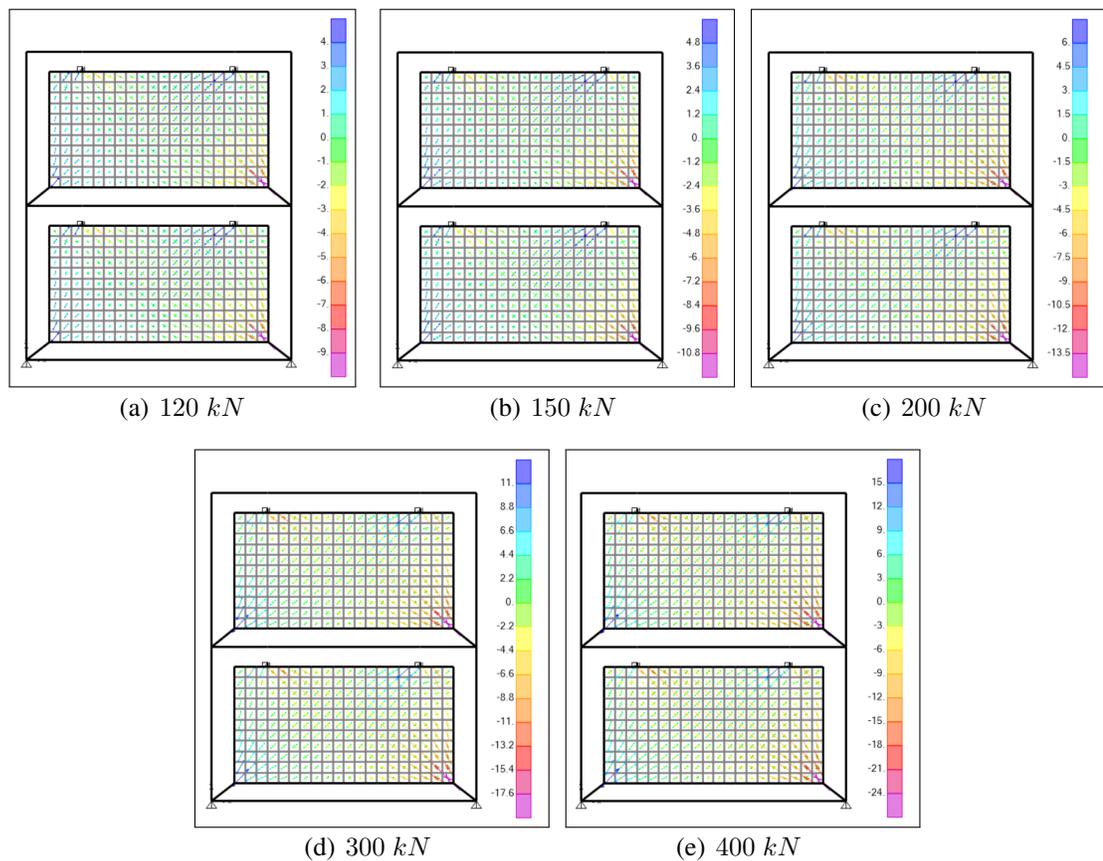


Figura 2.23. Tensiones máximas (Tracción ) y mínimas (Compresión) (unidades en  $kgf/cm^2$ ) con 2 disipadores por muro - AENL

En las figuras 2.22 y 2.23 se muestran la distribución de tensiones máximas y mínimas correspondiente a los casos descritos en las figuras 2.20 y 2.21 respectivamente, según el número de disipadores y la capacidad.

En las tablas 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 se resumieron las tensiones máximas de compresión (C), tracción (T), y las tensiones de corte máximas y promedio en todo el muro como resultado de colocar 1, 2, 3 y 5. Así mismo, se mostraron los resultados al considerar capacidades de 120, 150, 200, 300 y 400  $kN$  sobre todo el muro. Dichos resultados, evidenciaron la alta concentración de tensiones que se presentó entre el muro y la unión con el cacho rígido. Mientras que, al determinar las tensiones de corte promedio en el muro estas no superan el 80% de la tensión de corte promedio utilizada para el análisis

Tabla 2.5. Tensiones en muros de ACD con 1 disipador (unidades en  $kgf/cm^2$ )

|         |                    | Capacidad de los disipadores [kN] |        |        |        |        |
|---------|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N° Piso | Descripción        | 120                               | 150    | 200    | 300    | 400    |
| Piso 1  | $\sigma_{min} (C)$ | -16.31                            | -20.34 | -27.06 | -40.51 | -53.95 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 15.96                             | 19.99  | 27.71  | 40.16  | 53.6   |
|         | $\tau_{max}$       | 9.06                              | 11.33  | 2.01   | 22.64  | 30.18  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.01   | 3.01   | 4.01   |
| Piso 2  | $\sigma_{min} (C)$ | -16.32                            | -20.35 | -27.06 | -40.48 | -53.91 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 15.95                             | 19.99  | 26.72  | 40.18  | 53.64  |
|         | $\tau_{max}$       | 9.07                              | 11.33  | 15.10  | 22.63  | 30.17  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.01   | 3.01   | 4.01   |

Tabla 2.6. Tensiones en muros de ACD con 2 disipadores (unidades en  $kgf/cm^2$ )

|         |                    | Capacidad de los disipadores [kN] |        |        |        |        |
|---------|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N° Piso | Descripción        | 120                               | 150    | 200    | 300    | 400    |
| Piso 1  | $\sigma_{min} (C)$ | -13.10                            | -15.28 | -18.91 | -26.18 | -33.44 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 8.84                              | 11.05  | 14.75  | 22.13  | 29.51  |
|         | $\tau_{max}$       | 5.79                              | 6.73   | 8.32   | 12.00  | 15.98  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.00   | 3.00   | 4.00   |
| Piso 2  | $\sigma_{min} (C)$ | -13.03                            | -15.26 | -18.97 | -26.41 | 29.51  |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 8.84                              | 11.05  | 14.75  | 22.13  | -33.84 |
|         | $\tau_{max}$       | 5.76                              | 6.72   | 8.34   | 11.99  | 15.97  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.00   | 3.00   | 4.00   |

Tabla 2.7. Tensiones en muros de ACD con 3 disipadores (unidades en  $kgf/cm^2$ )

|         |                    | Capacidad de los disipadores [kN] |        |        |        |        |
|---------|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N° Piso | Descripción        | 120                               | 150    | 200    | 300    | 400    |
| Piso 1  | $\sigma_{min} (C)$ | -13.1                             | -15.28 | -18.99 | -26.18 | -33.44 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 5.98                              | 7.48   | 10.17  | 17.31  | 24.53  |
|         | $\tau_{max}$       | 5.85                              | 6.82   | 8.46   | 11.64  | 14.86  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.01   | 3.01   | 4.01   |
| Piso 2  | $\sigma_{min} (C)$ | -13.03                            | -15.26 | -19.05 | -26.41 | -33.84 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 5.98                              | 7.48   | 10.11  | 17.1   | 24.15  |
|         | $\tau_{max}$       | 5.82                              | 6.81   | 8.49   | 11.74  | 15.02  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.01   | 3.01   | 4.01   |

Tabla 2.8. Tensiones en muros de ACD con 5 disipadores (unidades en  $kgf/cm^2$ )

| N° Piso | Descripción        | Capacidad de los disipadores [kN] |        |        |        |        |
|---------|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|         |                    | 120                               | 150    | 200    | 300    | 400    |
| Piso 1  | $\sigma_{min} (C)$ | -13.11                            | -15.29 | -18.92 | -26.19 | -33.46 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 5.6                               | 6.52   | 10.09  | 17.32  | 24.54  |
|         | $\tau_{max}$       | 5.87                              | 6.84   | 8.46   | 11.70  | 14.93  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.00   | 3.01   | 4.01   |
| Piso 2  | $\sigma_{min} (C)$ | -13.03                            | -15.26 | -18.98 | -26.42 | -33.85 |
|         | $\sigma_{max} (T)$ | 5.57                              | 6.51   | 10.04  | 17.1   | 24.16  |
|         | $\tau_{max}$       | 5.84                              | 6.83   | 8.49   | 11.79  | 15.10  |
|         | $\tau_{prom}$      | 1.20                              | 1.50   | 2.00   | 3.01   | 4.01   |

( $\tau_{prom} = 5.50 kgf/cm^2$ ). Es decir, solo se produce una tensión de corte promedio  $\tau_{prom} = 4.00 kgf/cm^2$ , la cual representa el 73% de la resistencia al corte promedio escogida para el análisis.

Teniendo en cuenta que las tensiones de corte promedio en los muros utilizando una capacidad total de disipadores de  $400 kN$  es aproximadamente el 73%. Y, además, que no hay mayores diferencias entre utilizar 2, 3 y 5 disipadores, se asumió que ubicando dos disipadores por muro, y utilizando una capacidad total máxima de  $400 kN$ , se podría considerar que los muros permanecen elásticos o con daños mínimos. Sin olvidar, que esta hipótesis estuvo basada en un análisis con datos disponibles en la literatura revisada. Puesto que, para conocer el real comportamiento que se tendría al considerar esta propuesta de disipadores metálicos mediante muros de ACD con las capacidades mencionadas, es necesario realizar ensayos. Así mismo, utilizar un software y modelos numéricos más sofisticados para evaluar con mayor detalle cada uno de los componentes que fueron definidos y analizados mediante este modelo bidimensional y a través de un análisis estático no-lineal.

Una manera de atenuar el efecto de la alta concentración de tensiones en los apoyos (unión viga-columna-muro) y donde se coloca los disipadores, podría ser colocar en esas zonas hormigón (por ejemplo, una escalerilla en las esquinas), y reforzar con hiladas (refuerzo vertical y horizontal).

En los análisis mostrados se consideró muros llenos. No obstante, es posible considerar también muros con aberturas. Si bien es cierto que, las aberturas generan una reducción de rigidez, sin embargo, esta sigue siendo alta como para permitir concentrar las deformaciones en los disipadores, que es lo que se busca en la propuesta presentada. Lógicamente que se genera concentración de tensiones al colocar una abertura, lo cual implica que habría que reforzar.

#### **2.6.2.2. Análisis Estático no-lineal - muros con diagonal equivalente**

Partiendo de la hipótesis de que con dos disipadores por muro y una capacidad total máxima de  $400\text{ kN}$  los muros permanecen elásticos o con daños mínimos, y con la finalidad de disminuir el costo computacional, se procedió a modelar los muros de albañilería confinada dilatada (ACD) con diagonal equivalente.

Este análisis consistió en modelar los muros de albañilería confinada dilatada (ACD) con un ancho equivalente  $w$ , considerando dos disipadores por muro y una capacidad total máxima de  $400\text{ kN}$ . El patrón de fuerza lateral para el análisis fue el definido en 2.6.2.1. Los resultados fueron comparados con los obtenidos al modelar los muros con elementos shell, es decir, bajo las mismas condiciones en relación al número de disipadores y capacidad máxima en los mismos. Las variables comparativas fueron, el mecanismo de formación de rótulas en función del corte basal y desplazamiento de techo, estado final de las rótulas plásticas, esfuerzos internos en vigas y columnas, y deformación en los disipadores.

Se realizaron varios análisis en función a los distintos valores de ancho equivalente  $w$ , determinados con base en las ecuaciones empíricas descritas en (Crisafulli et al., 2000; Tarque, et al., 2015). El valor utilizado fue de  $134\text{ cm}$ , mismo que se obtuvo con la ecuación de Paulay y Priestley ( $w = 0.25 d_m$ ), siendo  $d_m$  la longitud de la diagonal del muro. Como el modelo consideró dos diagonales que trabajan simultáneamente, entonces a cada diagonal le corresponde un ancho equivalente de  $67\text{ cm}$ .

### Formación de rótulas plásticas y estado final de las mismas

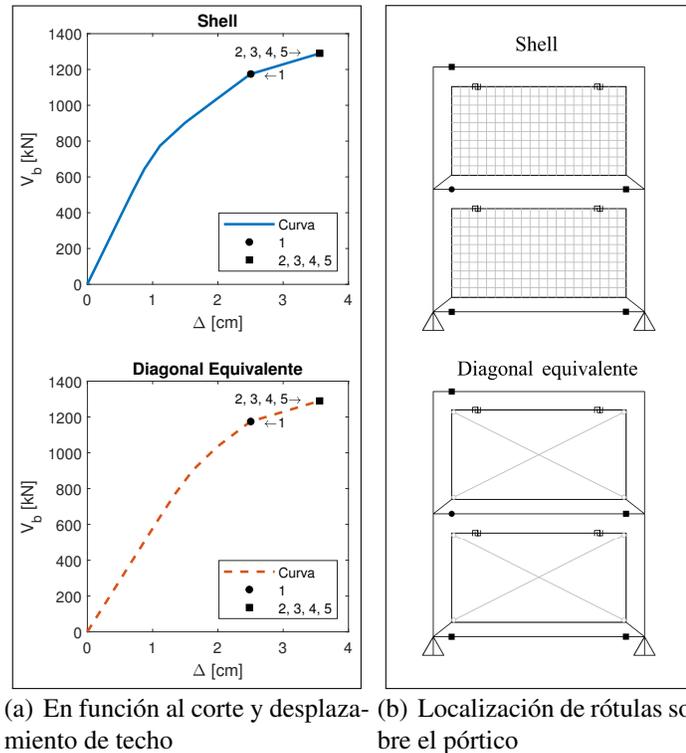


Figura 2.24. Formación de rótulas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL

La figura 2.24 muestra el mecanismo de formación de rótulas y localización de las mismas sobre los elementos del pórtico. En dicha figura se observó que cuando se modela el muro con elementos shell y con las diagonales equivalentes, la primera rótula plástica se forma en el mismo paso y en la misma viga (extremo izquierdo de la viga 2) para ambos sistemas. De igual manera, sucede para las siguientes rótulas, tal como se observa en la figura 2.24(a).

Con respecto al estado final de las rótulas, para ambos casos también se obtuvo un resultado aproximadamente similar, mismo que se observa en la figura 2.25. Si bien es cierto que, los resultados son similares en referencia a la formación de rótulas y estado final, sin embargo hay que notar que antes de que se produzcan las rótulas, el muro modelado con elementos shell presentó una mayor rigidez (figura 2.24(a)). Este comportamiento podría

decirse que es lógico y razonable debido a que el modelo utilizando las diagonales son una aproximación. Mientras que, cuando el muro es modelado con elementos shell se tiene un modelo un poco más realista, ya que se considera la dimensión completa del muro.

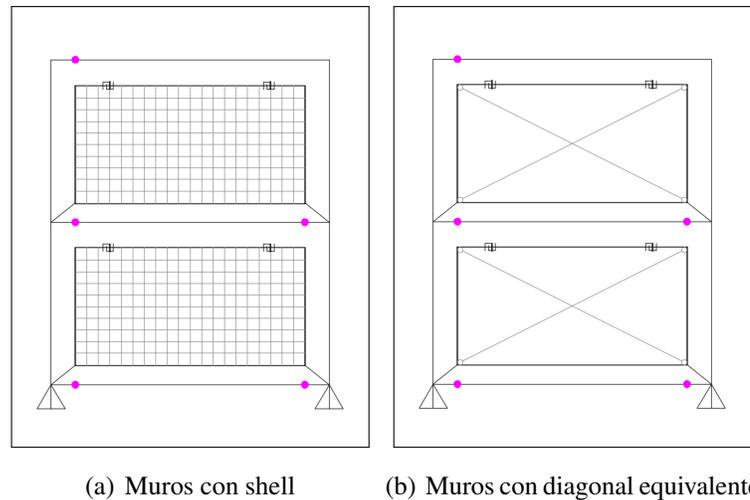


Figura 2.25. Estado final de formación de rótulas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL

### ***Esfuerzos internos en vigas y columnas***

Con ambos modelos, los esfuerzos internos tanto en vigas como en las columnas son prácticamente iguales. Es decir, con el ancho equivalente  $w = 134 \text{ cm}$  y utilizando el modelo de dos diagonales equivalentes que trabajan simultáneamente, fue posible obtener un comportamiento bastante aproximado al compararlo con el comportamiento del muro modelado con elementos shell. En las figuras 2.26 y 2.27 se muestra la comparación de los esfuerzos internos.

### ***Deformación en los disipadores***

Otra variable comparativa, fue el nivel de deformaciones que alcanzaron los disipadores al ser sometidos al mismo nivel de fuerza lateral. La figura 2.28 muestra el nivel de deformación a los cuales estuvieron sometidos los disipadores considerando una capacidad máxima total por muro de  $400 \text{ kN}$ . Cada disipador tuvo una capacidad de  $200 \text{ kN}$ , y

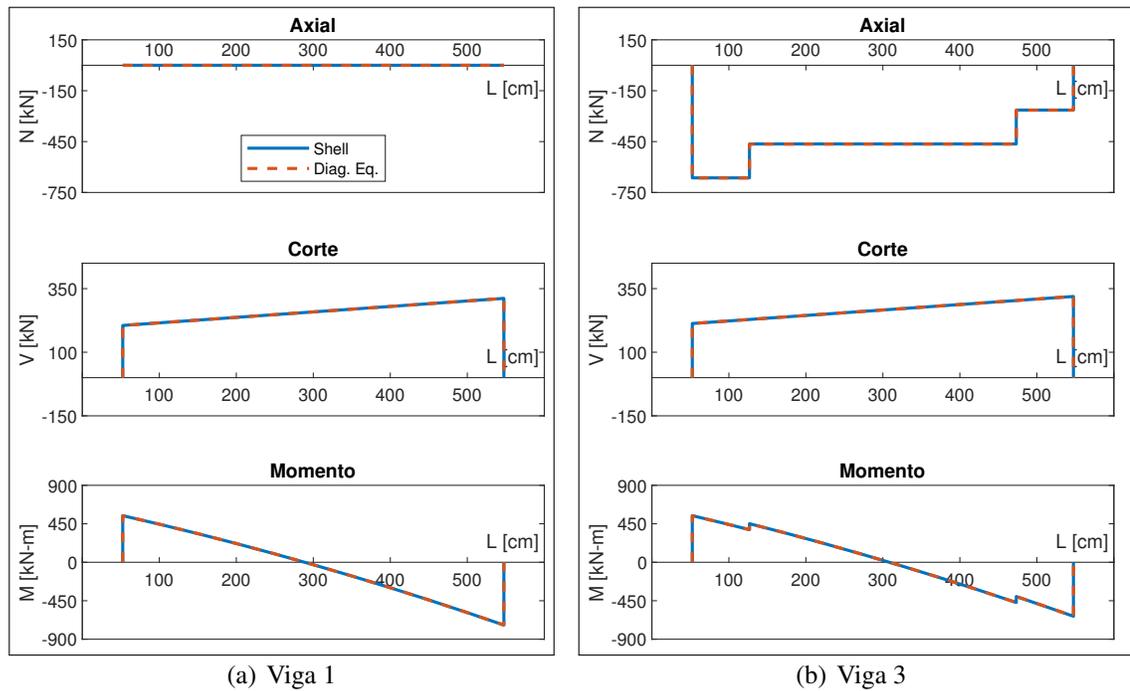


Figura 2.26. Esfuerzos internos en vigas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL

una deformación de fluencia  $\delta_y = 0.40 \text{ cm}$ . Los resultados demostraron que cuando los muros son modelados con elementos shell se obtuvo deformaciones ligeramente mayores a las obtenidas con respecto al modelamiento del muro con diagonales equivalentes. Las diferencias podrían deberse al hecho de que el modelo con diagonales equivalentes son una aproximación.

Es importante señalar que, todos los disipadores alcanzaron su nivel de deformación de fluencia, es decir que todos fueron activados y permitieron evidenciar la capacidad disipativa que pueden proporcionar. Sin embargo, la capacidad de disipación se logra ver de mejor manera en un análisis tiempo-historia no-lineal, el cual se realizó en la estructura tridimensional. La comparación fue realizada únicamente con dos disipadores y con la capacidad total máxima, debido a que es el caso más crítico en cuanto a la capacidad utilizada en los disipadores.

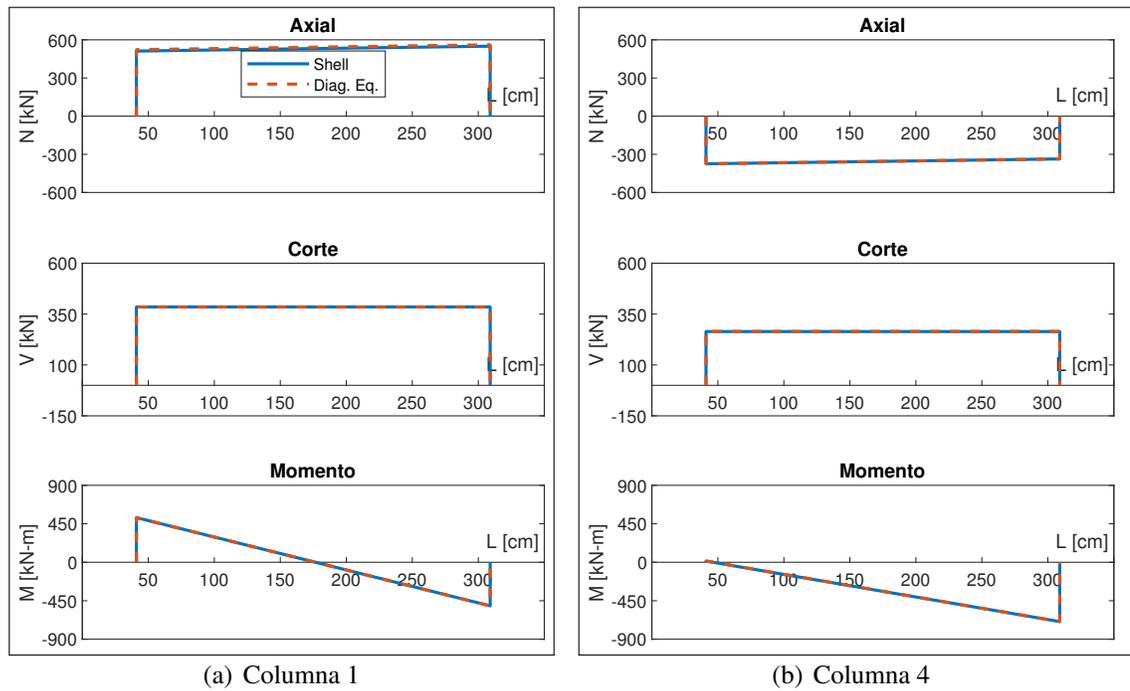


Figura 2.27. Esfuerzos internos en columnas mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL

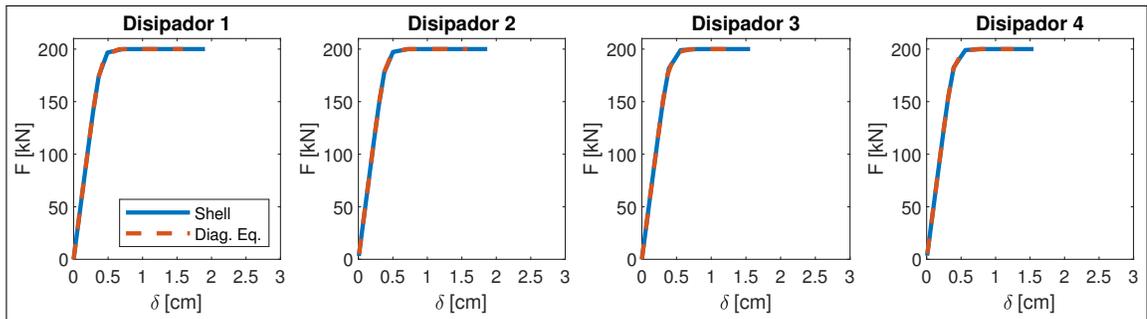


Figura 2.28. Deformación en los disipadores mediante muros con shell y diagonal equivalente - AENL

En resumen, los resultados del modelamiento de los muros con dos diagonales equivalentes respecto a las variables utilizadas para la comparación fueron aproximados al modelamiento de los muros con elementos shell. En consecuencia, se asumió que es posible representar los muros con dos diagonales equivalentes trabajando simultáneamente, correspondiéndole a cada diagonal un ancho equivalente de  $67\text{ cm}$ .

### **3. MODELACIÓN NUMÉRICA - ESTRUCTURA 3D**

#### **3.1. Descripción de la estructura**

En el presente estudio, se consideró una estructura tridimensional idealizada de 10 pisos de pórticos de hormigón armado, con una configuración geométrica de planta alargada de  $1200\text{ cm} \times 4200\text{ cm}$ . Las luces en dirección  $X$  e  $Y$  son de  $600\text{ cm}$ . Una altura de entrepiso de  $350\text{ cm}$ , teniendo el edificio una altura total de  $3500\text{ cm}$ . El edificio es destinado a departamentos y oficinas. En las figuras 3.1(a) y 3.1(b) se observa la configuración geométrica de la estructura en planta y elevación respectivamente.

La estructura fue analizada y diseñada con la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-15 de Ecuador, mediante un análisis dinámico espectral bajo los requisitos de un análisis y diseño sismo-resistente. Así mismo, se utilizó algunas consideraciones de diseño del American Concrete Institute (ACI).

Al ser una estructura idealizada para definir el espectro de respuesta elástico y espectro reducido, se consideró que dicha estructura está ubicada en la ciudad de Manta, Provincia de Manabí - Ecuador. Esta ciudad se encuentra dentro de la zona  $VI$ , zona considerada con el nivel más alto de sismicidad en el país. La aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño es  $Z = 0.50$ , y se consideró un suelo tipo D.

Luego del respectivo análisis y diseño, se obtuvo como resultado columnas rectangulares de  $70 \times 85\text{ cm}$  para todos los pisos, y vigas en las direcciones  $X$  e  $Y$  para todos los pisos de  $45 \times 70\text{ cm}$ . En las figuras 3.2(a), 3.2(b), y 3.3 se muestra la distribución y cantidad de refuerzo de vigas y columnas en función de los pisos.

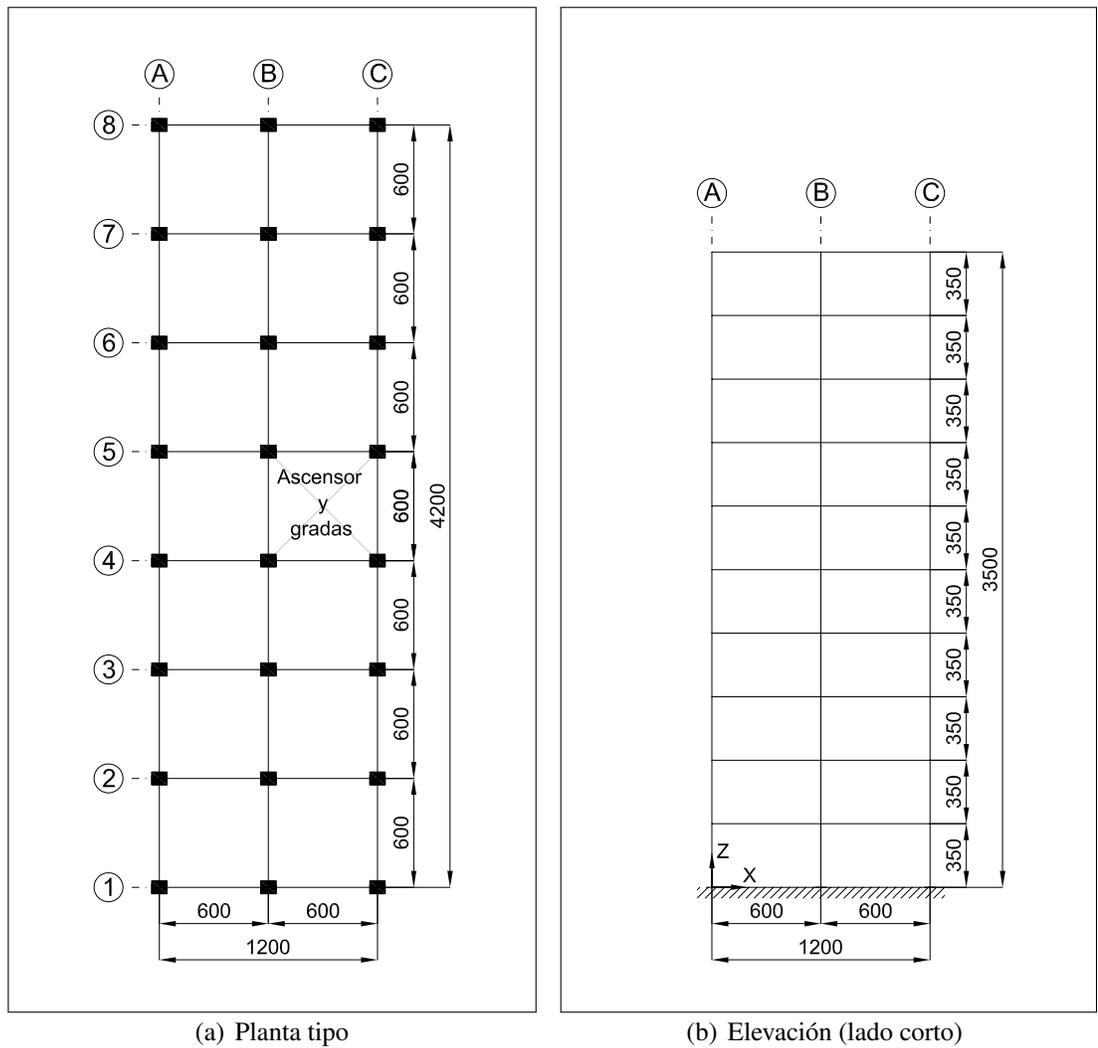
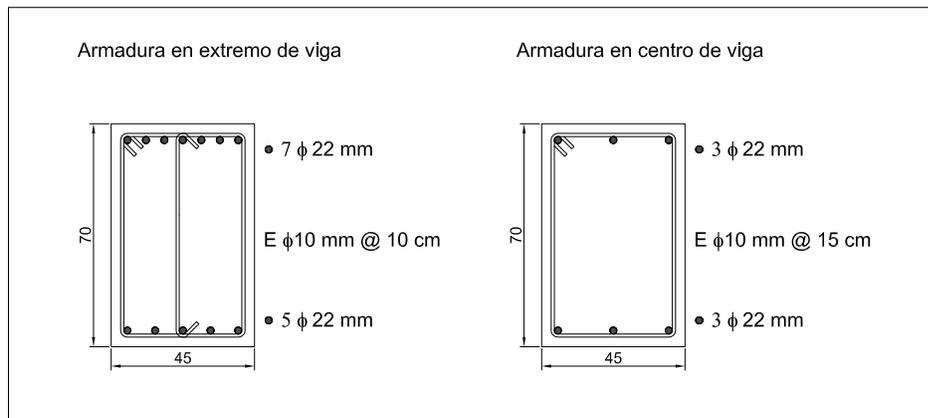


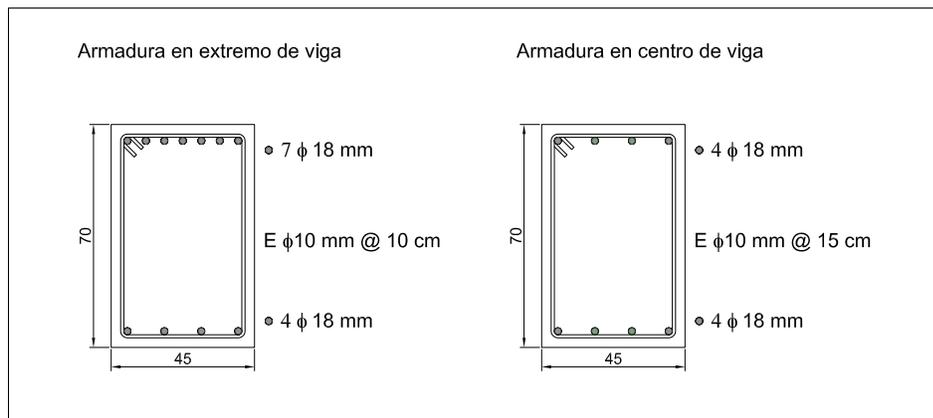
Figura 3.1. Configuración geométrica de la estructura (unidades en  $cm$ )

### 3.2. Materiales

Para la estructura principal, se utilizó hormigón con resistencia a la compresión alcanzada a los 28 días  $f'_c = 28 MPa$ , un acero de refuerzo con resistencia a la fluencia  $f_y = 420 MPa$ . El módulo de elasticidad del hormigón  $E_c$  se determinó como  $15100 \sqrt{f'_c}$ . En la tabla 3.1 se describen las propiedades del hormigón y acero de refuerzo utilizados.



(a) Vigas Pisos 1-6 en X e Y



(b) Vigas Pisos 7-10 en X e Y

Figura 3.2. Refuerzo de vigas (unidades en *cm*)

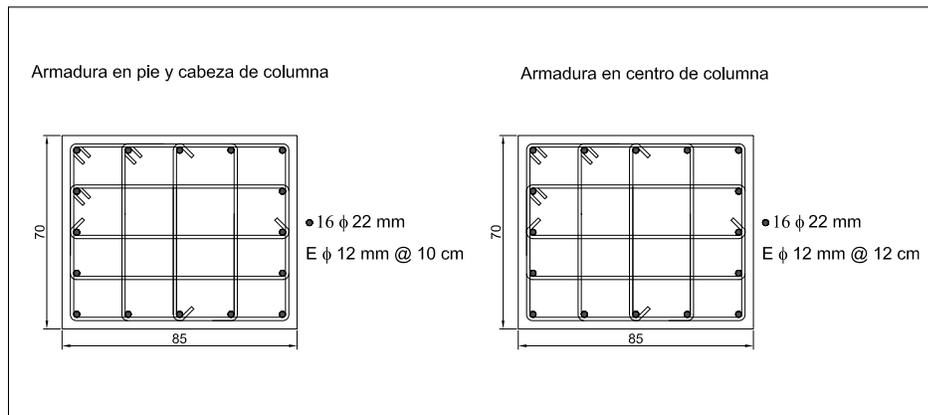


Figura 3.3. Refuerzo de columnas Pisos 1-10 (unidades en *cm*)

Las propiedades respecto a los muros de albañilería confinada, se definieron en el apartado 2.3. En dicho apartado, se evaluó numéricamente la propuesta: disipadores metálicos mediante albañilería confinada dilatada en un modelo bidimensional de 2 pisos y 1 vano. En la tabla 3.2 se resumen las propiedades de la albañilería utilizadas en el análisis.

Tabla 3.1. Propiedades del material

| <i>Propiedad</i>                                    | <i>Hormigón</i> | <i>Acero de refuerzo</i> |
|---|-----------------|--------------------------|
| Peso específico [ $kN/m^3$ ]                        | 240.00          | 78.50                    |
| Módulo de elasticidad [ $MPa$ ]                     | 25267.13        | 200000.00                |
| Coefficiente de Poisson                             | 0.20            | 0.30                     |
| Coefficiente de dilatación térmica [ $1/^\circ C$ ] | 9.90E-06        | 1.17E-05                 |
| Módulo de corte [ $MPa$ ]                           | 10527.97        | 78419.30                 |

Tabla 3.2. Propiedades de la albañilería confinada

| <i>Propiedad</i>                | <i>Alb. confinada</i> | <i>H. confinamiento</i> |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Peso específico [ $kN/m^3$ ]    | 20.00                 | 24.00                   |
| Módulo de elasticidad [ $MPa$ ] | 4849.00               | 23344.03                |
| Coefficiente de Poisson         | 0.175                 | 0.20                    |
| Módulo de corte [ $MPa$ ]       | 1939.60 (0.4 $E_m$ )  | 9726.68                 |

### 3.3. Cargas gravitacionales

El análisis de la estructura estuvo enfocado en el comportamiento de las vigas y columnas. Con la finalidad de disminuir el costo computacional, las losas de entrepiso fueron modeladas considerando un diafragma rígido, y las sobrecargas distribuidas linealmente sobre las vigas. La sobrecarga respecto al peso de losa y/o terminaciones (paredes, instalaciones, acabados, etc.) fue  $8.8 kN/m^2$ , y la sobrecarga en función al uso de la estructura fue  $0.20 kN/m^2$ . Las cargas debido a la acción del peso propio de la estructura fueron determinadas directamente por el software en base a la definición de los pesos específicos de los materiales empleados.

Al ser las longitudes de las vigas en las direcciones  $X$  e  $Y$  iguales, le corresponden las mismas cargas distribuidas linealmente, únicamente se hace diferencia entre una viga externa y una viga interna. En la tabla 3.3 se resumen las sobrecargas distribuidas linealmente para las vigas internas y externas.

Tabla 3.3. Sobrecargas aplicadas en vigas

| <i>Propiedad</i>                                | <i>Viga externa</i> | <i>Viga interna</i> |
|---|---------------------|---------------------|
| Sobrecarga de losa y/o terminaciones [ $kN/m$ ] | 13.20               | 26.40               |
| Sobrecarga de uso [ $kN/m$ ]                    | 3.00                | 6.00                |

En el análisis, es importante considerar el efecto de las cargas gravitacionales, para tener un desempeño más realista de la estructura. Es por ello que, para considerar el efecto de las cargas gravitacionales en combinación con la acción sísmica, se utilizó la siguiente ecuación (ASCE, 2014):

$$Q_G = Q_D + 0.25 Q_L, \quad (3.1)$$

donde,

$Q_D$  : Carga muerta.

$Q_L$  : Carga viva.

### 3.4. Amortiguamiento de la estructura

En el análisis tiempo-historia no-lineal con integración directa, el amortiguamiento de la estructura es modelado utilizando una matriz de amortiguamiento completa. El software utilizado permite definir dos tipos de amortiguamiento: amortiguamiento proporcional viscoso y amortiguamiento modal adicional. Para este trabajo, se utilizó el amortiguamiento proporcional viscoso. De modo que, la matriz de amortiguamiento se determina como una combinación lineal de la matriz de rigidez escalada por un coeficiente  $c_K$ , y la matriz de masa escalada por un segundo coeficiente  $c_M$ .

$$\mathbf{C} = c_M \mathbf{M} + c_K \mathbf{K} \quad (3.2)$$

El modelo propuesto por Rayleigh, es un procedimiento numérico que considera que la matriz de amortiguamiento es proporcional a la matriz de masa y a la matriz de rigidez de la estructura, mediante una combinación lineal como se define en la ecuación 3.3. Una forma de estimar los coeficientes mencionados, es evaluando el valor del amortiguamiento modal generalizado, a partir del modelo propuesto por Rayleigh. Para ello, la relación entre la razón de amortiguamiento y la frecuencia según el modelo de Rayleigh, está dada por (Chopra, 2014):

$$\xi_n = \frac{c_M}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{c_K}{2} \omega_n \quad (3.3)$$

En base a datos experimentales, es razonable suponer que dos modos cualesquiera  $i$  y  $j$ , tendrán asociados el mismo valor de  $\xi$ . Por lo que, planteando el sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, es posible determinar los valores de  $c_M$  y  $c_K$  (Chopra, 2014).

$$c_M = \xi \frac{2 \omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.4a)$$

$$c_K = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.4b)$$

Para determinar los coeficientes proporcionales o que escalan a las matrices de masa y rigidez, es necesario definir dos frecuencias modales ( $\omega_i, \omega_j$ ). Estos valores deben elegirse de manera tal que garanticen valores razonables para las fracciones de amortiguamiento en todos los modos que contribuyen de manera significativa a la respuesta (Chopra, 2014). En base a esto, se consideró la primera y séptima frecuencia modal ( $\omega_1$  y  $\omega_7$ ), con una fracción de amortiguamiento del 5% para ambos modos. La séptima frecuencia fue determinada

debido a que permite incluir los modos necesarios para que la suma de las masas equivalentes sea al menos el 90% de la masa total. En la tabla 3.4 se describen los coeficientes determinados.

Tabla 3.4. Coeficientes proporcionales o que escalan a las matrices de masa y rigidez

| $T_1$  | $T_7$  | $c_M$     | $c_K$      | $\sum masa\ modal$ |
|--------|--------|-----------|------------|--------------------|
| 1.51 s | 0.25 s | 0.357 1/s | 0.003414 s | 93.46%             |

### 3.5. Rótulas plásticas

Existen varios modelos de plasticidad para representar el comportamiento no-lineal de los elementos barras tipo viga y columna. El modelo más simple es el de plasticidad concentrada, mismo que fue implementado en este estudio. Este modelo consiste en representar el comportamiento no-lineal a partir de rótulas concentradas, típicamente a ocurrir en regiones críticas, especialmente detalladas de la estructura. Generalmente, dichas regiones están ubicadas cerca de las conexiones entre los elementos del pórtico (cercanas o adyacentes a las uniones viga-columna). De modo que, la plasticidad se concentra en un punto del elemento a partir de las relaciones momento-rotación con longitud plástica cero.

Para vigas se implementaron rótulas plásticas únicamente a flexión (plasticidad unidimensional), sin considerar corte ni fuerza axial. En las columnas, el efecto de la fuerza axial es considerable, por lo que las rótulas plásticas se implementaron considerando la interacción entre el momento y la fuerza axial (plasticidad bidimensional). La combinación entre el momento y fuerza axial se conoce como curva de interacción de la sección (o superficie de fluencia). No se consideró corte.

#### 3.5.1. Relación Momento - Curvatura

Un elemento estructural dúctil es aquel que ha sido diseñado intencionadamente para admitir deformaciones inelásticas tras muchos ciclos de carga debidos a la acción sísmica,

sin que esto implique una degradación significativa ni de su resistencia ni de su rigidez. La ductilidad local o ductilidad a nivel de sección se determina mediante un diagrama momento-curvatura. Por lo que, la ductilidad ( $\mu$ ) es el coeficiente entre el valor de curvatura última ( $\phi_u$ ) y el valor de la curvatura en el momento de la primera plastificación de la armadura ( $\phi_y$ ) (Rodríguez, 2015).

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (3.5)$$

Para determinar los valores de momento y curvatura para cada una de las secciones, se hizo uso de la aplicación *Section Designer* del software utilizado. La aplicación permite obtener la relación momento-curvatura para cualquier sección previamente definida. Esta relación es determinada en función de los valores de tensión y deformación de los materiales utilizados, los cuales se definen previamente. Para el presente trabajo, se utilizó el modelo idealizado de Caltrans (definido por defecto en el software) para encontrar los valores correspondientes al momento plástico ( $M_p$ ) y curvatura de fluencia ( $\phi_y$ ). Con estos parámetros se definen las rótulas a flexión para vigas y flexo-compresión en columnas.

El modelo de Caltrans consiste en idealizar la curva momento-curvatura con un diagrama elástico-plástico perfecto. De tal manera que, la rama horizontal plástica queda definida tras representar de forma conjunta la curva ideal y la curva real y que se iguale el área tanto por encima como por debajo de la recta horizontal ideal. La rama elástica ideal será aquella que pase por el punto que marca la plastificación de la armadura de refuerzo en la curva real (Rodríguez, 2015).

El momento y curvatura en vigas y columnas, y la curva de interacción en columnas se determinaron a partir de sus propiedades geométricas, cuantía de refuerzo y de los materiales utilizados. Las propiedades inelásticas del hormigón para vigas fueron definidas con el modelo de Mander no confinado, mientras que para las columnas se consideró el modelo de Mander confinado. Las propiedades inelásticas con respecto al acero de refuerzo fue la curva tensión-deformación de Park.

En las vigas, al considerarse un comportamiento a flexión pura, la relación momento-curvatura fue determinada con fuerza axial cero ( $P = 0$ ). En las columnas, el efecto de la fuerza axial es considerable, por lo que es necesario considerarla. Se determinó la relación momento-curvatura, considerando varios valores de fuerza axial (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, y 40 % de la capacidad máxima a compresión de la sección). Es importante mencionar que donde se define la relación momento-rotación, únicamente se requiere el valor de la curvatura y/o rotación de fluencia y las demás rotaciones que definen la curva esqueleto. Puesto que, el momento es normalizado para el momento de fluencia o plástico, y se asume que el software calcula los valores que forman la interacción  $P - M$  de la columna.

### **3.5.2. Reducción de rigidez o rigidez efectiva en elementos estructurales**

Debido a la acción sísmica, se producen esfuerzos internos sobre los elementos estructurales, los cuales a su vez se genera agrietamiento en el hormigón. Por lo que, no sería adecuado utilizar las propiedades elásticas de los elementos en el análisis tiempo-historia no-lineal. La reducción de rigidez se puede definir para cada elemento. Sin embargo, debido a que los esfuerzos internos producidos en cada elemento estructural son distintos, muchas veces no es tan factible calcular estos factores desde el punto de vista práctico. Varias normas y códigos recomiendan factores de reducción para considerar el agrietamiento en las secciones de hormigón, en función de cada elemento estructural.

Para este estudio se consideró los factores de reducción de rigidez establecidos en la NEC-15 en el capítulo con código NEC-SE-MP, en donde para vigas y columnas, se señalan los siguientes factores:

- Vigas:  $0.5 I_g$ .
- Columnas:  $0.8 I_g$ .

donde,

$I_g$  : Valor no agrietado de la inercia de la sección transversal del elemento.

### 3.5.3. Curva esqueleto (backbone curve) de las rótulas plásticas

En el software, la curva esqueleto está representada a través de la definición de 5 puntos, tal como se muestra en la figura 3.4 . El punto A de la curva representa el origen. El punto B es el punto de fluencia, no existe deformación en la rótula hasta el punto B, sólo se muestra las deformaciones o rotaciones plásticas luego del punto B. El punto C representa la capacidad última de la rótula plástica a partir del cual decae la resistencia. El punto D representa la resistencia residual y el punto E representa el punto de falla total.

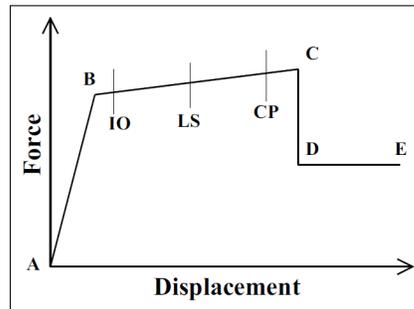


Figura 3.4. Curva esqueleto (Computers & Structures, Inc. SAP2000 v19.2.1)

Al definir la relación momento-curvatura, usando el modelo de Caltrans idealizado, se obtiene una curva esqueleto bilineal sin endurecimiento (elasto-plástica). La pendiente de la rama elástica corresponde a la rigidez efectiva de la sección, la que se obtiene reduciendo la inercia bruta de esta (ver en el apartado 3.5.2 los factores de reducción). La curvatura de fluencia considerando la reducción de inercia esta dada por:

$$\phi_y = \left( \frac{M_y}{E_c I_{eff}} \right) \quad (3.6)$$

Y la rotación de fluencia esta definida como:

$$\theta_y = \phi_y L_p \quad (3.7)$$

Existen varias recomendaciones para definir la longitud plástica, para determinar las deformaciones inelásticas en vigas y columnas. Para este estudio se consideró la siguiente ecuación en *MPa* (Paulay y Priestley, 1992):

$$L_p = 0.08 L + 0.022 d_{b,long} f_y \quad (3.8)$$

donde,

$M_y$  : Momento de fluencia (Momento plástico con modelo de Caltrans).

$E_c$  : Módulo de elasticidad del hormigón.

$I_{eff}$  : Momento de inercia considerando reducción de rigidez ( $I_{eff} = \%_{red} I_g$ ).

$L_p$  : Longitud plástica.

$d_{b,long}$  : Diámetro de la barra del refuerzo longitudinal.

$f_y$  : Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo.

La longitud plástica utilizada para determinar la deformación inelástica, es diferente a la longitud de zona de rótula plástica. (Paulay y Priestley, 1992).

En este trabajo no se realizó una revisión respecto a definir un nivel de daño en las vigas y columnas referente a un criterio de aceptación (por ejemplo, IO, LS, CP de acuerdo a ASCE, 2014). Sin embargo, se evaluó el cambio que se produce en la formación de rótulas de la estructura sin disipación y con disipación en base a la propuesta de disipadores metálicos mediante muros de ACD. De modo que, las rotaciones plásticas que definen los puntos de la curva esqueleto fueron definidos, dada una ductilidad y en función de la rotación de fluencia, como se describe a continuación:

$$\mu = \frac{(\phi_p + \phi_y) L_p}{\phi_y L_p} = \frac{\theta_p + \theta_y}{\theta_y} = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (3.9)$$

$$\theta_u = \mu \theta_y \quad (3.10)$$

$$\theta_p = \theta_u - \theta_y = \mu \theta_y - \theta_y = (\mu - 1) \theta_y \quad (3.11)$$

El punto B es el inicio de fluencia, es decir rotación plástica cero (ductilidad local 1). Para el punto C se consideró una ductilidad local de 7. En el punto D la ductilidad local fue 8 y para el punto E ductilidad local igual o mayor a 9. Por otra parte, aprovechando que el software permite la definición de los puntos IO, LS y CP se utilizó esa definición para establecer puntos intermedios. Dichos puntos fueron definidos utilizando ductilidades locales de 4, 5, y 6, de esta manera, observar como va cambiando el nivel de deformación tanto en vigas y columnas en el momento del análisis. A continuación, se describe los parámetros utilizados para determinar las rotaciones plásticas que definieron la curva esqueleto, las cuales están en función de la rotación de fluencia de la sección.

- Punto B  $\rightarrow \theta_y \leq \theta_p < 3 \theta_y$
- Punto IO  $\rightarrow 3 \theta_y \leq \theta_p < 4 \theta_y$
- Punto LS  $\rightarrow 4 \theta_y \leq \theta_p < 5 \theta_y$
- Punto CP  $\rightarrow 5 \theta_y \leq \theta_p < 6 \theta_y$
- Punto C  $\rightarrow 6 \theta_y \leq \theta_p < 7 \theta_y$
- Punto D  $\rightarrow 7 \theta_y \leq \theta_p < 8 \theta_y$
- Punto E  $\rightarrow \theta_p \geq 8 \theta_y$

#### 3.5.4. Modelo histerético de las rótulas plásticas

Luego que se ha definido la curva esqueleto, es necesario implementar el modelo histerético. La histéresis es el proceso de disipación de energía a través de la deformación. Mediante ensayos experimentales, se ha demostrado que el modelo histerético propuesto por Takeda et al. (1970) es una buena aproximación al ciclo histerético característico de elementos estructurales de hormigón armado. El software utilizado únicamente considera el modelo de Takeda, para rótulas plásticas en flexión. Mientras que, para las columnas, en la cual las rótulas consideran una combinación entre el momento y la fuerza axial, el único

modelo que se encuentra disponible es el modelo isotrópico. Este modelo disipa mayor cantidad de energía, en comparación con el modelo de Takeda, lo cual puede ser poco apropiado para muchos casos. Estos modelos ya se encuentran definidos y no requieren de parámetros adicionales.

En este trabajo se utilizó el modelo histerético de Takeda, para la definición de las rótulas plásticas en vigas. En el modelo de Takeda, la descarga se realiza con misma pendiente de la rama elástica, luego al recargar la curva, sigue una línea secante a la curva esqueleto para cargar en la dirección opuesta. El punto objetivo para esta secante está en la deformación máxima que ocurrió en esa dirección, bajo ciclos de carga anteriores. Esto da como resultado una cantidad decreciente de disipación de energía con deformaciones más grandes.

Para las columnas, se utilizó el modelo histerético isotrópico debido a la limitación del software. En el modelo isotrópico, la descarga y la carga inversa ocurren a lo largo de una trayectoria paralela a la línea elástica. Esto sucede hasta que la magnitud de la acción en la dirección inversa es igual a la de la curva esqueleto con la misma cantidad de deformación en la dirección inversa y luego continúa a lo largo de una secante horizontal a la curva esqueleto.

### **3.5.5. Propiedades que definen las rótulas plásticas en vigas y columnas**

Las vigas presentan refuerzo diferente para momento positivo y negativo, entonces se tienen valores distintos para momento plástico y rotación de fluencia, por lo que se define una curva momento-rotación asimétrica para la rótula plástica. En la definición, los momentos y rotaciones fueron normalizados para el momento plástico y rotación de fluencia respectivamente. En la tabla 3.5 se resumen las propiedades de las rótulas plásticas para las vigas de los pisos 1-6 y 7-10.

Las columnas son de sección rectangular y refuerzo simétrico (eje fuerte en dirección del lado corto). La superficie de interacción ( $P - M2 - M3$ ) de la sección fue definida

Tabla 3.5. Propiedades de las rótulas plásticas en vigas -  $P = 0$

| <i>Propiedad</i>                   | <i>Vigas</i>            |                         |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                    | <i>Pisos 1-6</i>        | <i>Pisos 7-10</i>       |
| Momento plástico [ $kN - m$ ]      | 545.13 (734.46)         | 303.89 (506.02)         |
| Curvatura de fluencia [ $rad/cm$ ] | 3.3547E-05 (4.5198E-05) | 1.8701E-05 (3.1140E-05) |
| Longitud plástica [ $cm$ ]         | 68.33                   | 68.33                   |
| Rotación de fluencia [ $rad$ ]     | 0.0023 (0.0031)         | 0.0012 (0.0020)         |

*Nota: Datos en paréntesis corresponden a valores refuerzo negativo.*

mediante las disposiciones del ACI 318-14 (opción por default del software). Además, se consideró el modelo elastoplástico ideal para la relación fuerza axial vs desplazamiento. Por otra parte, se asume que el software normaliza los momentos para el momento plástico o de fluencia. Con respecto a las rotaciones plásticas no fueron normalizadas, debido a que se consideraron varias fuerzas axiales. En la tabla 3.6 se resumen las propiedades de las rótulas plásticas para las columnas, las cuales son las mismas para todos los pisos.

Tabla 3.6. Propiedades de las rótulas plásticas en columnas

| <i>Columnas Pisos 1-10</i> |                         |                              |                          |                             |
|----------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| <i>Fuerza axial</i>        | <i>Momento plástico</i> | <i>Curvatura de fluencia</i> | <i>Longitud plástica</i> | <i>Rotación de fluencia</i> |
| [ $kN$ ]                   | [ $kN - m$ ]            | [ $rad/cm$ ]                 | [ $cm$ ]                 | [ $rad$ ]                   |
| 0                          | 1090.70 (891.52)        | 1.5062E-05 (1.8153E-05)      | 48.33                    | 0.0007 (0.0009)             |
| -833                       | 1352.20 (1109.50)       | 1.8673E-05 (2.2592E-05)      | 48.33                    | 0.0009 (0.0011)             |
| -1666                      | 1603.60 (1311.60)       | 2.2145E-05 (2.6707E-05)      | 48.33                    | 0.0011 (0.0013)             |
| -2499                      | 1805.20 (1499.60)       | 2.4929E-05 (3.0535E-05)      | 48.33                    | 0.0012 (0.0015)             |
| -3332                      | 1984.50 (1647.70)       | 2.7405E-05 (3.3551E-05)      | 48.33                    | 0.0013 (0.0016)             |
| -4165                      | 2146.00 (1772.60)       | 2.9635E-05 (3.6094E-05)      | 48.33                    | 0.0014 (0.0017)             |
| -4998                      | 2291.00 (1885.60)       | 3.1681E-05 (3.8395E-05)      | 48.33                    | 0.0015 (0.0019)             |
| -5831                      | 2413.70 (1976.40)       | 3.3332E-05 (4.0244E-05)      | 48.33                    | 0.0016 (0.0019)             |
| -6664                      | 2507.20 (20615.00)      | 3.4623E-05 (4.1976E-05)      | 48.33                    | 0.0017 (0.0020)             |

*Nota: Datos en paréntesis corresponden al eje débil.*

### 3.6. Disipadores de energía

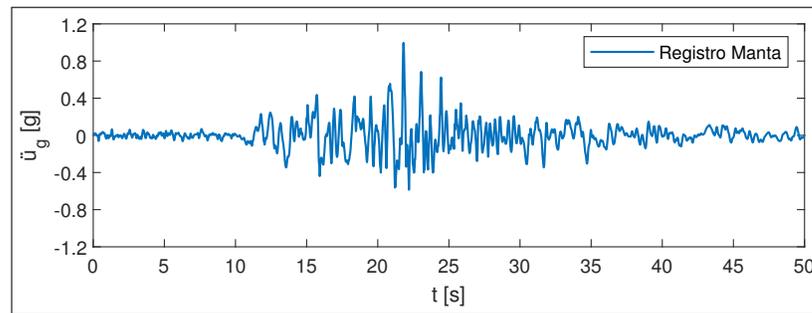
En base a los resultados del comportamiento de los muros de albañilería en el proceso de evaluación numérica del apartado 2. Además, con la finalidad de establecer capacidades homogéneas desde el punto de vista fabricación, se consideró utilizar dos capacidades de disipadores para el análisis. Dichas capacidades estuvieron limitadas por la capacidad de los muros de ACD de acuerdo a la literatura revisada. Por otra parte, se consideró un porcentaje de utilización no mayor al 80% de su capacidad, para garantizar que los muros permanezcan “elásticos o con daños mínimos”. Para ello, se ubicó dos disipadores por muro, utilizando ya sea una fuerza de fluencia de 100 o 200  $kN$ . Los parámetros utilizados en el análisis tridimensional se definieron en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Propiedades de los disipadores - Modelo tipo Bouc-Wen

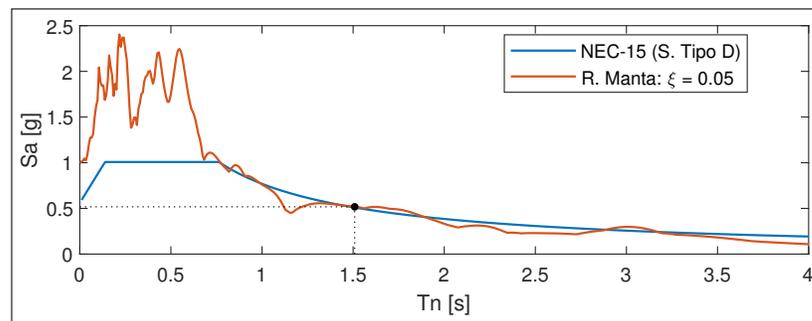
| <i>Descripción</i>               | <i>Capacidad 1</i> | <i>Capacidad 2</i> |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Fuerza de fluencia [ $kN$ ]      | 100.00             | 200.00             |
| Deformación de fluencia [ $cm$ ] | 0.40               | 0.40               |
| Rigidez de fluencia [ $kN/cm$ ]  | 250.00             | 500.00             |
| Factor post-fluencia             | 0.00               | 0.00               |
| Parámetro $N$                    | 8                  | 8                  |

### 3.7. Registro sísmico

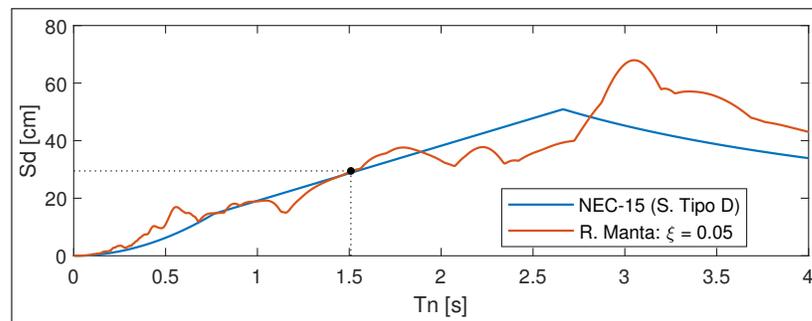
Como se mencionó previamente, el enfoque de este estudio fue mostrar como se comporta una estructura tridimensional con disipadores de energía metálicos instalados mediante muros de albañilería estructural. Es decir, es un caso particular de análisis, porque la propuesta puede ser aplicada a cualquier estructura y con cualquier registro sísmico. Si bien es cierto que, la elección de un registro sísmico conlleva muchas consideraciones. Sin embargo, para este análisis se utilizó un registro sísmico que fuese aproximadamente



(a) Registro sísmico



(b) Pseudo-Aceleración



(c) Desplazamiento

Figura 3.5. Registro sísmico y espectros de diseño NEC-15 y del registro compatible con el espectro de la NEC-15, en la zona de periodos donde se encuentra el periodo la estructura que acumule más masa modal. Es por ello que, para el análisis tiempo-historia no-lineal, simplemente se consideró un registro sísmico registrado en la ciudad de Manta en el terremoto del 16 de abril de 2016 en Ecuador, amplificado por un factor de 1.9. El primer periodo fue  $T_1 = 1.51$  s, con una masa modal total del 78%. El espectro del registro sísmico se determinó considerando un amortiguamiento del 5% ( $\xi = 0.05$ ). En la

figura 3.5 se muestra el registro natural amplificado, y espectros de pseudo-aceleración y desplazamiento de la NEC-15 y del registro sísmico natural amplificado respectivamente.

### **3.8. Análisis realizados**

En este estudio, se realizó tres tipos de análisis dinámico no-lineal:

1. Análisis elástico equivalente de la estructura.
2. Análisis inelástico de la estructura sin disipadores.
3. Análisis inelástico de la estructura con disipadores en base a la propuesta: disipadores metálicos mediante muros de albañilería confinada dilatada (ACD).

La finalidad de estos análisis fue realizar una comparación entre la respuesta estructural del análisis elástico equivalente vs análisis inelástico sin disipadores, y la respuesta del análisis inelástico con y sin disipadores.

En este trabajo se pretendió mostrar de manera conceptual el comportamiento de la estructura al incorporar los disipadores en base a la propuesta: disipadores metálicos mediante muros de albañilería confinada dilatada (ACD). Por lo tanto, se presentaron los resultados únicamente en la dirección del lado corto que es la dirección X (ver figura 3.1(b)), ya que en la otra dirección sería algo similar.

### **3.9. Ecuación de movimiento**

El análisis dinámico no-lineal, en general es el procedimiento más sofisticado disponible para evaluar el comportamiento de estructuras que incorporan dispositivos pasivos de disipación de energía. Así como también para la respuesta inelástica de la estructura sin disipación. Este análisis provee la indicación más realista de la respuesta global de la estructura y de las demandas de componentes estructurales individuales. El análisis tiempo-historia no-lineal involucra el cálculo de la respuesta dinámica de la estructura en cada incremento de tiempo con respecto a la debida consideración dada de inelasticidad en los

elementos. Durante terremotos de magnitudes fuerte y mediana, las estructuras entran en el rango plástico, por lo que es fundamental realizar un análisis no-lineal.

A continuación, se describe de manera general y de forma matricial la ecuación del movimiento del sistema no-lineal que define la respuesta inelástica de la estructura con y sin disipadores, utilizando un registro sísmico.

***Sistema no-lineal - Estructura sin disipador***

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q + F_{NL}^R = -M \iota \ddot{x}_g \quad (3.12)$$

***Sistema no-lineal - Estructura con disipador***

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q + F_{NL}^R + F_{NL}^D = -M \iota \ddot{x}_g \quad (3.13)$$

donde,

$M$  : Matriz de masa.

$C$  : Matriz de amortiguamiento.

$K$  : Matriz de rigidez.

$\ddot{q}$  : Vector de aceleraciones.

$\dot{q}$  : Vector de velocidades.

$q$  : Vector de desplazamientos.

$F_{NL}^R$  : Vector de fuerza no-lineal en relación a las rótulas plásticas.

$F_{NL}^D$  : Vector de fuerza no-lineal en relación a los disipadores.

$\iota$  : Vector de incidencia de la acción sísmica.

$\ddot{x}_g$  : Vector de aceleración del suelo.

## **4. RESPUESTA DEL ANÁLISIS ELÁSTICO EQUIVALENTE E INELÁSTICO DE LA ESTRUCTURA 3D SIN DISIPADORES**

El análisis elástico equivalente consistió en incrementar la capacidad de los elementos en la definición de rótulas plásticas. Es decir, se incrementó los parámetros de momento y rotación de fluencia, de tal manera que no se formen rótulas plásticas en vigas y columnas. El objetivo fue obtener una respuesta elástica en la estructura, pero mediante un análisis inelástico y por eso se lo denominó “análisis elástico equivalente”, para posteriormente compararlo con la respuesta inelástica sin disipadores.

### **4.1. Variables analizadas en la respuesta**

En esta comparación se analizaron la siguientes variables:

1. Desplazamientos y derivas efectivas.
2. Rótulas plásticas y energía disipada: vigas y columnas.

### **4.2. Derivas efectivas de entrepiso**

Generalmente las derivas de entrepiso son determinadas como la diferencia entre dos desplazamientos horizontales de dos pisos cualquiera, dividida por la altura de los pisos respectivos. En este trabajo, se utilizó una definición de deriva efectiva de entrepiso. Con esta definición, se toma en cuenta que los nodos donde se determinan los desplazamientos con los cuales se obtiene la deriva, no solo se desplazan horizontalmente, sino que también rotan.

La figura 4.1 representa un vano de entrepiso, en cada nodo al desplazarse producto de una acción externa, le corresponde un desplazamiento horizontal y vertical (grados de libertad traslaciones en dirección X y Z). En base a esta consideración, se determina la deformación  $S$  proyectada a lo largo de una diagonal ficticia que se formaría al considerar los desplazamientos del nodo inferior (nodo A) y superior (nodo B). Luego, se

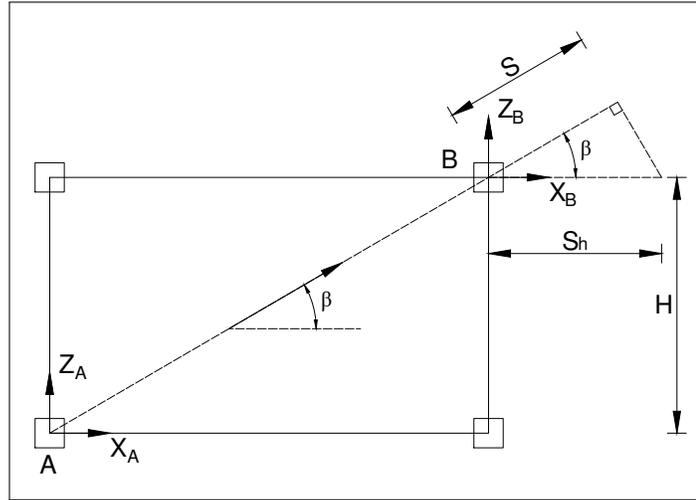


Figura 4.1. Parámetros para determinar deriva efectiva

determina la deformación  $S_h$  que representa la proyección horizontal de la deformación  $S$  considerando el ángulo de inclinación de la diagonal ficticia ( $\beta$ ). La deformación efectiva corresponde a  $S_h$ , por lo que la deriva efectiva está dada por la división de la deformación efectiva dividida para la altura  $H$  del entrepiso respectivo. A continuación, se describen las expresiones que determinan la deriva efectiva en base a la aproximación descrita.

El desplazamiento de cada nodo esta dado por:

$$\Delta_A = \begin{bmatrix} X_A \\ Z_A \end{bmatrix}$$

$$\Delta_B = \begin{bmatrix} X_B \\ Z_B \end{bmatrix}$$

Luego, el desplazamiento de cada nodo se proyecta en la dirección de la diagonal ficticia utilizando el vector unitario  $\hat{n}$  que define la dirección de la diagonal y se obtiene la deformación sobre dicha diagonal.

$$\Delta_{An} = \Delta_A^T \cdot \hat{n}$$

$$\Delta_{Bn} = \Delta_B^T \cdot \hat{n}$$

$$\hat{n} = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}$$

Posteriormente se determina la deformación  $S$ , que tendría la diagonal ficticia, y la deformación horizontal  $S_h$ , debido a que el daño que se produce en el pórtico depende de la proyección horizontal.

$$S = \Delta_{Bn} - \Delta_{An}$$

$$S_h = \frac{S}{\cos \beta}$$

Y la deriva efectiva de entrepiso finalmente es:

$$\Delta_{eff} = \frac{S_h}{H} \quad (4.1)$$

Este procedimiento se lo realiza en cada instante de tiempo, en base a los desplazamientos traslacionales en dirección global X y Z, que se obtienen del análisis tiempo-historia no-lineal.

### 4.3. Energía disipada

La energía disipada tanto en las vigas fue determinada como el área encerrada en la histéresis definida por el momento vs la rotación plástica originada por la formación de rótulas plásticas. Es importante mencionar que, el software solo proporciona la rotación plástica y no la rotación total.

#### 4.4. Resultados - dirección X (lado corto)

En la comparación, los resultados del análisis elástico equivalente son identificados con las siglas *Eeq*. Mientras que, los del análisis inelástico sin disipadores con las siglas *SD*. Se presentaron las respuestas a nivel de valores máximos por piso, y en algunos casos en función del tiempo.

##### 4.4.1. Desplazamientos y derivas efectivas

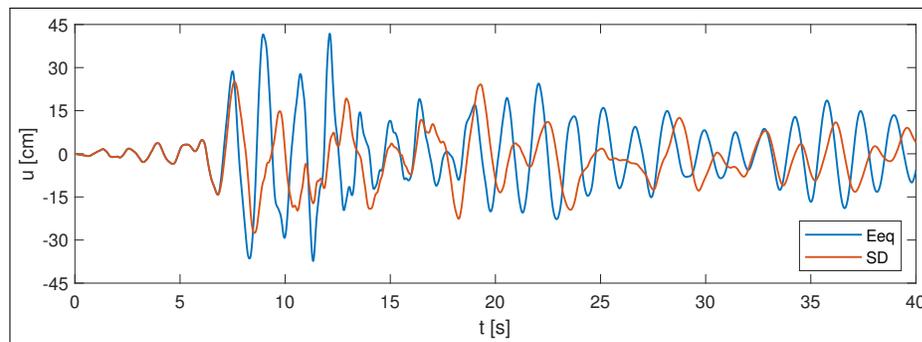


Figura 4.2. Desplazamiento - Piso 10

Con la incursión de la estructura en el rango inelástico, se produjo una reducción de desplazamientos y por ende una reducción de las derivas efectivas (figuras 4.2 y 4.3(a)). En base a esto uno se preguntaría, si la estructura se flexibilizó, entonces los desplazamientos deberían ser mayores. Sin embargo, con este análisis se logró ver que al ser el desplazamiento y deriva menores, hubo disipación de energía, misma que se produjo por la formación de rótulas plásticas en las vigas y columnas, y eso se traduce en daño sobre dichos elementos.

##### 4.4.2. Rótulas plásticas y energía disipada: vigas y columnas

La comparación entre el análisis elástico equivalente vs el análisis inelástico sin disipadores nos permitió comprender lo que implica que una estructura tenga un comportamiento elástico e inelástico. Es decir, no solo evaluar la respuesta a nivel de derivas de

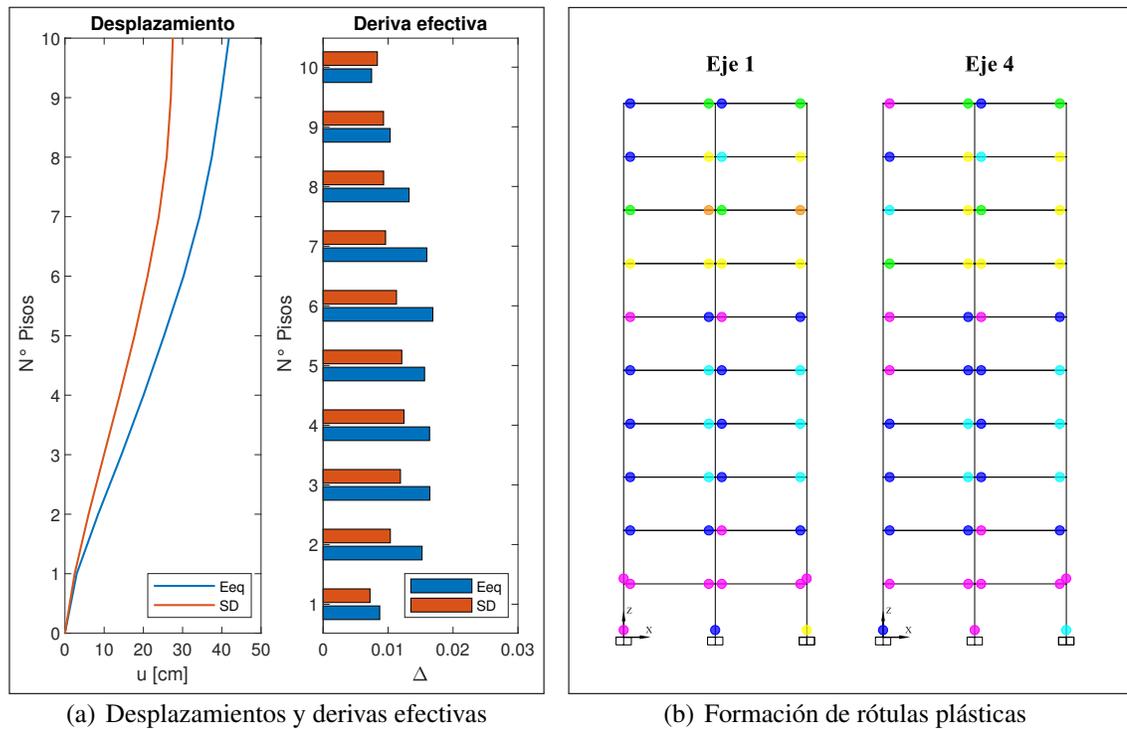


Figura 4.3. Desplazamientos, derivas efectivas, y formación de rótulas plásticas

entrepiso, sino ir un poco más a detalle y evaluar el daño a nivel más local. El que se formen rótulas plásticas en los elementos estructurales conlleva a que la estructura tenga un comportamiento dúctil. Por lo que, a través de los elementos se disipa parte de la energía que entra a la estructura. Esta disipación se traduce en daño sobre los mismos, daños que son necesarios tener en cuenta por que de ellos depende que una estructura pueda llegar a un colapso parcial o total.

La figura 4.3(b) muestra la formación de rótulas plásticas en los ejes 1 y 4 de la estructura en dirección corta, en la cual se observó que todas las vigas incursionaron en el rango inelástico. Las vigas de los pisos 7-10 presentaron mayores niveles de daño en comparación con las vigas de los pisos 1-6, de acuerdo a los parámetros de rotaciones definidas en el apartado 3.5.3. Las columnas también presentaron incursión inelástica, formándose rótulas plásticas en la base de las columnas del primer y segundo piso.

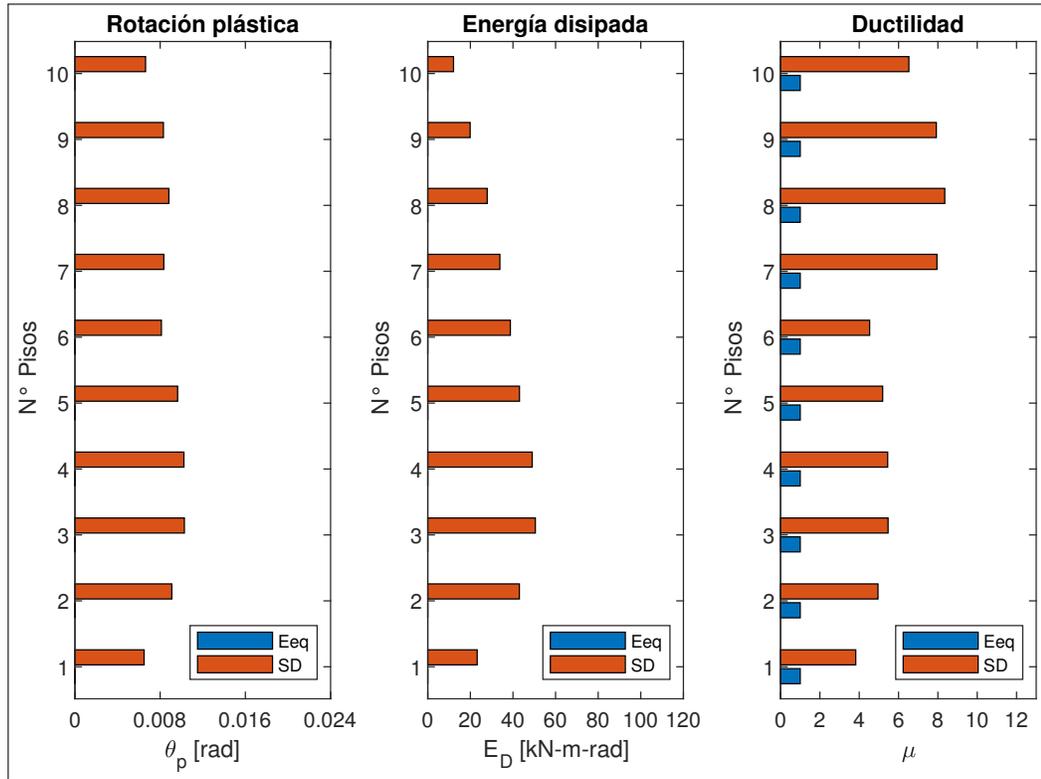


Figura 4.4. Rotación plástica, energía disipada y ductilidad - vigas

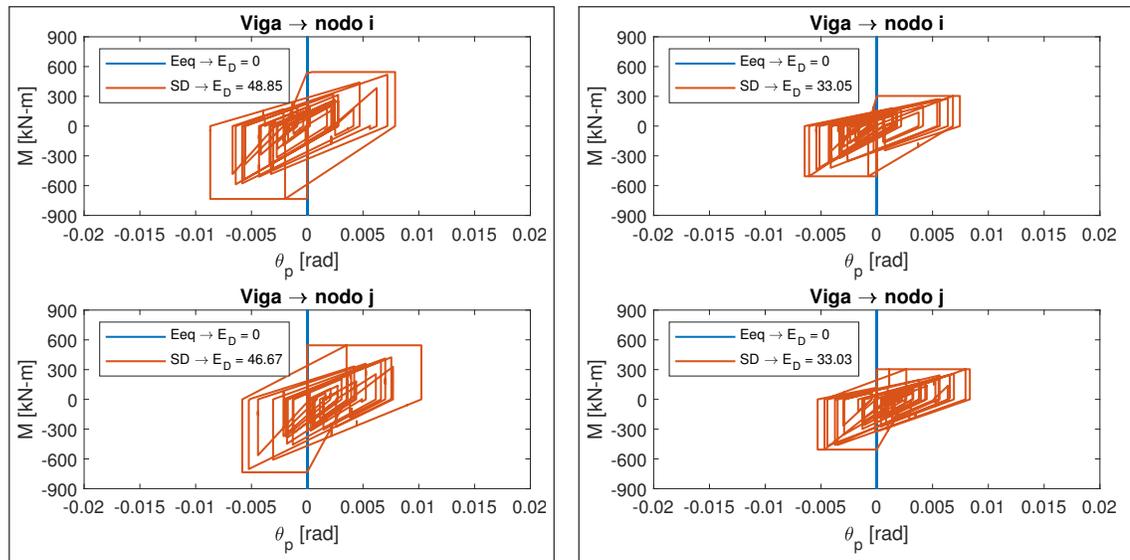


Figura 4.5. Momento vs rotación plástica y energía disipada - vigas

En la figura 4.4 se observa las rotaciones plásticas máximas, energía disipada y ductilidad de vigas en función de las mismas por piso. Dicha figura muestra que las rotaciones plásticas en todos los pisos no difieren grandemente. Esto implicó que la ductilidad local de las vigas de los pisos 7-10 sean mayores en comparación con las vigas de los pisos 1-6. Por ejemplo, los valores máximos de ductilidad local para los pisos 1-6 estuvieron entre 5 y 6. Mientras que, para los pisos 7-10 estuvieron entre 8 y 9, debido a que las mismas poseen menor cuantía de acero. Con respecto a la disipación de energía fue en los pisos 2, 3, 4 y 5, donde hubo mayor energía disipada, presentándose valores sobre los  $40 \text{ kN} - \text{m} - \text{rad}$ . La figura 4.5 muestra el ciclo histerético momento - rotación en las vigas de los pisos 4 y 7, en el cual se ve claramente la energía disipada por la acumulación de deformaciones (rotaciones) inelásticas repetitivas.

En las columnas como la plasticidad es bidimensional una mejor forma de evaluar si una columna incursiona o no en el rango inelástico es observar el diagrama de interacción nominal vs el momento y la fuerza axial de la demanda, por efecto de las fuerzas externas. La figura 4.6 muestra como se superó los límites de fluencia en la base de la columna del piso 1 y del piso 2 respectivamente. Mientras que, en la parte superior de las columnas (nodo j) de ambos pisos la relación momento-fuerza axial estuvieron dentro de los límites del diagrama de interacción de fluencia.

En concordancia con lo señalado en el párrafo anterior, la figura 4.7(a) muestra la disipación energía producida en la base de la columna, lo cual no sucede en la parte superior. Así mismo, algo similar se produce en el piso 2 (figura 4.7(b)) en la cual se produjo una disipación de energía muy mínima en la base de la columna.

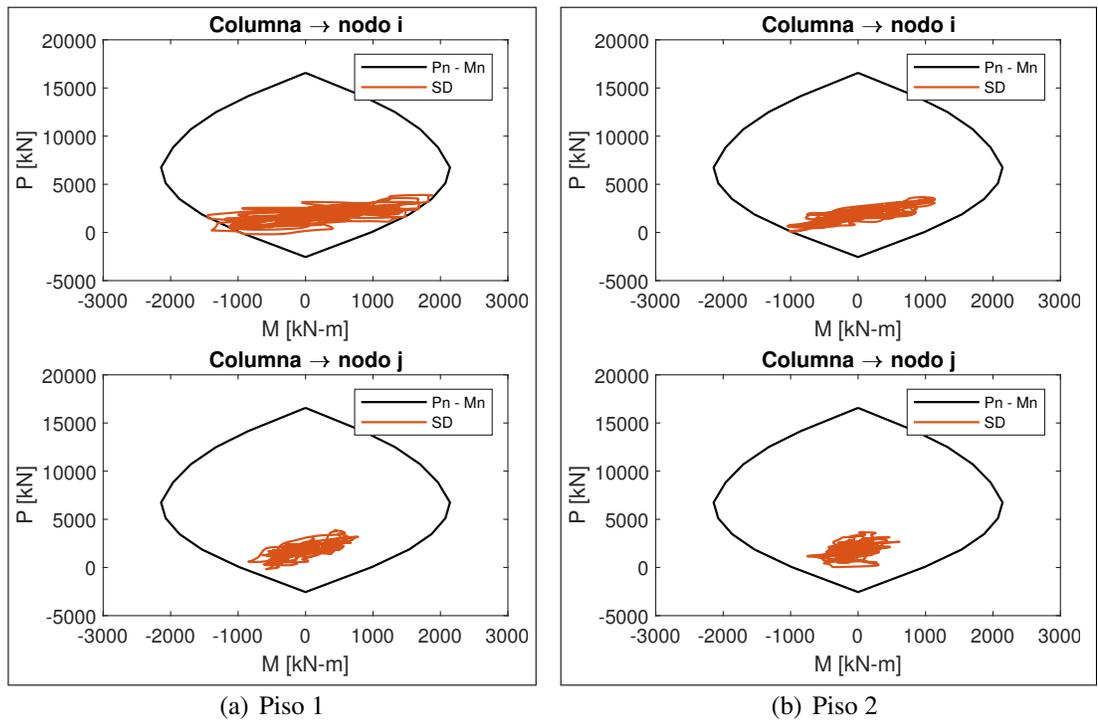


Figura 4.6. Curva de interacción - columnas

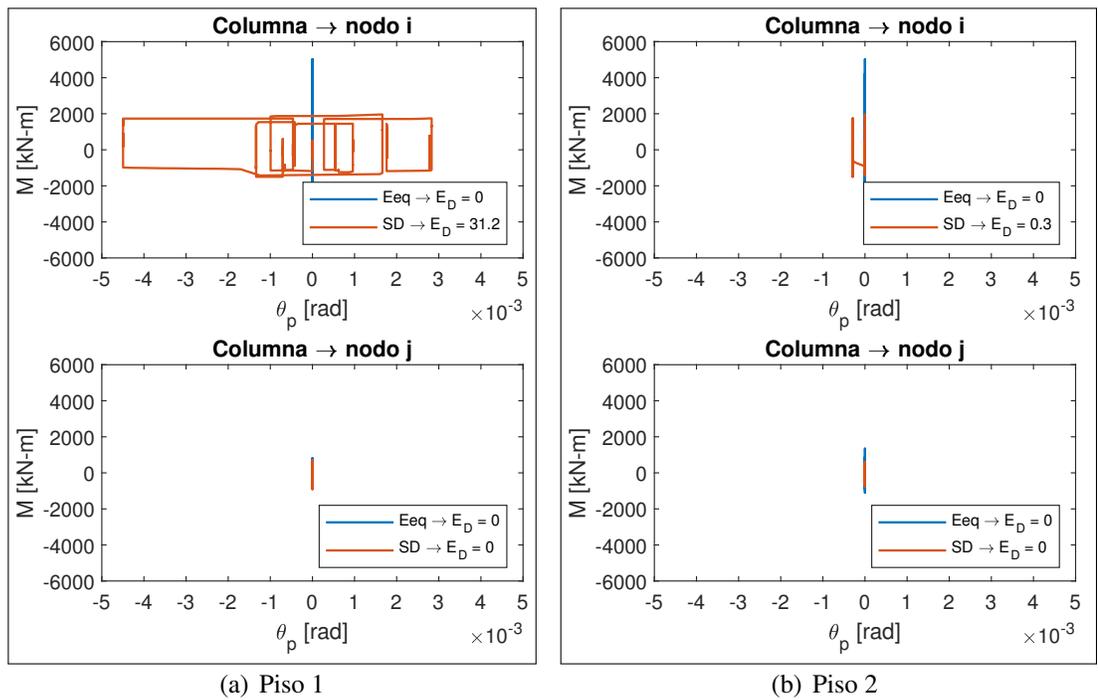


Figura 4.7. Momento vs rotación plástica y energía disipada - columnas

## **5. RESPUESTA DEL ANÁLISIS INELÁSTICO DE LA ESTRUCTURA 3D CON Y SIN DISIPADORES**

El objetivo es evaluar la respuesta inelástica de la estructura sin disipadores y posteriormente con disipadores en base a la propuesta: disipadores metálicos mediante muros de albañilería confinada dilatada (ACD). Estos análisis nos permitieron realizar una comparación y observar el efecto que tendrían los disipadores sobre la estructura, considerando dos limitantes: *i*) capacidad limitada de los disipadores debido a la resistencia al corte de los muros de albañilería, y *ii*) uso limitado de planos resistentes desde el punto de vista arquitectónico y económico para agregar reforzamiento a la estructura mediante disipadores de energía.

Los disipadores de energía fueron incorporados en la estructura bajo dos alternativas y sobre cuatro planos resistentes en la dirección corta, es decir los ejes 1, 4, 5 y 8.

- a. Disipadores en todos los pisos con capacidad uniforme.
- b. Disipadores en todos los pisos con capacidades variables.

Al ser una estructura idealizada, el eje 1 es igual al eje 8, y se ubicó disipación sobre ambos vanos (planos resistentes externos). El eje 4 es igual al eje 5, y se ubicó disipación sobre el vano derecho (planos resistentes internos donde se consideró que estarán los ascensores).

### **5.1. Variables analizadas en la respuesta**

En esta comparación se analizaron las siguientes variables:

1. Desplazamientos y derivas efectivas.
2. Reducción y/o aumento de formación de rótulas plásticas por efecto de los disipadores.
3. Rótulas plásticas y energía disipada: vigas y columnas.

## 5.2. Resultados en dirección X (lado corto)

En la comparación, los resultados del análisis inelástico sin disipadores son identificados con las siglas **SD**. Mientras que, los del análisis inelástico con disipadores con capacidad uniforme con las siglas **CD-u**, y con capacidad variable con las siglas **CD-v**. Se presentaron las respuestas a nivel de valores máximos por piso, y en algunos casos en función del tiempo.

Como se mencionó en el apartado 3.6 en cada muro se ubicó dos disipadores. Para el caso de los disipadores con capacidad uniforme, se dispuso disipadores con fuerza de fluencia de  $200\text{ kN}$  cada uno (Capacidad 2). De modo que, en cada muro se tiene una fuerza total de  $400\text{ kN}$ . Para el caso de los disipadores con capacidad variable, lo que se fue variando fue la fuerza de fluencia, a fin de optimizar los disipadores en altura. Todo esto con el objetivo de lograr la mayor reducción de rotaciones plásticas, tanto en vigas como en columnas. Se realizó varios análisis tomando en cuenta distintas disposiciones y capacidades en los disipadores. Los resultados se presentan con la alternativa que se consideró más óptima. Dicha alternativa consiste en incorporar disipadores con fuerza de fluencia de  $100\text{ kN}$  para los pisos 1, 5, 6, 9 y 10 (Capacidad 1), y disipadores con fuerza de fluencia de  $200\text{ kN}$  para los pisos 2, 3, 4, 7 y 8 (Capacidad 2).

### 5.2.1. Desplazamientos y derivas efectivas

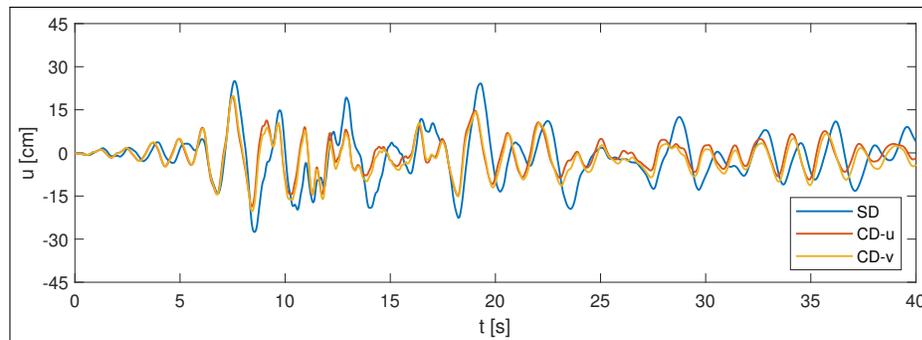


Figura 5.1. Desplazamiento - Piso 10

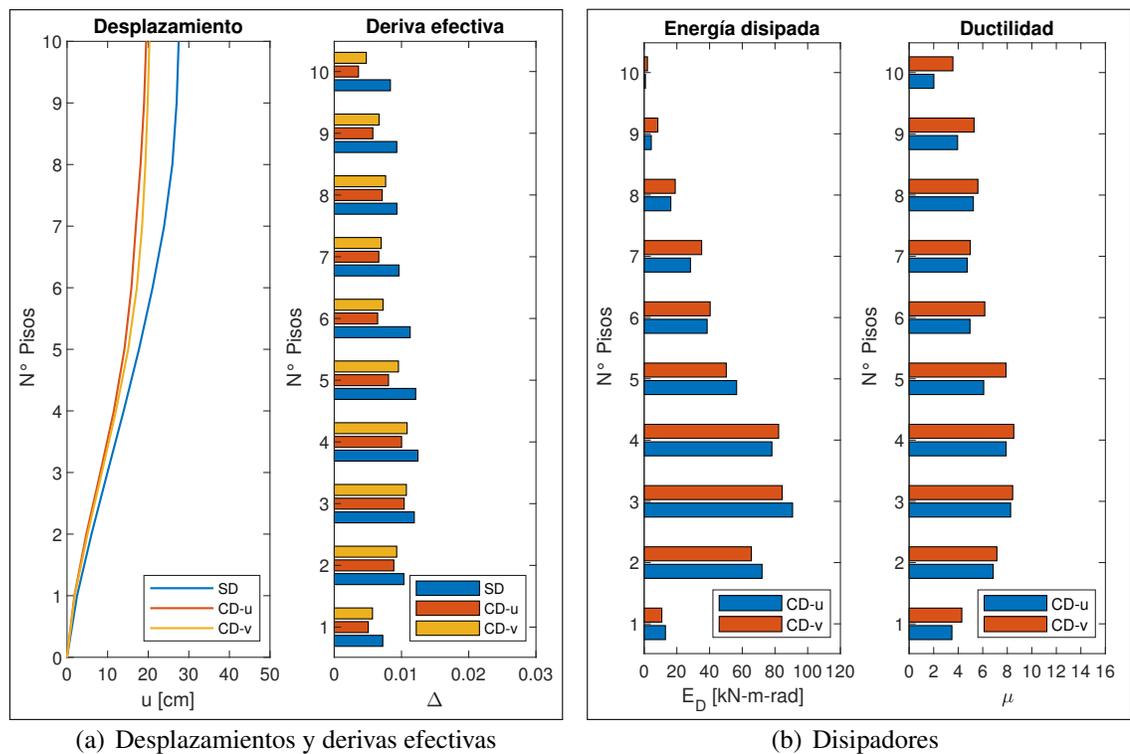


Figura 5.2. Desplazamientos, derivas efectivas, y disipadores

Al incorporar disipadores sobre la estructura, hubo una reducción de desplazamientos y por ende reducción de las derivas efectivas, que era lo que se esperaba. Ahora bien, como el objetivo es optimizar la colocación de los disipadores. En definitiva, al comparar la respuesta considerando capacidad uniforme vs capacidad variable, se obtuvo que con menor capacidad de disipación se tiene resultados muy similares como se logra observar en las figuras 5.1 y 5.2(a). Además, se logra que los disipadores tengan mayores demandas, es decir utilizar la mayor capacidad posible de los disipadores como se muestra en la figura 5.2(b).

### 5.2.2. Reducción y/o aumento de formación de rótulas plásticas por efecto de los disipadores

En la figura 5.3 se denota claramente la reducción de daño en las vigas, tanto cuando se coloca disipadores con capacidad uniforme, como capacidad variable e incluso la no

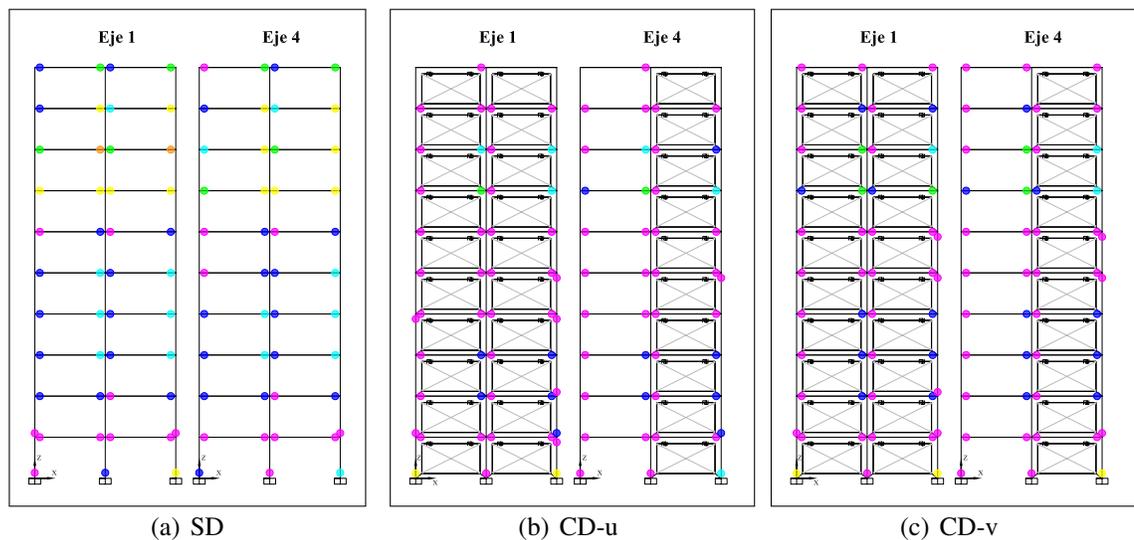


Figura 5.3. Formación de rótulas plásticas en vigas y columnas

formación de rótulas plásticas. Mientras que, en otras vigas se mantiene el mismo nivel de daño, existiendo mayor reducción en la alternativa (CD-u) de acuerdo a los parámetros de rotaciones definidos en el apartado 3.5.3. Con respecto a las columnas se presentaron 3 situaciones. En algunas columnas se mantuvo el mismo nivel de daño (piso 1), en otras hubo incremento (pisos 3, 4, 5, y 6) y en otras disminución (piso 2). En consecuencia, se podría decir que el efecto de los disipadores sobre las columnas de una u otra manera está relacionado o depende de la capacidad de los disipadores y de su distribución. Además, sin olvidar que al colocar disipación se genera incremento de la carga axial, lo cual también podría estar causando los efectos mencionados.

### 5.2.3. Rótulas plásticas y energía disipada: vigas y columnas

En la figura 5.4 se observa las rotaciones plásticas máximas, energía disipada y ductilidad de vigas en función de las mismas por piso. Dicha figura muestra que las rotaciones plásticas en todos los pisos no difieren grandemente, al considerar disipadores con capacidad uniforme vs capacidad variable. Sin embargo, si se observa la reducción que se produce en comparación con no colocar disipadores. No obstante, es importante resaltar que se logró resultados similares considerando menor cantidad de disipación en toda la

estructura. Puesto que, con disipadores uniformes se tiene una capacidad total de disipación de  $24000 \text{ kN}$ . Mientras que, con capacidad variable, se tiene una capacidad total de disipación de  $18000 \text{ kN}$ , es decir un 25% menor.

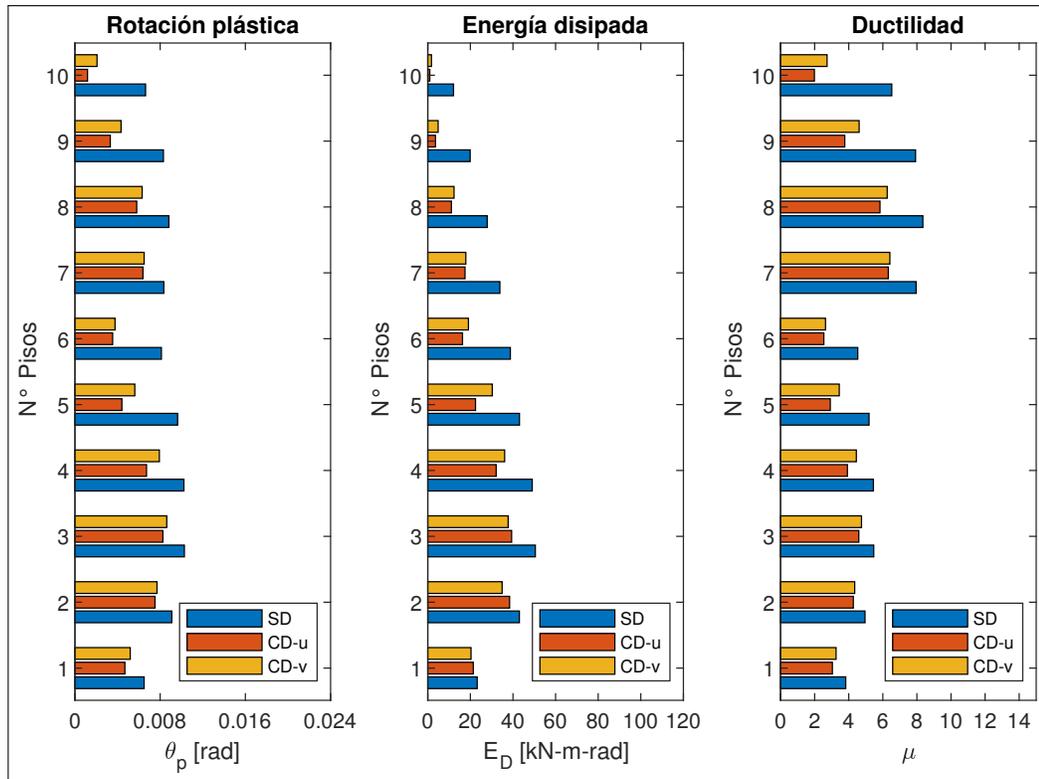


Figura 5.4. Rotación plástica, energía disipada y ductilidad - vigas

Además, la reducción de las rotaciones plásticas a incorporar disipación dio como resultado la reducción de ductilidad local en las vigas. Por ejemplo, para el caso de los pisos 1-6 los valores máximos estuvieron entre 4 y 5 vs sin disipación que estuvieron entre 5 y 6. Mientras que, para los pisos 7-10 estuvieron entre 8 y 9 vs con disipación que se obtuvo valores entre 6 y 7. En definitiva, a pesar de haber limitaciones en cuanto a capacidad de disipadores y planos resistentes para la instalación de los mismos, se logró reducción en el nivel de daño principalmente en las vigas, y en algunos casos en columnas. En relación a la energía disipada, fue en los pisos superiores donde hubo mayor disipación absorbida por los disipadores y siendo menor en los pisos superiores. Esta afirmación se refleja con la reducción de ductilidades mencionadas. En la figura 5.5 se muestra el ciclo

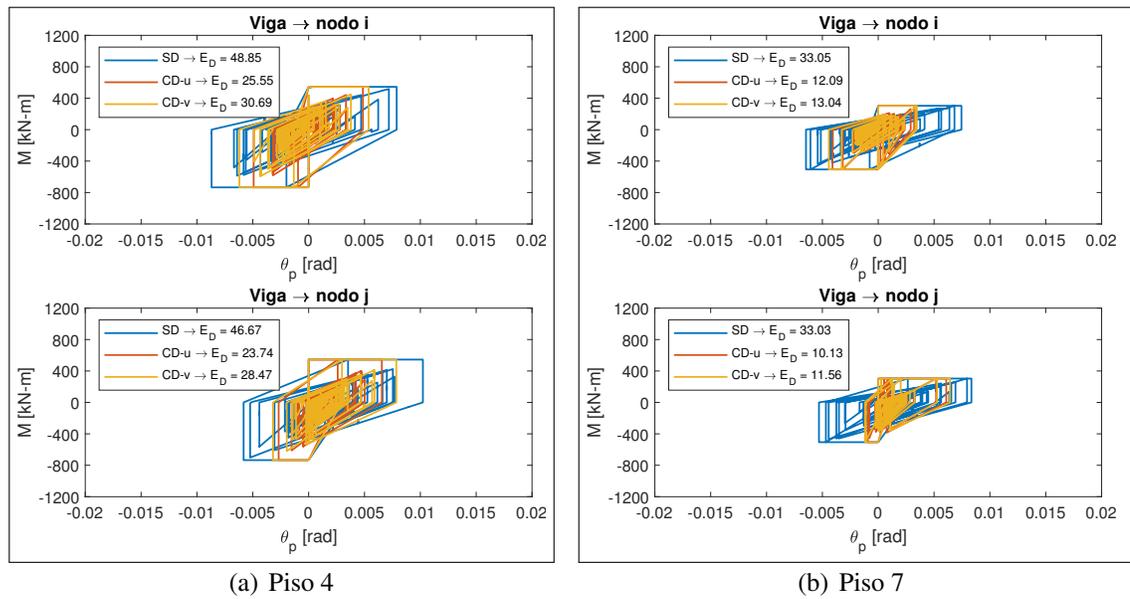


Figura 5.5. Momento vs rotación plástica y energía disipada - vigas

histerético momento - rotación en las vigas de los pisos 4 y 7, en el cual se ve claramente como disminuyó la energía disipada en las vigas al incorporarse disipadores. Por ejemplo, en el piso 7, las mayores reducciones superaron el 50%.

Con respecto a las columnas, en la figura 5.6(a) se observa como el daño se mantiene en la base de la columna del piso 1, en comparación con la estructura sin disipación. Esto sucede tanto cuando se ubicó disipadores con capacidad uniforme y variable. Mientras que, en el piso 5 se presentó un ligero incremento con la alternativa *CD-u* en la parte superior de la columna y manteniéndose elástica la base de la columna del piso en mención como se indica en la figura 5.6(b).

La figura 5.7(a) muestra el ciclo histerético momento-rotación del piso 1, en el cual se logró ver que para los tres casos se disipa energía en la base de la columna, siendo ligeramente menor cuando se tiene disipadores con capacidad variable *CD-v*. Por otra parte, en la figura 5.7(b) se observa que en el piso 5 con capacidad variable de los disipadores no se produce disipación de energía. Puesto que, la columna no presentó deformaciones

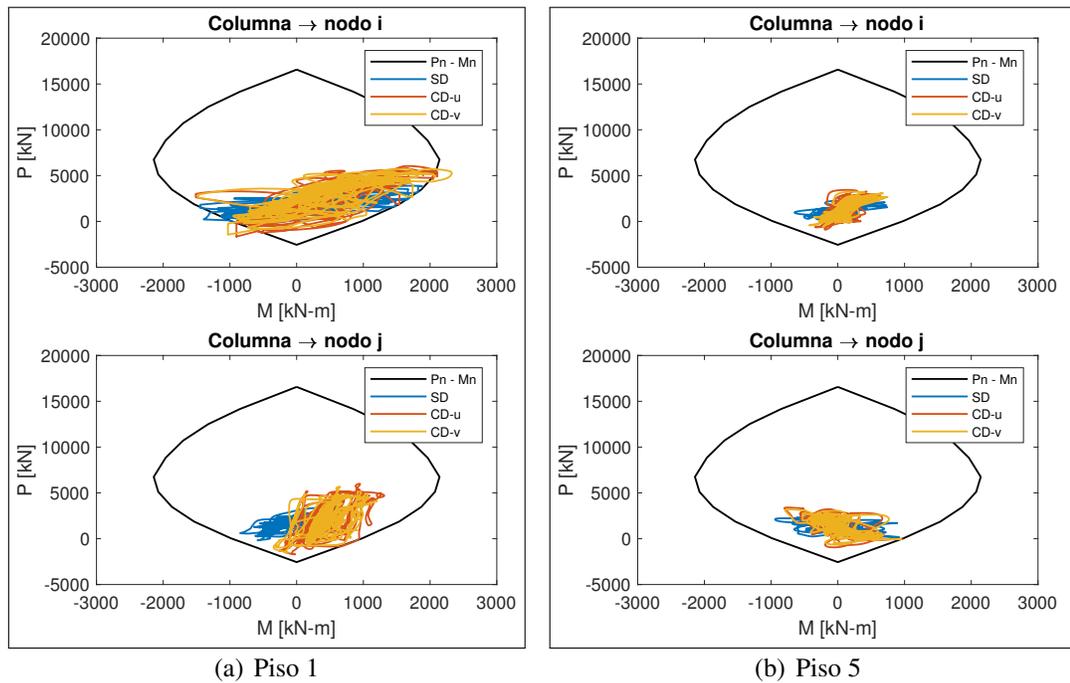


Figura 5.6. Curva de interacción - columnas

inelásticas ni en la base ni en la parte de superior, lo cual está en concordancia con lo indicado en el párrafo anterior.

Finalmente, en la figura 5.8 se indica los porcentajes de reducción alcanzados con las dos alternativas de distribución de disipadores en cuanto a derivas efectivas, rotación plástica y energía disipada en las vigas. Todo esto como consecuencia de aplicar la propuesta presentada y evaluada, en la cual se limita la capacidad de los disipadores. Además, considerando también un escenario más restrictivo (más realista) limitándose a incorporar disipación únicamente en 4 planos resistentes. Dos exteriores en los cuales la disipación fue colocada en ambos vanos, mientras que en los dos planos interiores únicamente se instaló disipación en un vano. La razón de considerar estos planos resistentes, es porque generalmente por razones térmicas y acústicas en los planos exteriores las paredes suelen ser más robustas y las zonas de ascensores suele estar rodeada de un muro.

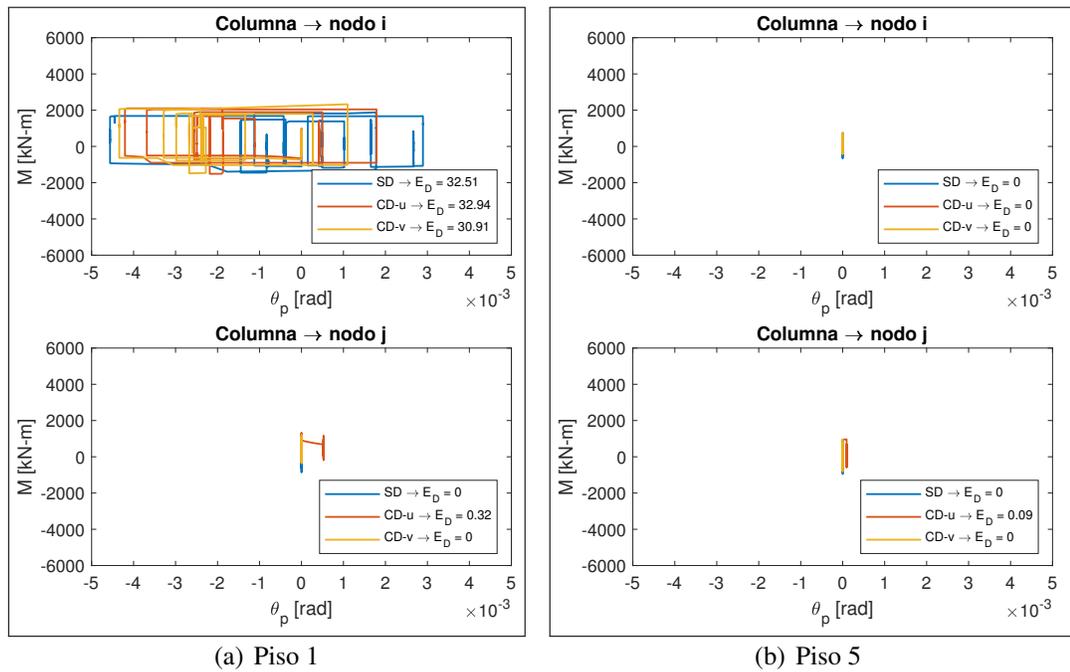


Figura 5.7. Momento vs rotación plástica y energía disipada - columnas

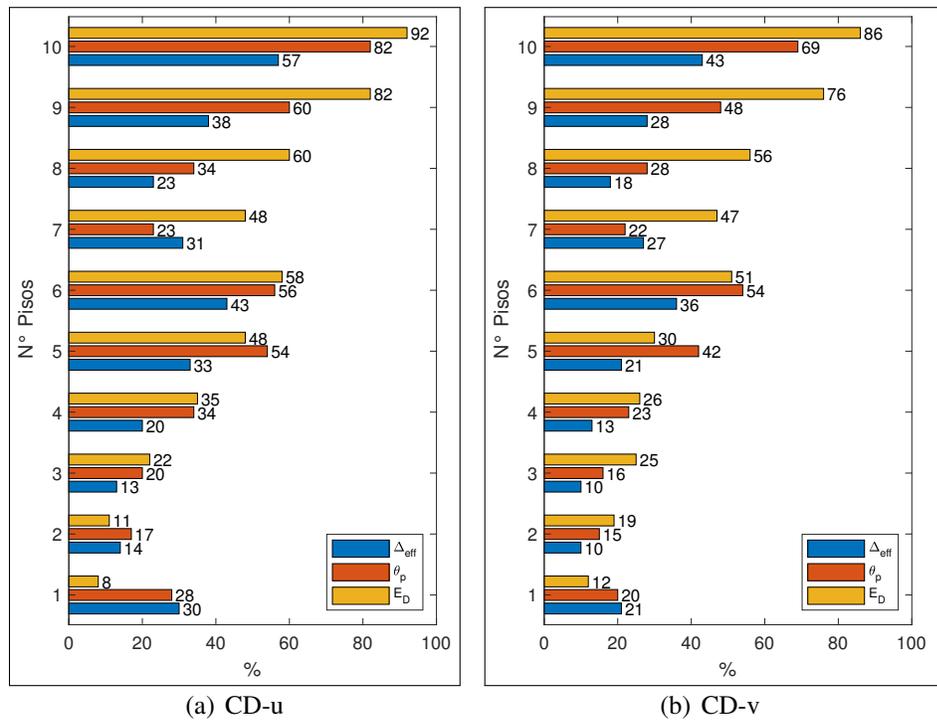


Figura 5.8. Porcentaje de reducción de derivas efectivas, rotación plástica y energía disipada en vigas al incorporar disipación

## 6. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

### 6.1. Conclusiones

De esta investigación se obtiene las siguientes conclusiones:

- La respuesta del modelo simplificado con muros de albañilería dilatados en base a la propuesta estudiada sin considerar los disipadores es muy similar a la respuesta del modelo sin muros. Por otra parte, se observó que al considerar los muros dilatados se minimiza la interferencia entre la ADC y los elementos del pórtico que la circunscriben. Así mismo, al incluir los disipadores considerando una capacidad limitada, se garantiza que a los muros no se les transfiera mayor fuerza que la proporcionada por los disipadores una vez que se activen. Con esta limitación es posible considerar que los muros permanezcan elásticos o que no sufran daños severos.
- Las tensiones máximas se concentraron en el apoyo del muro, con la unión viga-columna y en la posición de los disipadores sobre el muro (uno o varios), siendo mayores en la unión viga-columna. Por otra parte, la concentración de tensiones no presentó cambios considerables al considerar 2, 3 y 5 disipadores. Por ello, se utilizó dos disipadores por muro. El análisis se realizó sobre muros llenos. No obstante, es posible considerar también muros con aberturas. Si bien es cierto que, las aberturas generan una reducción de rigidez, sin embargo, esta sigue siendo alta como para permitir concentrar las deformaciones en los disipadores que es lo que se buscó en la propuesta presentada. No hay que olvidar que con muros llenos se tiene concentración de tensiones, lo cual se incrementa en el caso de existir aberturas. Por lo que, sería necesario reforzar dichas zonas para atenuar la concentración de tensiones.

- Fue posible obtener una aproximación aceptable en la respuesta, al modelar los muros con elementos shell y con diagonales equivalentes, siempre que se considere que los muros permanecen elásticos o con daños mínimos. En definitiva, para ambos casos se logró concentrar las deformaciones en los disipadores.
- Se logró reducción del nivel de daño, principalmente en vigas y en algunos casos en columnas, aun considerando restricciones tanto en la capacidad de los disipadores, como en la intervención de planos resistentes.
- Con una adecuada distribución de la capacidad de los disipadores en altura, es decir utilizando menor cantidad de disipación, se obtiene similar reducción de daño en las vigas que considerando mayor cantidad de disipación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en columnas el daño puede reducirse, incrementarse o mantenerse de forma similar.

## **6.2. Investigación futura**

El efecto de dilatar los muros de albañilería confinada de la estructura principal y que estos estén únicamente apoyados sobre la unión viga-columna fue analizado en esta tesis utilizando modelos numéricos no tan sofisticados. Es decir, se adoptaron varias simplificaciones en cuanto modelamiento del muro y sus propiedades, como a la definición de las rótulas plásticas. Para estudios futuros se podría realizar un ensayo experimental. Esto permitiría conocer de forma más realista el comportamiento del muro de albañilería confinada y su interacción con la estructura principal al incorporar disipadores sometido a una acción sísmica. Al observar que es posible reducir las rotaciones en las vigas y en algunos casos en columnas, sería interesante analizar los tipos de fallas que podrían presentarse en el muro al estar dilatados en base a la propuesta numérica estudiada. Además, se podrían analizar muros con diferente geometría y aplicar la propuesta estudiada en estructuras más irregulares y con varios registros sísmicos.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, R., Rodríguez, M., y Mora, D. (2016). *Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Aguilar, V. (2013). *Estimación de la resistencia al corte de muros de albañilería armada. Estudio comparativo y uso de redes neuronales artificiales* [Tesis de Grado, Universidad Austral de Chile].

Almazán J. L. (2019), Apuntes del Curso “ICE3723 Dinámica de Estructuras”, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

American Concrete Institute, ACI 318-19. (2019). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19) y Comentario de Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318R-19)*. U.S.A.

American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 41-13. (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia.

Astroza, M., y Schmidt, A. (2004). Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño. *Revista de Ingeniería Sísmica*, N°.70, 59-75.

Bozzo, L. M., y Gaxiola, G. (2015, Noviembre 25-28). *El concepto “rigido-flexible-ductil” y las conexiones SLB* [Presentación de Congreso]. XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, México. <https://www.academia.edu/30347209>

Butenweg, Ch., y Marinković, M. (2018). Damage reduction system for masonry infill walls under seismic loading. *Ernst & Sohn. A Wiley Brand*, 2:267–273. <https://doi.org/10.1002/cepa.863>

Calderón, S., Vargas, L., Sandoval, C., y Araya-Letelier, G. (2020). Behavior of Partially Grouted Concrete Masonry Walls under Quasi-Static Cyclic Lateral Loading. *Materials*, 13(10), 2424; <https://doi.org/10.3390/ma13102424>

Caltrans. (2013). *Seismic design criteria (Inf. Téc.)*. California Department of Transportation, Sacramento, California.

Carrillo, C. (2008). *Comparación de la respuesta sísmica incorporando y desacoplando la mampostería y técnicas de reforzamiento*. [Tesis de Grado, Escuela Politécnica del Ejército].

Constantinou, M. C., Soong, T. T., y Dargush, G. F. (1998). *Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit*. State University of New York at Buffalo, CA: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.

Corporación de desarrollo tecnológico. (2012). *Protección Sísmica de Estructuras*. Santiago, Chile.

Crisafulli, F. J., Carr, A. J., y Park, R. (2000). Analytical modelling of infilled frame structures - A general review. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 33 (N°1).

Chopra, A. K. (2014). *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering* (4rd Edition). Prentice Hall.

Federal Emergency Management Agency, FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, DC.

Hube, M. (2019), Apuntes del Curso “ICE3413 Hormigón Armado Avanzado”, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Marinković, M., y Butenweg, Ch. (2019). Innovative decoupling system for the seismic protection of masonry infill walls in reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109435>

Marinković, M., Flores, S., y Butenweg, Ch. (2020). Numerical analysis of reinforced concrete frame buildings with decoupled infill walls. *Building Materials and Structures*, 63(4), 13-48. DOI:10.5937/GRMK2004013M

MATLAB. © 1994-2019. The MathWorks, Inc.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2019). *Manual para la Regulación de Procesos Constructivos: Enfoque en Construcciones Sismorresistentes* (1er edición). Quito, Ecuador.

Moreschi, L. M., y Singh, M. P. (2003). Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32:1291–1311. <https://doi.org/10.1002/eqe.275>

Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC. (2015). *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*.

Ogaz, O., Astroza, M., y Sierra, G. (2005). Cyclic tests of concrete masonry walls with reduced quantity of reinforcement. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 20 (Nº.3), 159-170.

Paulay, T., y Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. Jhon Wiley & Sons, Inc.

Ramírez, P., Sandoval, C., y Almazán, J. L. (2016). Experimental study on in-plane cyclic response of partially grouted reinforced concrete masonry shear walls. *Engineering Structures*, 126, 598-617. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.010>

Rao, R. S., Gergely, P., y White, R. N. (1995). *Retrofit of Non-Ductile Reinforced Concrete Frames Using Friction Dampers (Tech. Rep.)*. State University of New York at Buffalo, CA: National Center for Earthquake Engineering Research.

Rodríguez, S. (2015). Moment-curvature diagrams for reinforced concrete sections. Sectional ductility ratio calculation. Applications related to section study using matlab (part II). *Anales de Edificación*, Vol. 1, 27-41. doi:10.20868/ade.2015.3101

SAP2000. © 2017. Computers & Structures, Inc (v19.2.1). Structural and Earthquake Engineering Software.

Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., y McNamara, R. J. (2008). Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments. *Journal of Structural Engineering*, 134. [https://DOI:10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3))

Tarque, N., Candido, L., Camata, G., y Spacone, E. (2015). Masonry infilled frame structures: state-of-the-art review of numerical modelling. *Earthquakes and Structures*, Vol. 8 (No. 1), 733-759. <https://DOI:10.12989/eas.2015.8.3.733>

Wijaya, H., Rajeev, P., Gad, E., y Amirsardari, A. (2020). Effect of Infill-Wall Material Types and Modeling Techniques on the Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings. *Natural Hazards Review*, 21(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000395](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000395)