

Diseño óptimo de disipadores metálicos en un edificio de acero de 28 pisos

E. Pincheira¹, N. Maureira², F. Sanhueza³

RESUMEN

Los edificios estructurados en base a marcos no arriostrados suelen ser muy flexibles, por lo que los sismos severos inducen grandes desplazamientos laterales en ellos. Esto hace necesario proyectar elementos muy robustos o incluir núcleos de muros para restringir este desplazamiento.

Según la NCh433, la demanda sísmica se reduce con el aumento de los períodos naturales de una estructura. En edificios de mediana altura, con período fundamental entre 1,5-2,5s, la acción sísmica todavía no es suficientemente baja. Esto hace que el control de la demanda de desplazamientos laterales, tensiones internas y corte basal sea un desafío para los ingenieros estructurales. Una manera de reducir la demanda sísmica en los elementos estructurales de un edificio es añadir disipación de energía localizada. Debido a lo anterior, se propone en esta investigación el uso de disipadores metálicos para reducir la respuesta sísmica de un edificio.

Se propone una metodología de diseño que permite realizar una distribución en planta y en altura de las capacidades relativas de los disipadores. Como ejemplo de diseño, se consideró un edificio ubicado en el centro de la ciudad de Concepción con planta trapezoidal y 28 pisos de altura. Se realizó un análisis sísmico tiempo-historia no lineal en las dos direcciones horizontales, variando la capacidad de disipación total utilizada en el edificio. La disipación requerida se determinó considerando la reducción de tres respuestas objetivo diferentes: drif de piso, aceleración absoluta de piso y corte basal.

A partir de los resultados del análisis se determinó que la adición de disipadores metálicos tiene una ligera influencia en la aceleración máxima de piso. Sin embargo, estos son eficaces en la reducción de drif máximo y corte basal. Se determinó que existe una cantidad óptima de disipación que minimiza los drifs. El corte mostró una reducción casi monótona con el aumento de la cantidad de disipación añadida.

PALABRAS CLAVES: Disipadores metálicos; reducción de corte basal; reducción óptima de drifs.

ABSTRACT

Buildings structured on non-braced frames are often very flexible, so the earthquake induces large lateral displacements on them. This makes to be necessary to design very robust elements or to include cores of walls to restrict these displacement.

According NCh433, seismic demand is reduced with the increasing in the natural periods of a structure. In mid-rise buildings, with a fundamental period between 1,5-2,5s, seismic demand is still not sufficiently low. This makes the control of the demand of lateral displacements, internal stresses and base shear to be a challenge for the structural engineers. One way to reduce seismic demand in the structural elements of a building is to add localized energy dissipation. Due to the above, it is proposed in this research the use of methalic dissipators to reduce the seismic response of a building.

A design methodology that allows to realize a distribution in plan and in height of the relative capacities of the dissipators is proposed. As an example of design, a building located at the center town of Concepción with

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, enpincheira@ing.ucsc.cl

² Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

³ Profesor Auxiliar Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, franksanhueza@ucsc.cl

trapezoidal plant and 28 floors high was considered. A time-history analysis was performed in the two horizontal directions, varying the total dissipation capacity used in the building. The optimum dissipation was determined considering the reduction of three different objective responses: floor drifts, absolute floor acceleration and base shear.

From the results of the analysis it was determined that the addition of methalic dissipators has slight influence on the maximum acceleration of floors. However, these are effective in reducing the maximum drifts and base shear. It was determined that there is an optimum dissipation amount that minimizes drifts. The base shear showed almost monotonous reduction with the increase in the amount of dissipation added.

KEYWORDS: Methalic dissipators; reduction on base shear; optimal drif response.

INTRODUCCIÓN

En Chile los edificios de gran altura son estructurados para poder resistir las cargas de diseño sin superar los desplazamientos admisibles, de acuerdo a la NCh433. Esto conllevaría a un diseño seguro, del cual en la práctica resultan elementos estructurales como vigas, columnas o muros de grandes dimensiones. Estos edificios resultan ser comúnmente robustos, con gran densidad de muros. Por las exigencias de diseño anteriores, en los edificios chilenos estructurados en base a marcos flexibles, los calculistas suelen tener dificultades en el cumplimiento de los desplazamientos admisibles. Lo anterior hace que este tipo de estructuración no sea la más usada en edificios de moderada a baja altura.

En esta investigación se estudia el uso de disipadores metálicos como medio para reducir los desplazamientos y esfuerzos en elementos estructurales de un edificio de marcos flexibles con núcleo de muros. Este tipo de edificio se caracteriza por su relativamente baja rigidez lateral [4].

El uso de disipadores de energía no siempre reduce la respuesta estructural, ya sea desplazamientos o esfuerzos internos en la estructura. Una excesiva cantidad de disipación puede incrementar significativamente la rigidez equivalente de la estructura [6]. Lo anterior tiene por consecuencia que los períodos naturales cambien y se desplacen a una zona de mayor potencia espectral del input, incrementando la demanda sísmica. Por otra parte, una cantidad muy baja de disipación, podría tener un efecto despreciable en la reducción de la respuesta estructural. Los elementos de disipación localizada deben estar ubicados en lugares estratégicos donde generen la mayor reducción de la respuesta estructural [7] con el menor incremento en la capacidad de disipación agregada, sin producir efectos perjudiciales. Por lo anterior, se propone en esta investigación una metodología de diseño óptimo de disipadores metálicos para la reducción eficiente de la respuesta estructural.

Un ejemplo real de la funcionalidad de los disipadores metálicos se encuentra en el edificio “Titanium la Portada” ubicado en la comuna de Las Condes, Santiago. Es el primer edificio en el cual se implementó disipación metálica localizada en Chile. Es de hormigón armado y acero, con planta de forma ovoide y con 52 pisos de altura. Este edificio cuenta con disipadores metálicos [9] ubicados en la intersección de diagonales que abarcan 3 pisos. El objetivo de diseño de estos disipadores fue “disminuir en un 40% el desplazamiento lateral inducido por la acción sísmica [11].

La metodología de diseño de disipadores metálicos propuesta en esta investigación se implementó en un modelo estructural adaptado de la torre central del edificio Mall del Centro, ubicado en Concepción. Se mantuvieron las dimensiones en planta altura y número de pisos, además de ubicación de núcleos de muros. Los marcos no arriostrados que conforman el edificio real fueron cambiados desde hormigón a acero. Para determinar las dimensiones de los elementos metálicos se realizó un análisis modal espectral basado en la NCh433 con lo cual se determinaron las demandas y se escogieron secciones adecuadas a ellas. Se escogió como referencia el edificio mencionado por ser actualmente el más alto de Concepción, con 28 pisos, y por su singular planta trapezoidal.

En el diseño de los disipadores de éstos se consideraron instalados en diagonales que abarcan dos pisos, ubicadas en las tres caras perimetrales mayores. La disposición de disipadores cada dos pisos buscan concentrar las deformaciones sísmicas en ellos, incrementando su eficiencia. Del mismo modo, la distribución perimetral de la disipación busca reducir la torsión y aumentar la estabilidad de la estructura [1].

Como input sísmico para el análisis se consideró un registro sísmico sintético construido en base al registro del 27 de febrero de 2010 medido en Concepción. Este se modificó en el dominio de la frecuencia de modo que su espectro de respuesta elástica calzara con el espectro de diseño de la NCh433. Se utilizó el mismo registro de aceleraciones para las dos direcciones horizontales independientemente una de la otra. Se realizó primero una distribución de las capacidades de disipación relativas asignadas a las plantas buscando reducir la torsión sísmica. Luego se determinó la distribución de capacidades relativas asignadas en altura, buscando que estas sean proporcionales al corte sísmico demandado por piso en el edificio analizado sin disipadores. La capacidad de disipación total se determinó buscando minimizar aceleración absoluta de piso, desplazamientos relativos de piso, drifts, y corte basal.

De los resultados del análisis se determinó que la adición de disipadores metálicos tiene una ligera influencia en la aceleración máxima de piso. Sin embargo, estos son eficaces en la reducción de drift máximo y corte basal. Se determinó que existe una cantidad óptima de disipación del 0.125% del peso sísmico del edificio con la cual se minimizan los drift, generando una reducción de esta respuesta en aproximadamente un 15% respecto de la respuesta del edificio sin disipadores. El corte basal mostró una reducción casi monótona con el aumento de la cantidad de disipación añadida, por lo cual se consideró el uso de la misma cantidad de disipación determinada como óptima en la reducción de drifts. Con esto, la reducción del corte basal alcanzado fue del 15 y 20% en cada dirección de análisis.

METODOLOGÍA

El diseño de los elementos de disipación adicionada es un tema complejo, ya que es multidimensional. Esto significa que al menos deben considerarse tres dimensiones: (1) ubicación de los disipadores en planta y en elevación, (2) distribución de las capacidades de disipación en planta y en elevación y (3) cantidad total de disipación agregada. El punto (1) se refiere a encontrar las ubicaciones donde los disipadores estarían trabajando más eficientemente, lo cual comúnmente ocurre en lugares donde se concentra el desplazamiento relativo en el sistema estructural. El punto (2) busca que la adición de disipadores genere beneficios al sistema completo, evitando problemas como incremento en la torsión en planta. Finalmente, el punto (3) apunta a determinar la cantidad adecuada de disipación, de modo que se maximice una función objetivo relacionado con la reducción de la respuesta estructural. En ocasiones el óptimo anterior no puede ser alcanzado, por lo que en forma alternativa se busca alcanzar una reducción preestablecida de la respuesta objetivo.

Se propone una metodología para realizar la distribución de capacidad de disipación en la planta y en elevación. Para la distribución en planta, se propone un criterio que apunta a reducir la torsión de la planta. Esto es particularmente útil cuando existe excentricidad entre centro de rigidez y de masa de cada piso. Para definir la distribución de la capacidad relativa de los disipadores en elevación, se considera como criterio que ésta debe seguir la distribución del corte por piso del edificio analizado sísmicamente sin disipadores. De esta manera, la asignación de disipación se traduce en encontrar la cantidad total de disipación total para el edificio, la cual se distribuye en planta y altura de acuerdo a los criterios antes mencionados.

Se muestra un ejemplo de diseño de edificio con disipadores metálicos, utilizados para reducir la respuesta sísmica de un edificio de 28 pisos [8]. Se realizó un análisis sísmico historia-tiempo no-lineal en las dos direcciones horizontales, aplicando como input un registro sísmico compatible con la NCh433. Este registro sísmico se construyó modificando en el dominio de la frecuencia al registro del terremoto de 27-02-2010 medido en la ciudad de Concepción, de modo que su espectro de respuesta elástica se ajustase al espectro de diseño de dicha norma.

En los análisis se varió la capacidad de disipación total utilizada en el edificio, obteniendo tres tipos de respuesta objetivo en cada dirección de análisis: drif de piso, aceleración absoluta de piso y corte basal. La disipación requerida se determinó considerando la reducción de estas tres respuestas objetivo, buscando minimizar la respuesta estructural [5].

Disipadores Metálicos

El disipador de energía tiene como objetivo absorber parte de la energía que el sismo impone, disminuyendo la demanda de esfuerzos en los elementos estructurales, reduciendo de esta manera el daño en la estructura [3]. Los disipadores metálicos utilizan la deformación relativa de la estructura o drifs para concentrar deformación en ellos. Esta deformación genera trabajo mecánico en rango plástico del material. Esta energía no es almacenada si no que va de vuelta a la estructura como energía de deformación elástica, es decir, la energía es transformada en daño localizado y por tanto disipada. Estos elementos se caracterizan por ser económicos en su instalación y reposición, además, no sufren deterioro en largos períodos de tiempo. Su comportamiento histerético no depende de la velocidad o aceleración de la respuesta, sino que de los niveles de deformación alcanzados [10] Esto hace posible la aplicación del método por desplazamiento basado en el drifs de cada piso. Los disipadores metálicos usados comúnmente son los siguientes:

Dispositivos tipo ADAS

Added Damped And Stiffness (ADAS), consiste en varias placas de acero en paralelo en forma de 'X'. Cada placa del dispositivo se encuentra restringida de giro para ambos extremos, esto hace que un desplazamiento relativo entre éstos con dirección perpendicular a su plano genere una distribución lineal de momentos flectores. [2]

Dispositivos tipo TADAS.

Triangular Plate Added Damping And Stiffness (TADAS) es un disipador constituido por placas triangulares de acero con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión. [2]

Dispositivos tipo HoneyComb

Debido a los espacios vacíos que deja entre disipadores se le conoce genéricamente como disipador de tipo panal, y se comercializa con el nombre de "Honeycomb". Su geometría tiene como objeto una plastificación lo más uniforme posible en la zona disipativa. [2]

Dispositivos de platina ranurada.

Estos son dispositivos histeréticos de placas de acero con espesor constante estas placas reciben la carga cortante en dirección paralela a su plano es necesario colocarlos en lugares en donde se garanticen desplazamientos suficientes para que puedan funcionar. [2]

Se muestra en la Figura 1 el gráfico característico de carga-desplazamiento de un disipador metálico.

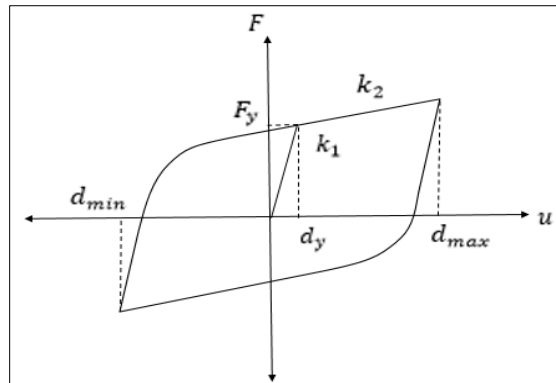


Figura 1: Curva fuerza versus desplazamiento relativo de un disipador metálico.

En la curva de Figura 1 se observa una rigidez inicial, k_1 , la que está asociada a la reacción del disipador de energía frente a cargas por debajo de la fuerza de fluencia. Se obtiene al trazar una recta tangente a las zonas de menor carga del ciclo. También se observa una rigidez al pasar la fluencia, k_2 , la cual se reduce respecto de k_1 , debido a que las fibras del disipador se van plastificando gradualmente al superarse el límite de inicio de fluencia. Se obtiene al trazar una recta tangente a la curva que pase por el punto de mayor desplazamiento de la histéresis. La fuerza de fluencia, F_y , con su correspondiente desplazamiento de fluencia, d_y , corresponden a la fuerza y desplazamientos ocurrido al inicio de la fluencia en la fibra más solicitada.

Al usar estos disipadores metálicos se debe tener en cuenta que la respuesta objetivo no siempre se reduce al incrementar la cantidad de disipación, en ocasiones existe una cantidad de disipación óptima que conduce a una respuesta mínima. Este se debe a que al agregar disipación no sólo aumenta el amortiguamiento, sino que también aumenta la rigidez aparente, lo cual modifica los períodos naturales del sistema. Esto puede ocasionar que la estructura se movيلة a una zona de mayor demanda sísmica en el espectro de diseño, incrementando la respuesta en lugar de reducirla.

En esta investigación los análisis fueron realizados usando el software ETABS. Los disipadores metálicos se modelaron con la ecuación de Bouc-Wen, incorporada en el software, ya que este modelo es capaz de representar de buena forma leyes constitutivas bilineales histéresicas, como en el caso de disipadores metálicos. La principal ventaja de este modelo es su refinamiento y exactitud, pues al variar sus parámetros es posible emular una gran variedad de comportamientos elastoplásticos que sirven para caracterizar la respuesta de un dispositivo en el tiempo [10].

El tipo de disipador usado en el software ETABS es Plastic Wen, capaz de modelar disipadores metálicos por fluencia, como los que se usaran en esta investigación. Los parámetros requeridos son los que se muestran en Figura 2 y están directamente relacionados con la curva mostrada en la Figura 1. Los parámetros de rigidez inicial, k_1 , (Stiffness) y fuerza de fluencia, F_y , (Yield Strength) son claves en esta investigación, ya que estos se irán variando hasta poder tener los valores óptimos para drift, corte por piso y aceleración absoluta. El cociente entre k_2 y k_1 es llamado “Post Yield Stiffness Ratio” y normalmente es un valor muy cercano a cero. El parámetro “Yielding Exponent” del elemento Plastic Wen, corresponde a un parámetro de transición entre k_1 y k_2 , valores mayores de este parámetro conducen a transición en curva más cerrada.

Nonlinear Properties	
Stiffness	<input type="text" value="0"/> tonf/mm
Yield Strength	<input type="text" value="0"/> tonf
Post Yield Stiffness Ratio	<input type="text" value="0,0005"/>
Yielding Exponent	<input type="text" value="6"/>

Figura 2: Parámetros del dissipador de energía, link plastic Wen de ETABS.

Para reducir el número de variables del problema de optimización de dissipadores, primero se debe realizar una distribución relativa de las capacidades de estos en planta. Luego se realiza la distribución relativa de las capacidades de disipación asignadas en elevación. Esto transforma el problema original de muchas variables en un problema de una sola variable, la capacidad total de disipación asignada al edificio. Esta capacidad se expresará por medio de un parámetro adimensional, η , igual al cociente entre la capacidad de disipación total asignada y el peso sísmico del edificio. Se analizó la respuesta del edificio con disipación de energía considerando η entre 0,00025 y 0,004, con incrementos de 0,00025, esto es, entre 0,25‰ y 4 ‰ del peso sísmico del edificio.

Para cada valor del parámetro η , se determinó la respuesta del edificio y se calcularon las respuestas objetivo máximas. Estas fueron normalizadas o transformadas en respuestas adimensionales, al dividir las por la respuesta objetivo máxima correspondiente al edificio sin disipación de energía. Estas respuestas normalizadas representan la proporción a la que se redujo la respuesta objetivo para cada valor de cantidad de disipación asignada η .

Las respuestas normalizadas conforme a lo anteriormente indicado se grafican en función del parámetro η o cantidad de disipación total asignada en proporción del peso sísmico (Figuras 11, 13 y 16). En el caso de existir un mínimo absoluto en estas curvas, la abscisa η correspondiente representa la cantidad de disipación óptima. Si no existe un mínimo para alguna de las respuestas objetivo, entonces el diseño no es óptimo, sino que debe ser establecido buscando un objetivo de reducción de respuesta especificado previamente.

Distribución de la capacidad de disipación

Primero se debe ver la orientación de los dissipadores y luego el lugar en que se instalarán. Como el edificio tiene una geometría bien particular (visto en planta es trapezoidal) los dissipadores se ubicarán en sus lados más largos según su dirección “x”, “y” y diagonal respectivamente. Para cada dirección mencionada se tendrán 14 dissipadores en la altura, teniendo un total de 72 en toda la estructura.

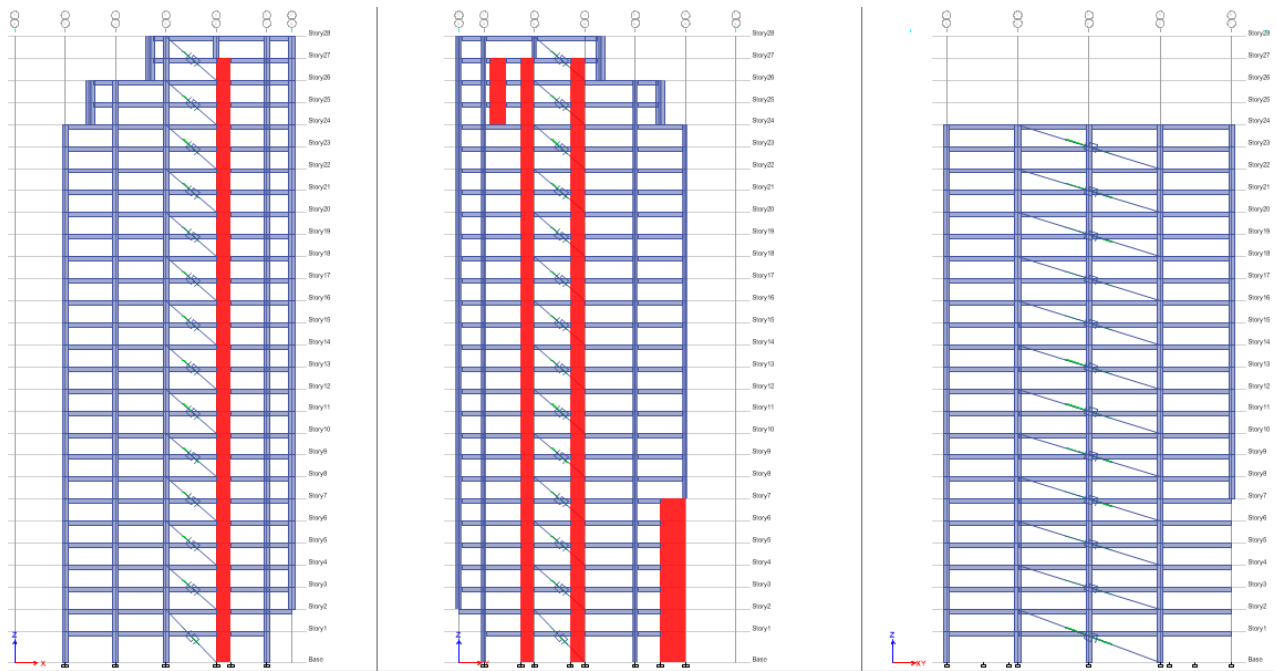


Figura 3: Ubicación y orientación de los disipadores de energía en elevación.

Los disipadores usualmente son colocados entre un grupo de pisos, para incrementar la deformación que los solicita bajo acción sísmica. Para este caso en particular se decidió usar un disipador que uniera 2 pisos, lo cual quedó condicionado por la inclinación de las diagonales de disipación, la cual debe estar entre 30 y 60° respecto de la horizontal para aprovecharlas eficientemente.

Al calcular el esfuerzo de fluencia del disipador se dispuso de los siguientes criterios:

Distribución en altura: Esto se realizó según la proporción de las fuerzas totales de corte por piso obtenidas del análisis del edificio sin disipadores. Esto tiene por objetivo agregar disipadores de manera proporcional a la demanda sísmica del grupo de pisos que son unidos por las diagonales de disipación.

Distribución en planta: Se calculó el centro de masa del piso para determinar las distancias perpendiculares (r) de este hacia los extremos del edificio donde se ubicaron los disipadores (F) Figura 4. De lo anterior se desarrollaron las ecuaciones de equilibrio de momento para las fuerzas de los disipadores por piso según el centro de masa debido a las deformaciones en “X” e “Y” Figuras 5 y 6. Las capacidades de los 3 disipadores en planta corresponden a la capacidad total de disipación. Con esto se obtienen 3 ecuaciones que evitan que los disipadores generen momento. De la figura 4 se observan los valores de las ecuaciones (1), (2) y (3).

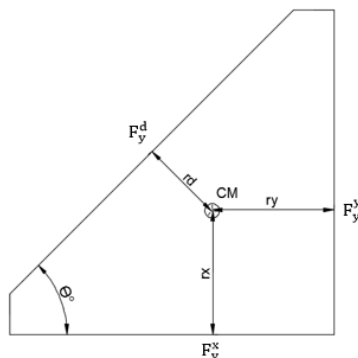
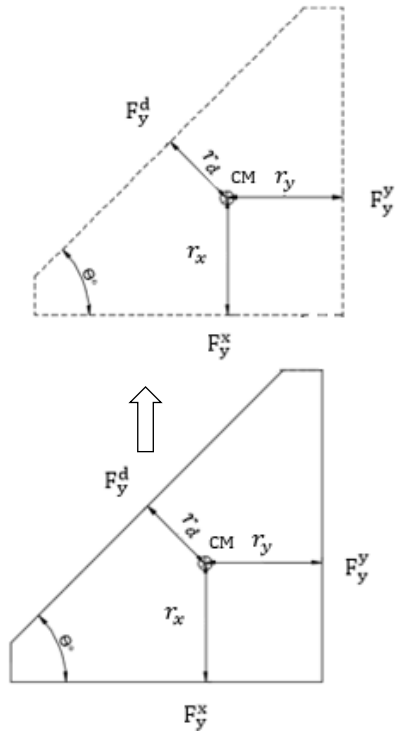
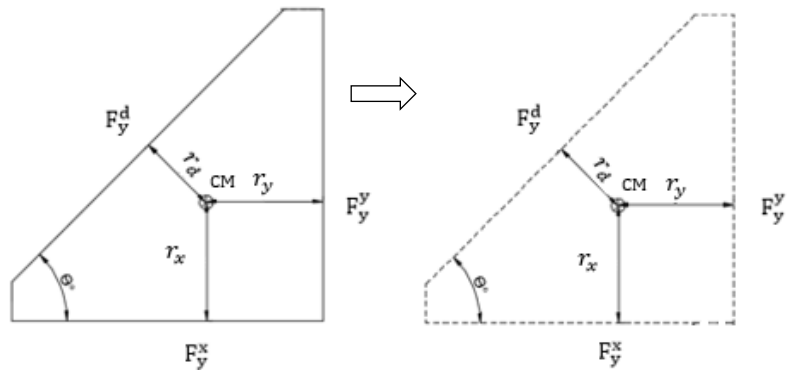


Figura 4: Planta edificio, ubicación de disipadores y de centro de masa


Figura 5: Desplazamiento sismo “Y”

Figura 6: Desplazamiento sismo “X”

Para poder relacionar las ecuaciones de momento se observó cuales disipadores trabajaban en cada dirección. En la dirección “x” trabajan los disipadores F_y^x y la componente horizontal de F_y^d , mientras para la dirección “y” trabajan los disipadores F_y^y y la componente vertical de F_y^d .

$$F_y^d \cdot r_d \cdot \cos \theta - F_y^x \cdot r_y = 0 \quad (1)$$

$$F_y^d \cdot r_d \cdot \sin \theta - F_y^y \cdot r_x = 0 \quad (2)$$

$$F_y^d + F_y^x + F_y^y = F_y \quad (3)$$

Donde los valores de las ecuaciones son:

F_y^x : Fuerza del disipador en la dirección “x” del edificio.

F_y^y : Fuerza del disipador en la dirección “y” del edificio.

F_y^d : Fuerza del disipador en la dirección diagonal del edificio.

r_x : Distancia perpendicular desde el centro de masa hasta el disipador en la dirección “x” del edificio.

r_y : Distancia perpendicular desde el centro de masa hasta el disipador en la dirección “y” del edificio.

r_d : Distancia perpendicular desde el centro de masa hasta el disipador en la dirección diagonal del edificio.

Edificio de estudio

Para poder llevar a cabo la investigación y así poder obtener los resultados esperados, se utilizó el modelo estructural de un edificio de moderada altura, ubicado en Concepción, compuesto de marcos flexibles de acero y núcleo de muros de hormigón. Sin embargo, cabe destacar que Concepción no cuenta con este tipo de edificios por lo que se decidió adaptar un edificio existente, considerando la Torre Mall del Centro como base, un edificio de hormigón armado ubicado en Barros Arana 1068, con 28 pisos y una altura de 99,5 metros aproximadamente. Se reemplazaron columnas y vigas de hormigón por acero y se rediseñó el edificio para determinar las secciones de los elementos modificados.

Para el análisis de este edificio se trabajó con el programa computacional ETABS 2015 versión 15.2.0, el cual es un programa estructural ampliamente ocupado para modelar edificios. En el análisis y diseño se consideró acero ASTM A572, con tensión de fluencia $F_y=3.500 \text{ kg/cm}^2$ y tensión de rotura $F_u=4.500 \text{ kg/cm}^2$. El hormigón se consideró H-40, con $f_c'=281 \text{ kg/cm}^2$

Una vez ingresado los materiales en el programa se ingresaron los perfiles que se utilizaran para poder diseñar, estos son del tipo IN y HN. Además, se consideraron elementos soldados para poder crear perfiles adecuados para este diseño, las dimensiones fueron estimadas según los elementos de hormigón del edificio original.

Para poder diseñar el edificio de acero se usó la norma NCh 433 of 1996 modificada el 2009 esta norma de “diseño sísmico de edificios” más el Decreto Supremo 61 actualizado. En el análisis elástico lineal de la estructura sin disipadores, se utilizó el método de análisis modal espectral. El espectro de diseño que determina la demanda sísmica sobre la estructura está definido por el punto 6.3.5 de la NCh 433 modificada el 2009 y los puntos 6.3.5.1; 6.3.5.2 y 6.3.5.3. Los parámetros de macro-zonificación y micro-zonificación sísmica necesarios para construir el espectro de diseño son obtenidos desde tablas que están en la NCh 433 y decreto supremo 61. El parámetro T^* que corresponde al período del modo con mayor masa traslacional en la dirección de análisis, presenta 2 valores diferentes, uno para la dirección “x” y otro para “y”. Estos se obtienen mediante el programa ETABS al realizar un análisis de valores y vectores propios. Las tablas de que se obtienen los datos para construir el espectro de diseño son las siguientes 5.1, 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. El edificio en estudio está ubicado en Concepción y está destinado a la habitación privada o al uso público. Los datos específicos para obtener el espectro de diseño son los mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 1: Parámetros sísmicos

Categoría del edificio	II
Zona sísmica	3
Tipo de suelo	C
Factor de mod. de la respuesta (R)	7
Factor de mod. de la respuesta (R_0)	11
Período fundamental T^*_x	2,2
Período fundamental T^*_y	1,8
A_0	0,4*g
S	1,05
T_0	0,4
T'	0,45
n	1,4

p	1,6
I	1

Donde:

A_0 : Aceleración característica del suelo.

I: Factor de importancia.

α : Factor de amplificación modal.

R^* : Factor de raduccion.

R_0 : Factor de modificación de la respuesta.

S, T_0 , p: Propiedades definidas por la clase de suelo.

T_n : Periodo del n – ésimo modo.

T^* : Periodo del modo con mayor masa traslacional equivalente a la dirección de análisis.

La carga sísmica del edificio se calculó según los parámetros de la Tabla 1, según esos valores se tiene los espectros de diseño para determinar la resistencia sísmica del edificio para las direcciones “x” e “y”.

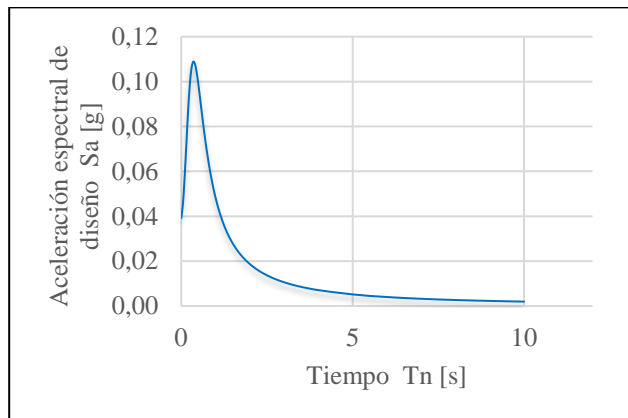


Figura 7: Espectro de diseño dirección "x".

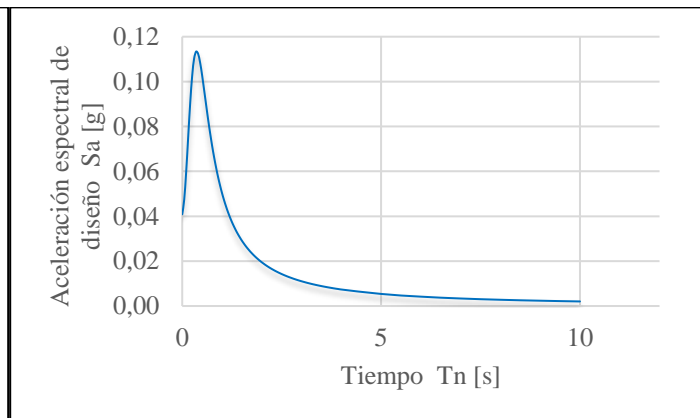


Figura 8: Espectro de diseño dirección "y".

Los espectros de diseños de las figuras 5 y 6 consideran el factor de reducción R^* .

Al diseñar el edificio de acero, se deben tener en cuenta las solicitaciones o cargas que están presente en este, entre las cuales tenemos el peso propio, sobrecarga y sismo. La sobrecarga de piso se consideró igual a 250 kg/m^2 . El peso propio es calculado por el programa y este es de 14.772 Ton además del peso muerto de 150 kg/m^2 . El sismo se ve representado por el espectro de diseño.

En seguida de ingresar las cargas se procede a verificar los elementos mediante las combinaciones de carga con el método LRFD, estas combinaciones son las siguientes:

Las combinaciones de carga se obtienen de la NCh 3171 “Diseño estructural- Disposiciones generales y combinaciones de carga”. En el punto 9.1 “Factores de combinación de cargas mayoradas usando el diseño por resistencia”, usando las siguientes:

1. 1.4D
2. 1.2D + L
3. 1.2D + 1.6L
4. 1.2D + 1.4Ex + L

5. $1.2D - 1.4Ex + L$
6. $1.2D + 1.4Ey + L$
7. $1.2D - 1.4Ey + L$
8. $0.9D + 1.4Ex$
9. $0.9D - 1.4Ex$
10. $0.9D + 1.4Ey$
11. $0.9D - 1.4Ey$

Donde D es el peso propio y la carga muerta, L es la sobrecarga, Ex y Ey son los sismos para cada dirección correspondiente.

Cuando se realiza este análisis se verifican los esfuerzos y deformaciones de las secciones elegidas, para este análisis se dio prioridad a las deformaciones, ya que esta variable es el problema cuando se construyen edificios de acero de gran altura. Por esta razón las secciones de acero resultaron de secciones considerablemente grandes.

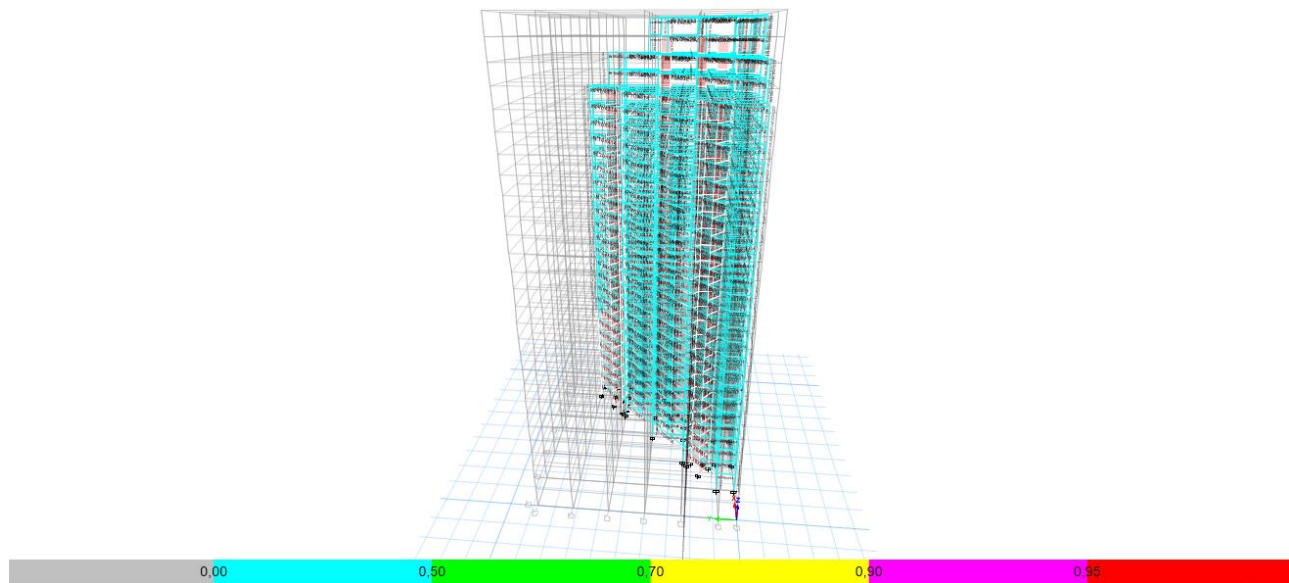


Figura 9: Modelo estructural del edificio analizado en ETABS. Los colores representan la proporción de ocupación de capacidad de cada elemento estructural.

La resistencia de diseño de cada elemento estructural debe ser mayor o igual a la resistencia requerida determinada por el método LRFD. En el modelo se muestra que la relación de esfuerzo último y esfuerzo nominal de cada elemento es menor que 1, además se muestran en colores la relación que tiene cada elemento estructural. También cumple con los desplazamientos relativos entre piso (deformaciones sísmicas). También se verificó el corte basal mínimo y máximo según la NCh 433 punto 6.3.7. Para esto se calculó el peso sísmico de la estructura, el cual se obtiene sumando al peso propio el 50% de la sobrecarga de piso.

$$P = PP + 0.5 * SC \quad (4)$$

Donde SC es la sobrecarga y PP es el peso propio del edificio, se considera el valor 0.5 ya que la estructura es un edificio que se aglomera una cantidad de gente. Los espectros de diseño que se ingresaron al modelo arrojaron los siguientes cortes basales: para la dirección “x” 302 [Ton] y para la dirección “y” 336 [Ton], para calcular los cortes basales mínimos y máximos se usan las expresiones de la Nch 433 punto 6.3.7.1 y 6.3.7.2 correspondientemente. Dando como resultado un C_{\min} de 1355 [Ton] y un C_{\max} de 7112 [Ton], como se puede observar nuestro edificio está condicionado por el corte basal mínimo, esto quiere decir que se debe multiplicar por un factor de manera que

los cortes basales en las dos direcciones analizadas alcance el valor del corte basal mínimo. Este factor se calcula como el cociente del corte basal mínimo y el corte basal según los espectros de diseño.

El factor de corrección para la dirección “x” es de 4.49 y para la dirección “y” es de 40.3, así se comprueba que la estructura cumple con la norma Nch 433, esto hace que se trabaje con el corte basal mínimo. Ingresado el factor de corrección, el programa se dispone a diseñar y analizar. Dando como resultado las siguientes secciones de acero para vigas, columnas y viguetas.

Para las vigas se obtuvieron las secciones IN 70x414, columnas HN 90x1025 y para las viguetas IN 20x30.6. Las cuales cumplen con los esfuerzos y desplazamientos requeridos según la Nch 433, obteniéndose el edificio base de acero sobre el cual se analizan los disipadores de energía.

Análisis dinámico Tiempo-historia

Para el análisis dinámico se usó un registro de aceleraciones, permitiendo observar cómo varía la respuesta dinámica del edificio al incorporar una carga, es decir, el sismo en el transcurso del tiempo.

Para el estudio de los disipadores se realizará un análisis tiempo historia (no-lineal), ya que estos trabajan sobre los valores de la fluencia del material. Sin embargo, cuando se analiza en el rango no lineal se debe elaborar un modelo de su comportamiento en función de la magnitud de la fuerza excitadora para cada material, o sea, que no usamos solo un dato fijo sino un historial de fuerzas, debemos conocer el comportamiento del material usado cuando este es sometido a ciclos de carga y descarga como ocurre con un sismo.

El terremoto utilizado corresponde al ocurrido el 27 de febrero del 2010 (Chile), se generará un terremoto ficticio con la ayuda de un programa computacional MATLAB, al ingresar un registro de aceleraciones de un terremoto real genera un ajuste a los parámetros de la norma Nch 433. Como se muestra en la figura 8 el espectro generado se ajusta al espectro de diseño y al igual que las aceleraciones. Para compatibilizar el registro se usó la siguiente metodología: El programa altera la amplitud de la transformada de fourier o del registro sísmico del dominio de la frecuencia, solo la amplitud no la frecuencia, para que la respuesta del espectro coincida con el espectro de diseño de la norma Nch 433 y esto se hace de manera iterativa, porque cada vez que se altera una amplitud asociada a una frecuencia se modifica la respuesta en todas las demás frecuencias. Se hace hasta que los dos espectros de diseño y de respuesta coincidan dentro de un margen aceptable. Este margen se estableció que a partir de la iteración n° 50, los valores de las aceleraciones no variaban mucho si seguía aumentando el número de iteraciones.

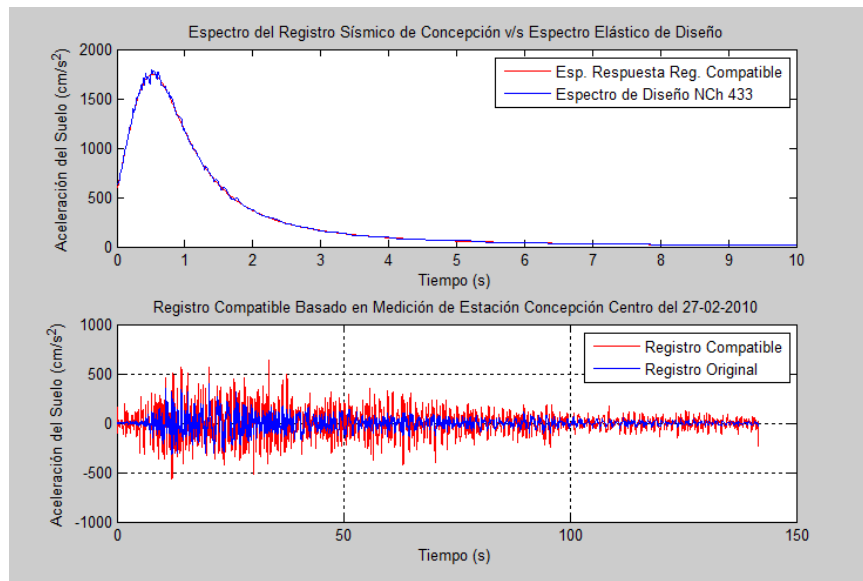


Figura 10: Sismo artificial.

En la Figura 8 se muestra el espectro de diseño el cual determina la resistencia de una estructura según Nch 433 punto 6.3.5, como se ajusta el espectro compatible a este. Posteriormente se muestra la aceleración original y las compatible con el registro.

Respuestas objetivo y disipación óptima

La respuesta objetivo para esta investigación consta de 3 valores, los cuales son drif de piso, corte basal y aceleración absoluta, ya que si se ve disminución en estas respuestas el edificio será menos robusto, es decir con secciones de acero más pequeñas a las que se obtuvieron del edificio base, por lo tanto, menos costoso. Como la capacidad de disipación afecta independientemente a las respuestas objetivos se obtendrán 3 valores óptimos de capacidad de disipación. Para poder calcular el óptimo se debe encontrar la respuesta mínima de cada uno de los objetivos, siguiendo esto se tendrá diferentes capacidades de disipación para cada respuesta objetivo, pero el valor final se elegirá según el drif cuando sea mínimo.

RESULTADOS

Se muestran los resultados de los análisis según cada respuesta objetivo. Para cada respuesta objetivo se analizaron diferentes capacidades de disipación total. La determinación del rango apropiado de esta variable no es directa ni sencilla, ya que al tratarse de análisis no-lineal, tanto la respuesta como las propiedades del sistema se modifican al cambiar dicha variable. Se presentan a continuación los resultados obtenidos considerando la variable “capacidad de disipación” normalizada de modo que se asocia a ella un parámetro adimensional. Debido a que esta variable tiene unidades de fuerza, se la ha normalizado con respecto al peso sísmico del edificio. De este modo, al decir “capacidad de disipación de 0.005 o bien 0.5%” esto quiere decir que la suma de las capacidades máximas de todos los disipadores del edificio actuando en una dirección particular es de 0.5% del peso sísmico del mismo.

El objetivo de esta investigación es determinar la capacidad de disipación óptima de diseño. Ésta se define, en teoría, como aquella para la cual se logra la máxima reducción de la respuesta objetivo particular, en relación al valor de dicha respuesta en el análisis del edificio sin disipadores. En el desarrollo de esta sección se muestra que no siempre es posible encontrar un óptimo, en cuyo caso el diseño debe ser establecido definiendo a priori un determinado porcentaje de reducción de la respuesta objetivo.

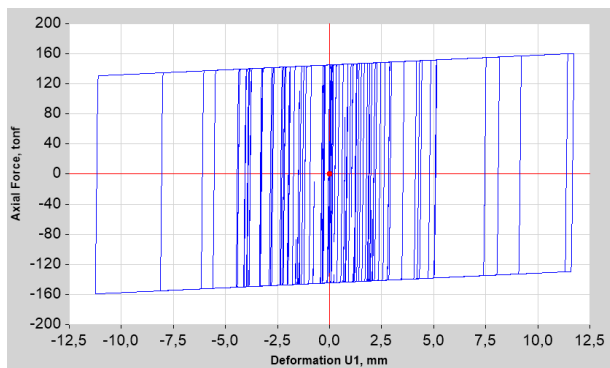


Figura 11: Disipador piso 12-14 dirección "x".

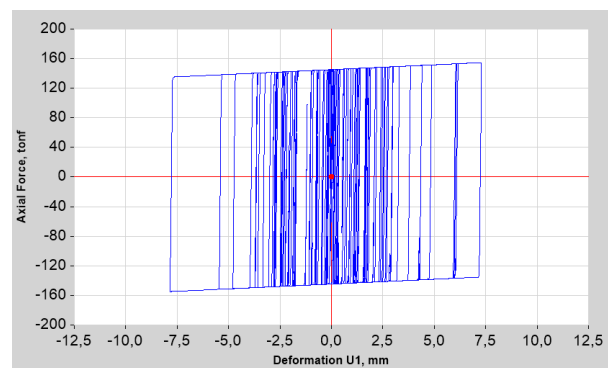


Figura 12: Disipador piso 12-14 dirección "y".

En la figura 9 y 10 se muestran el gráfico fuerza vs deformación de los disipadores metálicos cuando alcanzan el óptimo de capacidad de fuerza para la respuesta objetivo del corte basal.

Desplazamiento relativo de piso

Con el fin de mostrar la reducción de la respuesta objetivo, en este caso el corte basal, en función de la cantidad de disipación adicionada, se define el corte basal no lineal normalizado como:

$$\widehat{D}^{(NL)} = \frac{Drif^{(NL)}}{Drif^{(L)}} \quad (5)$$

Donde el valor del $Drif^{(L)}$ es constante y se obtiene de la estructura sin disipadores de energía, el $Drif^{(NL)}$ depende de la cantidad de disipación agregada a la estructura. De esta manera, valores de $\widehat{D}^{(NL)}$ menores a 1 corresponden a una reducción de la respuesta lineal.

En la Figura 11 se muestra la respuesta que tiene la estructura al implementar disipadores de energía llegando a un valor óptimo para la fuerza del disipador, este valor es 0.125.

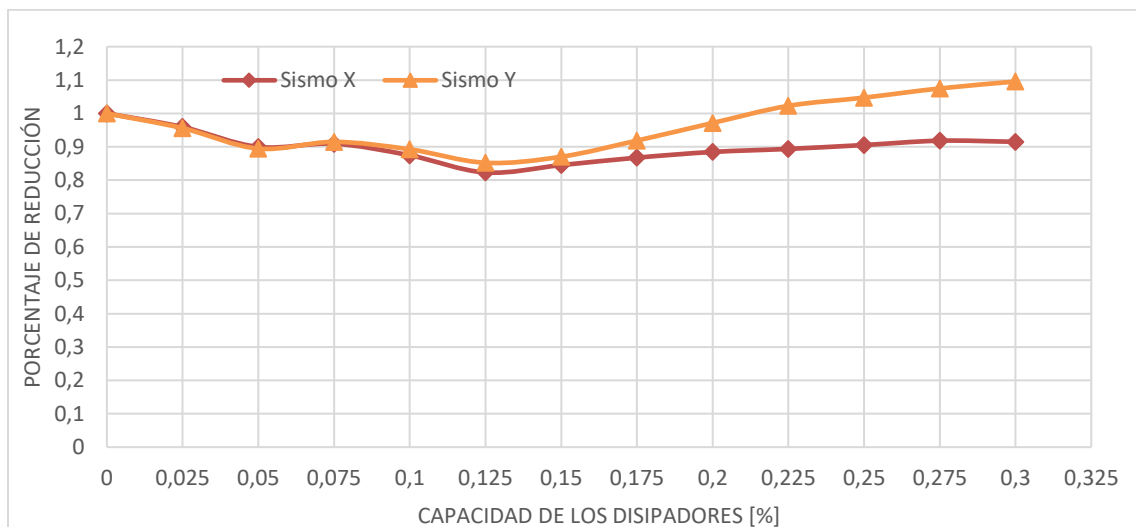


Figura 13: Reducción del drif en función de la capacidad de disipación total.

En la Figura 12 se muestra la reducción por piso que experimenta el drif al tener el óptimo valor de la capacidad de disipación.

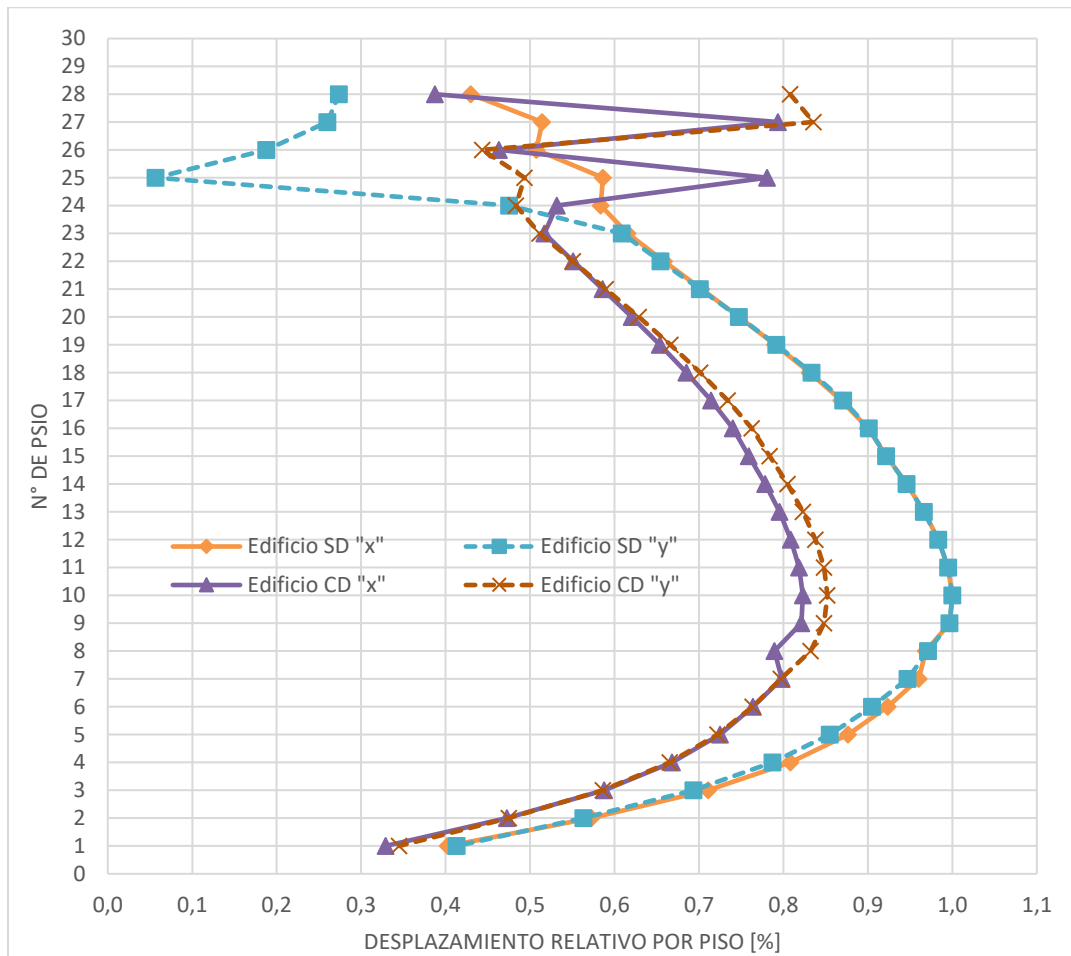


Figura 14: drif edificio sin y con disipadores.

Corte por piso y basal

Con el fin de mostrar la reducción de la respuesta objetivo, en este caso el desplazamiento relativo de piso, en función de la cantidad de disipación adicionada, se define el drif no lineal normalizado como;

$$\hat{Q}_0^{(NL)} = \frac{Q_0^{(NL)}}{Q_0^{(L)}} \quad (6)$$

Donde el valor de $Q_0^{(L)}$ es constante y se obtiene de la estructura sin disipadores de energía, el $Q_0^{(NL)}$ depende de la cantidad de disipación agregada a la estructura. De esta manera, valores de $\hat{Q}_0^{(NL)}$ menores a 1 corresponden a una reducción de la respuesta lineal.

La capacidad óptima de disipación en esta respuesta objetivo es aquella para la cual se logra la máxima reducción del drif, este valor de optimo es independiente del optimo del corte basal.

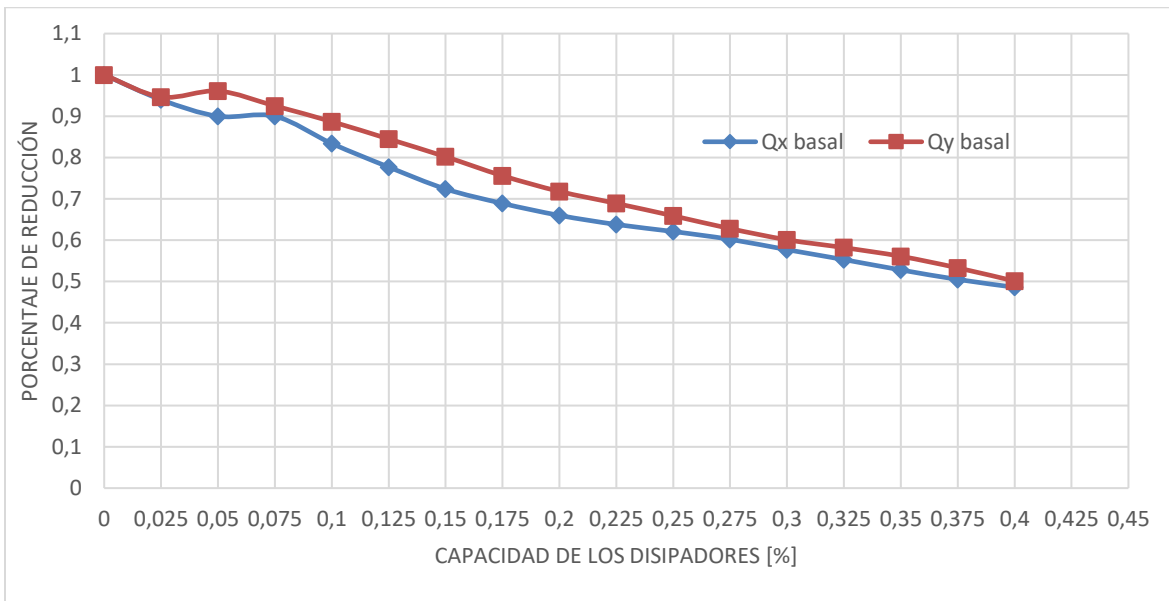


Figura 15: Reducción del corte basal en función de la capacidad de disipación total.

En Figura 13 se observa la tendencia que sigue los valores de reducción del corte basal al variar la capacidad de los disipadores, como la respuesta siempre tiende a disminuir no es posible encontrar un óptimo de capacidad de disipación asociado al corte basal porque no se registra un mínimo absoluto. Por esto el óptimo que se establecerá será el valor de reducción que pueda ser confiable o un valor que se haya registrado al usar estos disipadores, para esto se usara el valor de disipación de energía que tuvo el edificio Titanium (Santiago) ya que tienen los mismos disipadores metálicos por fluencia.

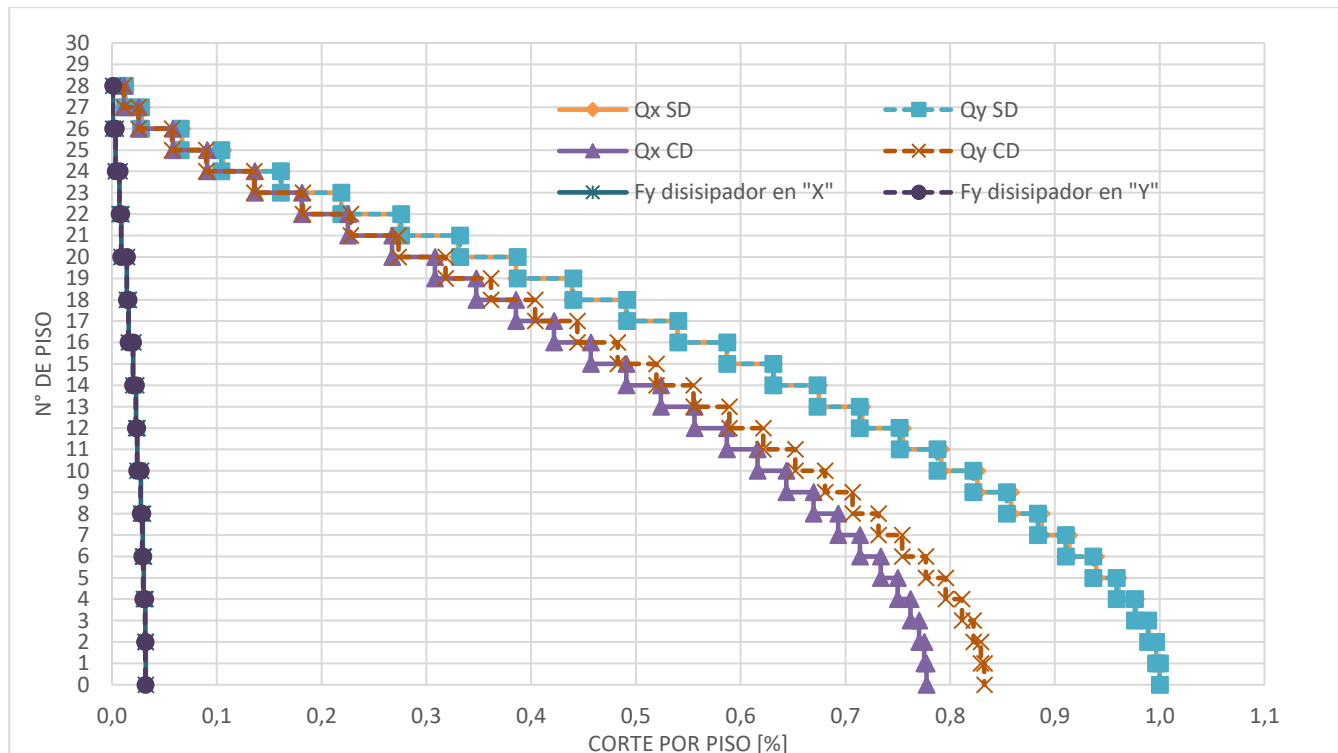


Figura 16: Corte basal y por piso en edificio con y sin disipadores.

En Figura 14 se muestran las fuerzas de cortes máximas absolutas por piso obtenidas en la estructura sin disipadores (Q^{SD}) y con disipadores (Q^{CD}) además de la fuerza tomada por los disipadores en cada piso cuando la capacidad de disipación es del 0.125.

Aceleración absoluta por piso

Con el fin de mostrar la reducción de la respuesta objetivo, en este caso aceleración absoluta de piso, en función de la cantidad de disipación adicionada, se define la aceleración absoluta no lineal normalizado como;

$$\hat{A}_0^{(NL)} = \frac{A_o^{(NL)}}{A_o^{(L)}} \quad (7)$$

Donde el valor del $\hat{A}_0^{(L)}$ es constante y se obtiene de la estructura sin disipadores de energía, el $\hat{A}_0^{(NL)}$ depende de la cantidad de disipación agregada a la estructura. De esta manera, valores de $\hat{A}_0^{(NL)}$ menores a 1 corresponden a una reducción de la respuesta lineal.

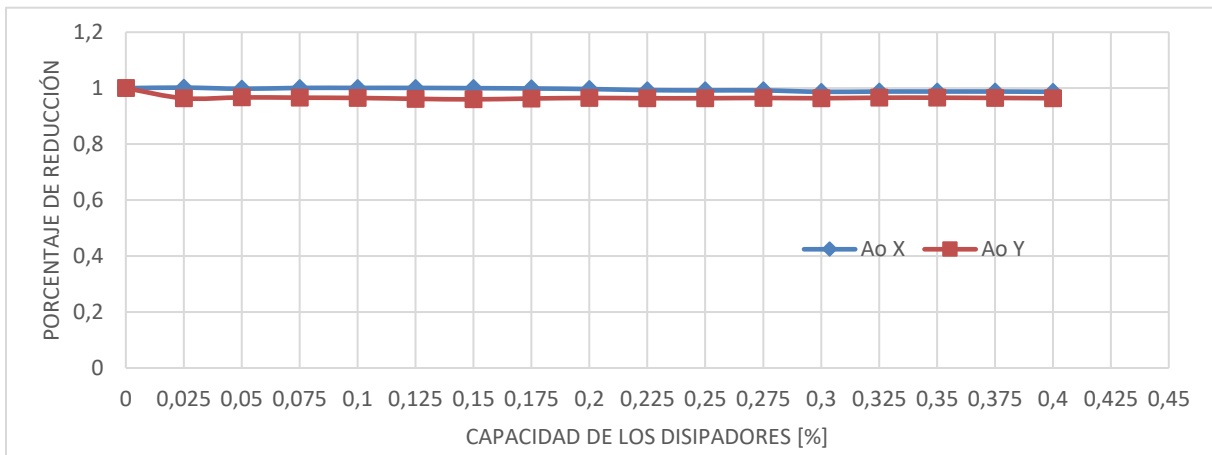


Figura 17: Reducción de la aceleración por piso en función de la capacidad de disipación total

En la Figura 15 se muestra que al implementar disipadores la respuesta no presenta reducción, lo que representa que estos tipos de disipadores no tiene mucha efectividad en disminuir las aceleraciones.

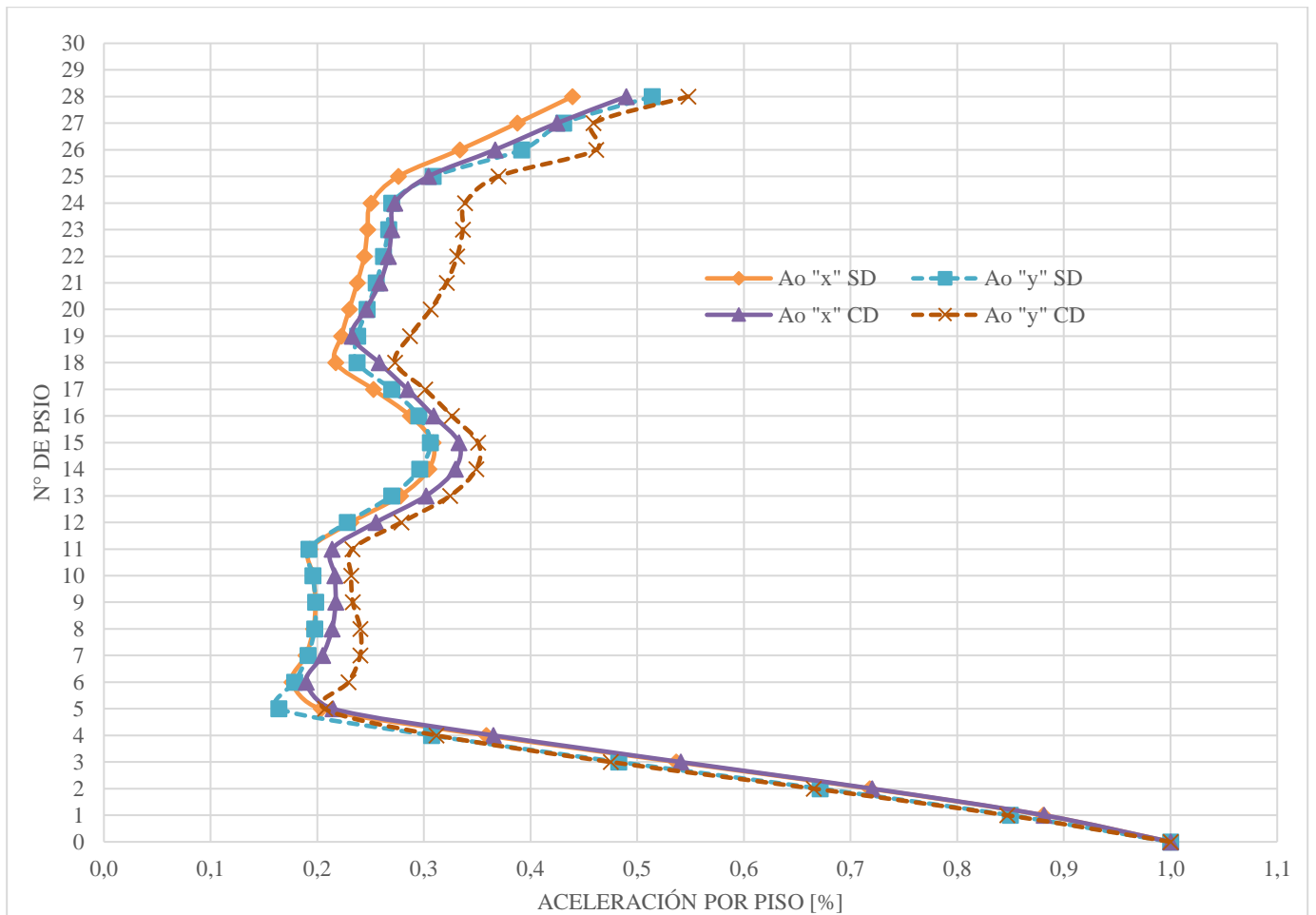


Figura 18: Aceleración por piso sin y con disipadores

En la Figura 16 la aceleración no muestra una reducción significativa como las reducciones anteriores, pero si en ciertos tramos se observa un aumento de la aceleración por piso.

CONCLUSIÓN

Según la hipótesis planteada, al implementar un disipador de energía metálico a un edificio alto de acero este disminuiría una respuesta objetivo, según los resultados de los edificios analizados reducían sus desplazamientos relativos de pisos y su corte basal.

Al aumentar los parámetros (fuerza de fluencia y rigidez) de los disipadores en ETABS los desplazamientos relativos por piso aumentaron, esto ocurre al tener disipadores con mucha capacidad de fluencia la estructura se vuelve muy rígida o tiene más amortiguamiento del que se requiere, esto hace que se obtengan mayores desplazamientos relativos de un edificio con disipadores de energía a uno sin estos, esto suena un poco ilógico porque esto tiene que reducir estos desplazamientos y no al contrario. Esto sucede cuando la capacidad de disipación total sobrepasa el valor 0.125.

Se esperaba anticipadamente que esto ocurriera con este desplazamiento, lo que lleva a ratificar que para cada tipo de estructura debe haber un valor óptimo de disipación en su respuesta. Este óptimo se ve reflejado en la figura 11 de acuerdo a la ecuación (8), que representa una relación entre las deformaciones no lineal y lineal del edificio. El óptimo de este se encuentra a los 0,125 de la capacidad de disipación total para ambas direcciones "x" e "y", este valor se encuentran los valores de los disipadores de energía para cada par de pisos. La reducción que se obtiene

de los desplazamientos relativos es cerca del 20% de la deformación del edificio sin disipadores, este valor se encuentra en el rango según los disipadores de la Torre Titanium [11], los cuales redujeron un 40% de desplazamientos.

Otro parámetro analizado fue el corte basal y los cortes por piso del edificio, igual que los desplazamientos se fue cambiando los valores de fuerza de fluencia y rigidez. Según la ecuación (9) se trazó un gráfico (13) el cual muestra la disminución el corte basal de la estructura al aumentar la capacidad de disipación. Esto hace que al tener que elegir un valor óptimo sea un poco difícil, pues no se sabe que tanto pueda seguir bajando esta curva por esto se verificó el porcentaje de reducción que tiene el corte basal por medio de disipadores de energía. Para escoger el óptimo según esta respuesta se tomó en cuenta el drif el cual pasando el valor 0.125 de la capacidad de disipación aumenta su respuesta, por esto el óptimo del corte basal será el mismo del drif.

La aceleración absoluta por piso no presenta variación, lo que demuestra que para la disminución de esta los disipadores metálicos no son efectivos.

Los disipadores ayudan a reducir la respuesta en términos de drift y corte basal, lo que significa que el diseño de la estructura será menos robusto al que se tiene inicialmente, pero no tienen una influencia mayor en la aceleración por piso, por lo que las personas al estar en un edificio con disipadores sentirán las mismas aceleraciones que un edificio sin disipadores de energía.

Para reducir el corte basal debe tener un objetivo de reducción de respuesta antes de obtener los resultados ya que el corte basal siempre disminuye con estos tipos de disipadores. Cuando se usa un disipador metálico mi función objetivo no puede ser la aceleración por piso, ya que los resultados lo avalan. La aceleración de piso máxima es poco sensible a la capacidad de disipación, en cambio el drif se puede observar la respuesta mínima u óptima.

Se escogió el óptimo para las 3 respuestas objetivos el valor η del drif 0.125 (capacidad de disipación), porque al aumentar este parámetro el drif aumentaba, mientras el corte basal se reducía y la aceleración por piso se mantenía sin variación alguna. Por esto el valor η condiciona la capacidad de los disipadores.

Al implementar disipadores metálicos mi edificio será menos robusto lo que lleva a un ahorro en términos de elementos estructurales.

REFERENCIA

- [1] AIKEN, Ian. Passive energy dissipation hardware and applications. En Proceedings, Los Angeles county and SEAOSC symposium on passive energy dissipation systems for new and existing buildings, Los Angeles. 1996.
- [2] OVIEDO, Juan Andrés; DEL PILAR DUQUE, María. DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS COMO TÉCNICA DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES COLOMBIANAS (METALLIC HYSTERETIC DAMPERS AS A SEISMIC RESPONSE CONTROL TECHNIQUE IN COLOMBIAN BUILDINGS). *Revista EIA*, 2013, vol. 6, no 11, p. 51-63.
- [3] OVIEDO, Juan Andrés; DUQUE, María del Pilar. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, 2006, no 6, p. 105-120
- [4] PARK, Hyo Seon; HONG, Kappyo; SEO, Ji Hyun. Drift design of steel-frame shear-wall systems for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2002, vol. 11, no 1, p. 35-49.
- [5] PARK, Hyo Seon; KWON, Jun Hyeok. Optimal drift design model for multi-story buildings subjected to dynamic lateral forces. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2003, vol. 12, no 4, p. 317-333.
- [6] TAPIA HERNÁNDEZ, Edgar; TENA COLUNGA, Arturo. Diseño sísmico de marcos de acero contraventeados: Parte 1: recomendaciones de diseño. *Ingeniería sísmica*, 2013, no 88, p. 43-68.
- [7] TERÁN GILMORE, Amador; COETO GALAZ, Guillermo. Dimensionado preliminar basado en rigidez de edificios altos con estructura de acero rigidizados con diagonales concéntricas. *Ingeniería sísmica*, 2014, no 90, p. 34-54.
- [8] REYES, Juan Carlos; RUBIANO, Néstor R. Modelación inelástica de edificios de concreto con Disipadores de energía histeréticos. *Revista de Ingeniería*, 2002, no 15, p. 30-39.
- [9] SOONG, T. T.; SPENCER, B. F. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering structures*, 2002, vol. 24, no 3, p. 243-259
- [10] WEN, Yi-Kwei. Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the engineering mechanics division*, 1976, vol. 102, no 2, p. 249-263.
- [11] <http://www.arquitecturaenacero.org/proyectos/edificios-en-altura/torre-titanium-la-portada>