

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO DE UNA EDIFICACIÓN
DE 12 PISOS, EMPLEANDO AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO Y
DISIPADORES HISTERÉTICOS.**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA
CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES

AUTOR:

Mario Eduardo Narváez Espinoza

ASESOR:

Ing. Christian Alberto Asmat Garaycochea

Abril, 2019

RESUMEN

La filosofía del diseño sismorresistente convencional señala que una estructura no debe colapsar ante un sismo severo o presentar daños que puedan repararse luego de un sismo moderado. En Perú se ha evidenciado que varias edificaciones han colapsado o aun sufrido daños irreparables luego de un evento sísmico de gran magnitud. En la actualidad existen sistemas de protección sísmica que resultan ser una alternativa para reducir los daños estructurales, siendo los más utilizados los amortiguadores de fluido viscoso y disipadores histeréticos, mismos que son dependientes de la velocidad y el desplazamiento respectivamente.

La presente tesis muestra las ventajas al emplear cada disipador mencionado anteriormente en una edificación con sistemas aporticado de 12 niveles en la ciudad de Lima. Se evaluaron las propiedades mecánicas y principios de cada disipador, así como también del comportamiento estructural bajo sollicitaciones sísmicas con periodos de retorno de 2475 años al emplearse estos dispositivos. En este caso se definió como deriva objetivo el 6%, valor que está ligado al nivel de daño moderado según datos proporcionados por Hazus ante este nivel de sismo. Además, se estudiaron las proporciones de ductilidad demandada basados en criterios del ATC-40 al emplear cada disipador y el costo de ellos.

Los resultados mostraron que la edificación junto con amortiguadores de fluido viscoso alcanza la deriva objetivo, reduciendo las derivas en un 50% aproximadamente y reduciendo la ductilidad demandada a un valor similar. Por otro lado, al emplear los disipadores histeréticos se aumentó las secciones de los elementos estructurales para acercarse a la deriva objetivo. La aplicación de los disipadores histeréticos no cumplió con el valor de deriva indicado, pero se mantiene por debajo de la deriva normativa E.030 en un escenario de sismo con periodo de retorno de 2475 años, mientras que la ductilidad demandada se reduce a un 75% de la inicial aproximadamente. También se observó que la aplicación de los disipadores histeréticos resultan ser una alternativa económica para proteger a una edificación frente a amenazas sísmicas.

ABSTRACT

The philosophy of conventional seismic-resistant design indicates that a structure should not collapse before a severe earthquake or present damage that can be repaired after a moderate earthquake. In Peru has been shown that several buildings have collapsed or even suffered irreparable damage after a big seismic event. At present there are seismic protection systems that could be an alternative to reduce structural damage, the most commonly used are viscous fluid dampers and hysterical heatsinks, which are dependent on speed and displacement respectively.

This test shows the advantages of using each heatsink mentioned above in a building with 12-level systems provided in the city of Lima. The mechanical properties and principles of each heatsink were evaluated, as well as the structural behavior under seismic requests with periods of return of 2475 years to the employer of these devices. In this case, it was defined as objective derivative 6‰, a value that is linked to the level of moderate damage according to data provided by Hazus to this level of earthquake. In addition, the required ductility ratios specified in the ATC-40 criteria when using each heatsink and the cost of them are studied.

The results obtained that the building together with viscous fluid dampers reach the target derivative, reducing the drifts by approximately 50% and reducing the demanded ductility to a similar value. By the way, when using the hysteretic heatsinks the sections of the structural elements were needed to approach the objective derivative. The application of the hysteretic heatsinks didn't comply with the indicated derivative value, but remains below the E.030 normative derivative in an earthquake scenario with a return period of 2475 years, while the demanded ductility is reduced to 75 % of the initial approximately. It was also detected that the application of hysterical heatsinks proved to be an economic alternative to protect a building against seismic threats.

AGRADECIMIENTO.

Agradezco primeramente a Dios por darme la sabiduría y las infinitas bendiciones recibidas. A mis padres por ser mi apoyo incondicional, por creer en mí y en toda mi trayectoria de formación profesional.

Así mismo a mis hermanos, por darme su amor entre risas y diferencias.

A mis tías y especialmente Nancy Narváez quien ha sido como mi segunda madre, quien con paciencia de igual forma me supo guiar y corregir, y por todo el apoyo absoluto.

De igual forma agradezco a mi tío Efraín Clavijo, quien creyó en mi e hizo posible que cumpliera esta meta.

A Michelle Iñiguez, quien me acompaña en cada paso y complementa cada locura.

Finalmente, a mi brillante asesor, quien ha sido un docente de gran calidad humana, por compartir sus conocimientos para la realización del presente trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN:.....	2
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	2
1.2.1. Objetivo general:.....	2
1.2.2. Objetivos específicos:.....	2
1.3. Alcances:.....	3
2 CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE.....	4
2.1. RIESGO SÍSMICO EN PERÚ.....	4
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL.....	6
2.2.1 Vibración Libre.....	8
2.2.2 Vibración Armónica Forzada.....	8
2.2.3 Sometido a fuerzas en forma de pulsos.....	8
2.2.4 Sistemas sometidos a los efectos de un sismo.....	8
2.3. DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA.....	12
2.4. DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA.....	14
2.5. DISIPADORES METÁLICOS TIPOS ADAS:.....	19
2.5.1. Parámetros Elásticos del Disipador ADAS:.....	19
2.5.2. Modelo de Comportamiento de histéresis de Disipador ADAS.....	22
2.5.3. Aplicación de Disipadores Metálicos ADAS.....	27
2.6. DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO.....	29
2.6.1. Comportamiento Histerético lineal y no lineal de amortiguadores de fluido viscoso. 30	
2.6.2. Aplicación de los disipadores de fluido viscoso.....	33
2.7. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.....	35
3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	38
3.1. Metodología para la selección de Disipadores de Fluido Viscoso y Disipadores metálicos ADAS.....	41
3.1.1. PROCEDIMIENTO.....	42
3.1.1.1. CONSIDERACIONES INICIALES.....	43
3.1.1.2. OBJETIVOS DE DESEMPEÑO Y NIVELES DE PELIGRO.....	43
3.1.1.3. PREDIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	46

3.1.1.4.	MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA	46
3.1.1.5.	ESTRATEGIAS DE REFORZAMIENTO	47
3.1.1.6.	DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO	48
3.1.1.7.	ACTUALIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL Y REALIZACIÓN DE ANÁLISIS	51
3.1.1.8.	COMPROBACIÓN DE LA ACEPTABILIDAD DE LA MODIFICACIÓN DE RESPUESTA	51
3.1.1.9.	REQUISITOS DE CONTROL DE CALIDAD, MANTENIMIENTO E INSPECCIÓN	52
4	CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	53
4.1.	ESTUDIO DEL CASO: DESCRIPCIÓN:	53
4.1.1.	Características de la edificación y el sistema estructural	53
4.2.	ANÁLISIS LINEAL DE LA ESTRUCTURA SIN PROTECCIÓN SÍSMICA.	54
4.2.1.	Análisis Estático	55
4.2.2.	Análisis Modal	55
4.2.3.	Análisis Dinámico Espectral	55
4.2.4.	Análisis Dinámico Tiempo – Historia.	57
4.3.	ANÁLISIS CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO.	60
4.3.1.	Análisis Modal	61
4.3.2.	Análisis Dinámico Tiempo – Historia.	61
4.4.	ANÁLISIS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS TIPO ADAS	66
4.4.1.	Análisis Modal	73
4.4.2.	Análisis Dinámico Tiempo – Historia.	73
4.5.	ANÁLISIS NO LINEAL DE LOS DISIPADORES	79
4.5.1.	Disipadores de Fluido Viscoso.	79
	DUCTILIDAD DEMANDADA	83
4.5.2.	Disipadores Histeréticos ADAS	85
	DUCTILIDAD DEMANDADA	89
4.6.	EVALUACIÓN DE COSTOS.	90
5	DISCUSIÓN Y RESULTADOS.	94
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
6.1.	Conclusiones:	102
6.2.	Recomendaciones	103
7	BIBLIOGRAFÍA	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Mapa de sismicidad de Perú entre 1900 a 2000	5
Figura 1. 2. Mapa de Zonificación sísmica (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016).....	6
Figura 2. 1. Fuerzas en sistema de 1 grado de Libertad (Chopra, 2012).....	7
Figura 2. 2. Fuerzas en sistema de 1 grado de Libertad (Chopra, 2012).....	8
Figura 2. 3. Espectro de choque con Pulso de igual área, pero de diferentes formas. (Chopra, 2012)	8
Figura 2. 4. Registro acelero gráfico Lima, Callo 1974.....	9
Figura 2. 5. (a) Aceleración del terreno; (b) respuesta de deformación de tres sistemas de 1GDL con $\zeta = 2\%$ y $T_n = 0.5, 1$ y 2 segundos; (c) espectro de respuesta de deformación para $\zeta = 2\%$. (Chopra, 2014) .	10
Figura 2. 6. Respuesta de deformación de tres sistemas de 1GDL con $\zeta = 5\%$ y $T_n = 0.5, 1$ y 2 segundos	11
Figura 2. 7. Espectros de Respuesta ($\zeta=0.05$) para el registro de El Callo, 1974 (a) Espectro de Desplazamiento, (b) Pseudo-Espectro de Velocidad, (c) Pseudo-Espectro de Aceleración.....	12
Figura 2. 8. Comportamiento del dispositivo ADAS durante un terremoto (Alehashem, Keyhani, & Pourmohammad, 2008)	14
Figura 2. 9. Comportamiento del dispositivo TADAS durante un terremoto (Alehashem, Keyhani, & Pourmohammad, 2008)	14
Figura 2. 10. Amortiguamiento Honeycomb. (Hanson et al., 1993).....	15
Figura 2. 11. Amortiguamiento por pandeo restringido. (Soong & Spencer, 2002).....	15
Figura 2. 12. Amortiguador de fricción de refuerzo X.....	16
Figura 2. 13. Amortiguador de Fluido Viscoso	16
Figura 2. 14. Disipador Viscoelástico.	16
Figura 2. 15. Esfuerzo y deformación en disipador Tipo ADAS (Segovia, 2016).....	19
Figura 2. 16. Diagrama de deformación, momento, geometría de placa y distribución de curvatura para un disipador ADAS (Heresi, 2012)	19
Figura 2. 17. Diagrama de deformación en una sección bx (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)	20
Figura 2. 18. Modelo de Ramberg-Osgood (Segovia, 2016).....	23
Figura 2. 19. Lazos histeréticos generados por el modelo de Bouc-Wen empleando diversos coeficientes (a) $\alpha=0.5 \beta=0.5$; (b) $\alpha=1.0 \beta=0.0$; (c) $\alpha=0.75 \beta=0.25$; (d) $\alpha=0.25 \beta=0.75$; (e) $\alpha=0.85 \beta=0.15$; (f) $\alpha=0.5 \beta=-0.5$; (g) $\alpha=0.3 \beta=-0.7$; (h) $\alpha=0.7 \beta=-0.3$	24
Figura 2. 20. Pórtico ensayado por Whittaker (1989).....	24
Figura 2. 21. Curvas histeréticos Whittaker (1989)	25
Figura 2. 22. Modelo Bilineal Idealizado (Aguiar et al., 2016).....	25
Figura 2. 23. Diagrama de esfuerzo en sección transversal (Aguiar et al., 2016)	26
Figura 2. 24. Distribución espacial y primer modo de vibración del edificio de San Francisco (Perry et al., 1993).....	27
Figura 2. 25. Pórticos reforzados con riostra de acero y disipadores ADAS (Perry et al., 1993)	28
Figura 2. 26. Comportamiento Histerético de un amortiguador Viscoso Lineal.....	30
Figura 2. 27. Propiedades de fuerza- velocidad de diferentes amortiguadores viscosos no lineales (Hwang, 2002).....	32
Figura 2. 28. Ciclo histerético de amortiguador viscoso no Lineal con diferente coeficiente de velocidad	33

Figura 3. 1 Procedimiento del diseño de disipadores.....	42
Figura 4. 1 Vista en Planta de Edificación	53
Figura 4. 2 Losa de Cubiertaerta	53
Figura 4. 3 Vista 3D de la edificación objeto de estudio.....	54
Figura 4. 4 Espectro de aceleraciones $R=1$	56
Figura 4. 5 Control de Deriva de la Estructura según E.030.....	56
Figura 4. 6 Sismo de Lima de 1966 en sus coordenadas E-W & N-S.....	57
Figura 4. 7 Sismo de Lima de 1991 en sus coordenadas de E-W & N-S.....	57
Figura 4. 8 Sismo de Lima de 1970 en sus coordenadas de E-W & N-S.....	58
Figura 4. 9 Sismo de Arequipa de 2001 en sus coordenadas de E-W & N-S.....	58
Figura 4. 10 Sismo de ICA de 2007 en sus coordenadas E-W & N-S	58
Figura 4. 11 Sismo de Moquegua de 2014 en sus coordenadas de E-W & N-S.....	58
Figura 4. 12 Sismo de Tacna de 2015 en sus coordenadas de E-W & N-S.....	59
Figura 4. 13 Control de Deriva para un sismo máximo considerado	59
Figura 4. 14 Distribución de los disipadores de fluido viscoso visto en planta.....	60
Figura 4. 15 Vista frontal de edificación con DFV.....	60
Figura 4. 16 Control de deriva aplicando DFV	62
Figura 4. 17 Comparación entre derivas para el a) sentido X-X y b) sentido Y-Y con DFV.....	63
Figura 4. 18 Diferencia de Cortantes en DFV en a) sentido X-X y b) sentido Y-Y.....	64
Figura 4. 19 Catálogo de DFV impuesto por Taylor Devices.....	65
Figura 4. 20 Disposición de los disipadores metálicos ADAS.....	66
Figura 4. 21 Curva histerética de ADAS para diferentes espesores	67
Figura 4. 22 Demanda de curva histerética en ADAS a) espesor de 2,5 cm y b) 4,0 cm	68
Figura 4. 23 Curva histerética de ADAS para diferente número de placas.....	69
Figura 4. 24 Demanda de curva histerética en ADAS a) 15 placas y b) 45 placas	70
Figura 4. 25 Aumento del número de arriostres.....	71
Figura 4. 26 Distribución de Disipadores metálicos ADAS.....	72
Figura 4. 27 Vista en elevación de estructura con Disipadores ADAS	73
Figura 4. 28 Deriva de estructura con disipadores metálicos ADAS.....	74
Figura 4. 29 Comparación entre derivas entre estructura original junto con ADAS	75
Figura 4. 30 Diferencia de cortantes en disipadores ADAS a) sentido X-X y b) sentido Y-Y estructura Base junto con ADAS.....	77
Figura 4. 31 Diferencia de Cortantes entre edificio Base y la edificación con aumento de secciones.....	77
Figura 4. 32 Diferencia de Cortantes para edificio de secciones aumentadas y la edificación última propuesta con ADAS.....	78
Figura 4. 33 Balance energético de 1966	79
Figura 4. 34 Balance energético de 1970	79
Figura 4. 35 Balance energético de 1991	79
Figura 4. 36 Balance energético de 2001	79
Figura 4. 37 Balance energético de 2014	80

Figura 4. 38 Balance energético de 2007	80
Figura 4. 39 Balance energético de 2015	80
Figura 4. 40 Selección de Amortiguador K78.....	81
Figura 4. 41 Curva histerética disipador K78 para registro de 1966.....	81
Figura 4. 42 Curva histerética disipador K78 para registro de 1970.....	81
Figura 4. 43 Curva histerética disipador K78 para registro de 1991.....	82
Figura 4. 44 Curva histerética disipador K78 para registro de 2001.....	82
Figura 4. 45 Curva histerética disipador K78 para registro de 2007.....	82
Figura 4. 46 Curva histerética disipador K78 para registro de 2014.....	82
Figura 4. 47 Curva histerética disipador K78 para registro de 2015.....	82
Figura 4. 48 Curva histerética incorrecta de un DFV (Díaz, 2014)	83
Figura 4. 49 Comparación de comportamiento elastoplástico perfecto de la estructura sin protección y con DFV en el sentido a) X-X y b) Y-Y.....	84
Figura 4. 50 Balance energético ADAS de 1970.....	85
Figura 4. 51 Balance energético ADAS de 1966.....	85
Figura 4. 52 Balance energético ADAS de 2001	85
Figura 4. 53 Balance energético ADAS de 1991	85
Figura 4. 54 Balance energético ADAS de 2007.....	85
Figura 4. 55 Balance energético ADAS de 2014.....	85
Figura 4. 56 Balance energético ADAS de 2015.....	86
Figura 4. 57 Selección del Link K38.....	87
Figura 4. 58 Curva Histeréticos ADAS K38 de 1966	87
Figura 4. 59 Curva Histeréticos ADAS K38 de 1970	87
Figura 4. 60 Curva Histeréticos ADAS K38 de 1991	88
Figura 4. 61 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2001	88
Figura 4. 62 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2007.....	88
Figura 4. 63 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2014	88
Figura 4. 64 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2015	88
Figura 4. 65 Comparación de comportamiento elastoplástico perfecto de la estructura sin protección y con disipadores ADAS en los sentidos a) X-X y b) Y-Y.....	90
Figura 4. 66 Comportamiento Estructura Rígida y Estructura con ADAS.....	93
Figura 5. 1 Comparación de Derivas entre DFV Vs ADAS en el a) sentido X-X y b) sentido Y-Y.....	94
Figura 5. 2 Cortante por piso de DFV en estructura base frente a ADAS en estructura modificada en el sentido a) X-X y b) sentido Y-Y.....	95
Figura 5. 3 Demanda de ductilidad en para DFV, ADAS y estructura sin Protección.....	95
Figura 5. 4 Control de Deriva: a) Diferente espesor de Placas y $n=30$ b) Diferente número de Placas y $e=3\text{cm}$	96
Figura 5. 5 Ubicación del 1er ADAS que entra en fluencia en la parte posterior de la Edificación.....	97
Figura 5. 6 Curva de deformación disipador K64 en el Pushover	98
Figura 5. 7 Curva de Pushover para el sentido horizontal.....	98

Figura 5. 8 Comparación de periodos de vibración..... 99
Figura 5. 9 Comparación entre porcentaje de Amortiguamiento..... 100



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2. 1 Dispositivos Suplementarios de disipación de energía (Hanson & Soong, 2001)</i>	17
<i>Tabla 2. 2 Identificación de disipadores de energía</i>	17
<i>Tabla 2. 3 . Ventajas y Desventajas de Disipadores Pasivos</i>	18
<i>Tabla 2. 4 Parámetros elásticos para un Disipador ADAS</i>	22
<i>Tabla 2. 5. Resumen de Parámetros de Disipador Histórico ADAS</i>	26
<i>Tabla 2. 6. Aplicación de Disipadores de Fluido Visco en el mundo. (Taylor devices inc., 2018)</i>	34
<i>Tabla 2. 7 Aplicación de DFV en el Perú</i>	35
<i>Tabla 3. 1 Estándares para protección sísmica</i>	42
<i>Tabla 3. 2 Niveles recomendados de desempeño esperados</i>	44
<i>Tabla 3. 3 Sistemas estructurales (HAZUS99, 2003)</i>	44
<i>Tabla 3. 4 Distorsiones máximas permisibles (HAZUS99, 2003)</i>	45
<i>Tabla 3. 5 Valores óptimos para α y β</i>	51
<i>Tabla 4. 1 Propiedades de los materiales</i>	54
<i>Tabla 4. 2 Cargas Consideradas.</i>	54
<i>Tabla 4. 3 Periodo fundamental estático y Fuerza cortante actuante</i>	55
<i>Tabla 4. 4 Resultados de un análisis Modal</i>	55
<i>Tabla 4. 5 Parámetros dados por la norma E.030</i>	55
<i>Tabla 4. 6 Valores determinados para Amortiguadores de fluido viscoso</i>	61
<i>Tabla 4. 7 Resultados de un análisis Modal para DFV</i>	61
<i>Tabla 4. 8 Comparación entre derivas para un DFV</i>	62
<i>Tabla 4. 9 Comparación de fuerzas cortantes con DFV vs sin Protección</i>	63
<i>Tabla 4. 10 Resumen de fuerzas axiales en disipadores</i>	64
<i>Tabla 4. 11 Disipadores Taylor requeridos mediante análisis</i>	65
<i>Tabla 4. 12 Amortiguamiento en estructura por disipadores Fluido Viscoso</i>	65
<i>Tabla 4. 13 Deriva de la estructura en un tiempo – historia variando la medida del espesor</i>	67
<i>Tabla 4. 14 Resumen de derivas para la variación de espesores</i>	67
<i>Tabla 4. 15 Deriva de la estructura en un tiempo – historia variando el número de placas</i>	69
<i>Tabla 4. 16 Resumen de derivas para la variación de número de placas</i>	70
<i>Tabla 4. 17 Deriva de la estructura en un tiempo – historia aumentando el número de arriostresy variando el número de placas significativamente</i>	71
<i>Tabla 4. 18 Resumen de derivas para la variación de número de placas</i>	71
<i>Tabla 4. 19 Dimensión de disipadores ADAS</i>	72
<i>Tabla 4. 20 Resultados de un análisis Modal para disipadores ADAS</i>	73
<i>Tabla 4. 21 Comparación entre derivas para disipadores ADAS</i>	74
<i>Tabla 4. 22 Comparación de estructura base junto a estructura con secciones aumentadas</i>	75
<i>Tabla 4. 23 Comparación de estructura con secciones aumentadas junto a estructura ultima modificada</i>	76
<i>Tabla 4. 24 Comparación de cortantes entre estructura de secciones aumentadas y ADAS</i>	76

<i>Tabla 4. 25 Comparación entre cortantes de estructura final con disipadores ADAS junto a estructura con el aumento de secciones en elementos estructurales.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4. 26 Amortiguamiento en estructura por disipadores ADAS</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4. 27 Porcentajes de disipación de energía tomada por los disipadores.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4. 28 Fuerzas Axiales máximas y desplazamientos máximos</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 4. 29 Porcentajes de disipación de energía tomada por los disipadores ADAS</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 4. 30 Fuerzas Cortantes máximas y desplazamientos máximos</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 4. 31 Costo en obra para DFV en un sismo máximo considerado</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 4. 32 Porcentaje de incidencia en obra para DFV en un sismo máximo considerado</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 4. 33 Costo en obra para ADAS en un sismo máximo considerado.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 4. 34 Costo total de adición de secciones estructurales.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4. 35 Costo total de incidencia de los ADAS + Estructura</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4. 36 Costo de estructura sumamente rígida</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 5. 1 Diferencia de Aplicación entre DFV y ADAS</i>	<i>101</i>



1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas de la ingeniería estructural, se ha ido innovando diversas técnicas de construcción y mejorando los códigos de diseño acorde a sus necesidades, con la finalidad de que las edificaciones tengan un adecuado comportamiento ante los esfuerzos laterales producidos por fuerzas externas como eventos sísmicos, viento etc. Aunque se han obtenido buenos resultados acorde a los parámetros de diseño impuesto por las normas, y por la filosofía que rige a la ingeniería sismorresistente, se ha observado que luego de un evento sísmico el costo de reparación suele ser mayor al previsto.

En base a esto, fue inminente la búsqueda de diversas técnicas en el diseño sismorresistente, las cuales ayudan a mejorar el desempeño de la estructura; tres sistemáticas propuestas surgieron durante diversas investigaciones, las mismas que pueden emplearse en conjunto o individualmente: aislamiento sísmico, disipadores de energía del tipo pasivo y los controles estructurales activos o híbridos (Constantinou, Soong, & Dargush, 1998). Estos dispositivos son la alternativa más adecuada para reducir la vulnerabilidad de las construcciones y dejar operativa a una edificación luego de eventos sísmicos u otro tipo de desastres naturales, debido al amortiguamiento adicional que se incrementa a la estructura (como el caso de los disipadores) o al disminuir las aceleraciones que ingresan a la edificación (aislamiento sísmico).

La presente investigación está dirigida a un análisis comparativo técnico-económico en dispositivos de disipación de energía del tipo pasivo. En este caso se evaluarán los disipadores histeréticos tipo ADAS que son dependientes del desplazamiento y los amortiguadores de fluido viscoso dependientes de la velocidad. Estos sistemas no requieren una fuente externa de potencia para ser activados y son los comúnmente utilizados. Los sistemas de disipación de energía tienen aproximadamente 40 años de uso. Claro ejemplo es el empleo de amortiguadores de fluido viscoso en la ciudad de México, el edificio “Torre Mayor” de 57 pisos que resistió a un terremoto de magnitud 7.6 en el año 2003 (Taylor, 2003).

En la actualidad, se siguen incorporando nuevos estudios del comportamiento sísmico de las estructuras, tanto en análisis estáticos y dinámicos, lineales y no-lineales, y aportes en su afectación económica para el empleo de estos elementos dentro de una obra civil. Un ejemplo de esto, es el estudio de “Estimación de la confiabilidad estructural de una edificación indispensable mediante análisis estáticos no lineales de Pushover” en Colombia. Esta establece que la estructura es considerada flexible por presentar derivas que varían entre el 1% y 3%, incumpliendo las recomendaciones de la norma Colombiana y otorgando a la estructura un grado de confiabilidad de 1.6, representando un riesgo inminente (Muñoz, Ruiz, Prieto, & Ramos, 2017); por todo lo antes indicado, se estudiará la influencia de los dispositivos en la

demanda sísmica del edificio, y que alternativa, aplicando la disposición chevron más disipadores de fluido viscoso y chevron más ADAS, es más “eficiente”. Permitiendo conocer las ventajas y bondades del uso entre cada tipo de dispositivos.

1.1.JUSTIFICACIÓN:

Es necesaria la formación de profesionales involucrados en el área de estructuras sismorresistente para así llevar a cabo diseños estructurales que sean capaces de mostrar una operatividad adecuada luego de ocurrido un sismo severo. Aun así, pese a los avances tecnológicos, la implementación de los disipadores de energía o aisladores continúa siendo baja debido al elevado costo que ésta pueda generar (Oviedo & Duque, 2009).

Por lo antes expuesto, es necesario incentivar el uso de disipadores y analizar su consecuencia económica, por lo cual se plantea este estudio comparativo técnico-económico donde se busca determinar la efectividad del uso de los disipadores del tipo histeréticos, los mismos que resultan más económicos que los amortiguadores de fluido viscoso (Oviedo & Duque, 2006), presentando homogeneidad en su composición.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES

1.2.1.Objetivo general:

Generar un aporte al conocimiento sobre la implementación de disipadores sísmicos pasivos, realizando un estudio comparativo técnico-económico del uso de disipadores histeréticos ADAS y amortiguadores de fluido viscoso en una edificación con estructura aporticada.

1.2.2.Objetivos específicos:

- a) Realizar el modelado de una edificación construida convencionalmente a través del uso de pórticos, evaluando su comportamiento frente a un espectro de aceleración sísmica regional.
- b) Modelar la misma estructura haciendo uso de los disipadores histeréticos y amortiguadores de fluido viscoso, evaluando su comportamiento sísmico frente al espectro de aceleración sísmica regional.
- c) Evaluar el comportamiento inelástico de los disipadores histeréticos y amortiguadores de fluido viscoso.
- d) Comprobar que la edificación cumple con las exigencias de la norma vigente (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016), mediante el uso de los disipadores del tipo histerético y amortiguadores de fluido viscoso validando el uso de estos elementos.

- e) Interpretar los resultados y de esta manera incursionar el uso de los disipadores histeréticos, realizando una evaluación económica en comparación a la alternativa de fluido viscoso

1.3. Alcances:

La edificación de estudio es una estructura de concreto armado de 11 pisos y una azotea, sin sótanos, que emplea un sistema estructural aporticado, la cual presenta secciones de columna de 50x70 cm y 50x50 cm para los 5 primeros niveles con una resistencia del concreto $f'c=350$ kg/cm², mientras que para los niveles superiores las columnas presentan dimensiones de 40x65 cm² y 45x45 cm² con una resistencia $f'c= 280$ kg/cm². Todos estos elementos presentan una resistencia del acero de 4200 kg/cm²; las dimensiones de las vigas son de 30x50 cm y 30x60 cm distribuidas de manera similar a las columnas.

Se utilizará el programa ETABS para el modelado de la estructura, en el cual se analizará la edificación manteniendo un comportamiento lineal en sus elementos. Se mantendrá constante las secciones de concreto armado junto a la implementación de los disipadores del tipo pasivo, histerético y de fluido viscoso. Para los dispositivos de protección sísmica mencionados anteriormente, se llevará a cabo un análisis no lineal a través del mismo software, evaluando la cantidad de energía que disipan ambos dispositivos, así como también el análisis de la nueva ductilidad demandada en la estructura gracias a su aplicación. El programa informático Excel será empleado en el análisis económico del edificio en el uso de estos elementos de protección sísmica, demostrándose el aporte económico que genera el uso de los disipadores de fluido viscoso e histeréticos.

2 CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

2.1. RIESGO SÍSMICO EN PERÚ

La existencia de movimientos telúricos en Latinoamérica, se debe al frecuente desplazamiento de las placas tectónicas (Oliver, Sykes, & Isacks, 1969), siendo la principal falla del tipo de subducción, donde la placa de Nazca se subduce con una velocidad de 6-7cm /año en la placa sudamericana (Khazaradze & Klotz, 2003).

Es importante mencionar la sismicidad histórica del Perú, Silgado (1978) relata los hechos destacados desde el siglo XVI hasta el siglo XX, donde describe los sismos en las ciudades más importantes. Por nombrar algunos ejemplos, tenemos al terremoto en Lima-Callao el 3 de octubre de 1974, dejando 252 fallecidos y 3600 heridos aproximadamente y el puerto del Callao totalmente afectado, el terremoto de Huacho – Lima en 1966, hubo aproximadamente 100 a 200 muertos y daños materiales que superaron los mil millones de soles. También podemos nombrar al terremoto de Pisco - Ica en el 2007 que tuvo una magnitud de 7.9° en la escala Richter, dejando a cientos de muertos y a centros hospitalarios fuera de uso. Bambarén & Alatrística (2009) demuestran la importancia y la afectación en la reparación de estas estructuras.

En la actualidad el peligro sísmico en Perú sigue siendo un tema de suma importancia a tratar. El Instituto Geofísico del Perú (IGP), ver la Figura 1.1, muestra el mapa de epicentros de sismos ocurridos en el país, entre 1964 al 2000 (IGP, 2000), donde se evidencia claramente a lo largo de la costa peruana una franja de puntos rojos que denota una zona altamente activa debido al proceso de subducción, los mismos que indican sismos superficiales con profundidad focal menores a los 60 km. Según el manual para la reducción de riesgos sísmicos de viviendas en el Perú 2016, existe un alto porcentaje de riesgo hacia los residentes de los asentamientos que rodean a Lima por norte, este, sur y oeste, debido a construcciones ilícitas o falta de reforzamiento en las viviendas (Kuroiwa, 2016).

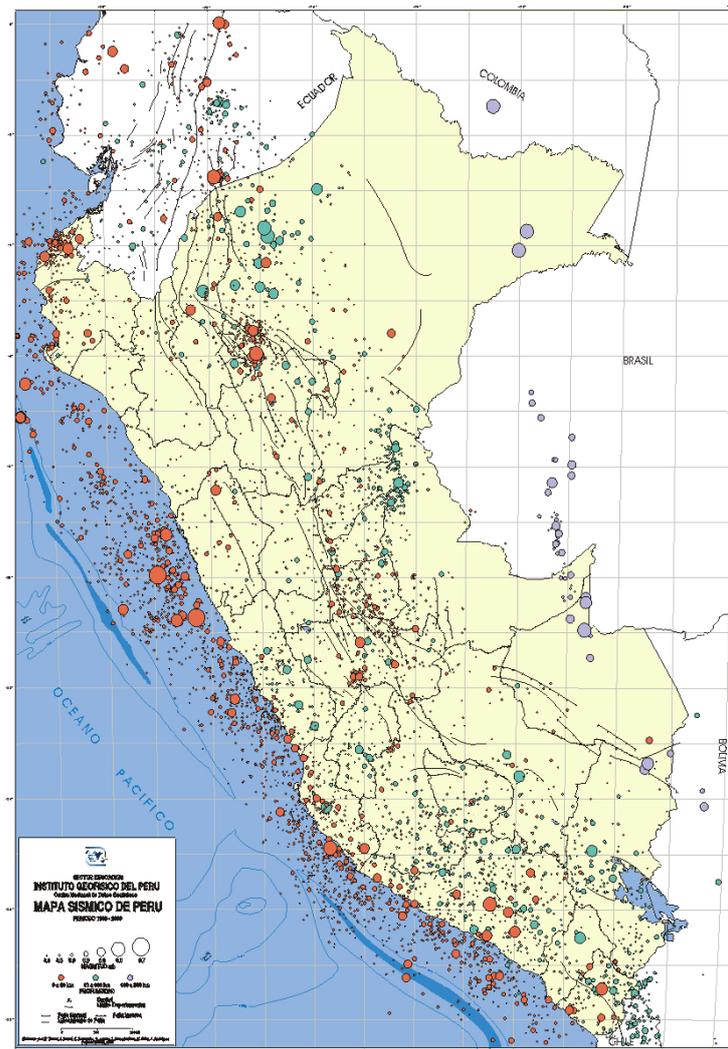


Figura 1. 1 .Mapa de sismicidad de Perú entre 1900 a 2000

De acuerdo a la gráfica anterior, en Lima se presenta una Zona de Silencio Sísmico (ZSS) que es signo de preocupación para los ingenieros que llevan a cabo diseño de estructuras, ya que no ha existido una liberación significativa de la energía acumulada entre las placas desde el sismo de 1974 aumentando la probabilidad de un terremoto más devastador.

Es por ello que, el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, ha tenido modificaciones y ha ido mejorando su norma para el diseño de estructuras sismorresistentes, y así resguardar la vida de las personas que se encuentran dentro de cualquier instalación durante un evento sísmico. Actualmente la norma E.030 ha dividido al Perú en 4 zonas para diseñar las estructuras de acuerdo al peligro sísmico. Se ha otorgado factores de importancia según el uso que se dará a la estructura, así como también factores al tipo de suelo sobre el cual se realizará la cimentación del edificio (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016). La siguiente Figura muestra la zonificación del Perú según norma E.030:



Figura 1. 2. Mapa de Zonificación sísmica (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016)

En la Figura 1.2 se observa que la zona cercana a la costa (zona 4) tiene un valor mayor por presentarse cerca de la zona de subducción, presentando un coeficiente de 0.45 veces la aceleración de la gravedad. Estos valores son usados para realizar los diseños sismorresistentes según el reglamento nacional de edificaciones.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL.

Los eventos sísmicos producen desplazamientos y aceleraciones que cambian rápidamente a lo largo de su tiempo de duración, es por ello, la importancia de estudiar el comportamiento dinámico de su naturaleza y los efectos que producen en las estructuras. La manera en que una estructura responde ante esas sollicitaciones depende exactamente de sus propiedades dinámicas, es decir, el comportamiento ante cargas cíclicas, de la duración del sismo, etc. Para poder interpretar la respuesta de la estructura frente a los movimientos telúricos, es importante conocer los principios en los que se basa la dinámica estructural. Para ello se presentan modelos idealizados simples (sistemas de un grado de libertad), representados por osciladores que tienen una masa concentrada soportada por una estructura que no tiene ni masa ni rigidez en su dirección lateral.

Se considera que cada parte del sistema estructural aporta al sistema con propiedades inerciales (relación a su masa), elásticas (relación a su rigidez) y disipación de energía (relación a su amortiguamiento).

Ante un agente externo o por una simple disposición de condiciones iniciales, la estructura opone resistencia con los agentes previamente definidos; la fuerza inercial (f_i) siendo igual al producto de su propia masa por la aceleración de la misma, la fuerza restitutiva (f_s) para un

sistema lineal elástico, siendo el producto de la rigidez por su mismo desplazamiento y finalmente la fuerza de amortiguamiento (f_d) que se considera una proporción de la velocidad del sistema (coeficiente “ c ”).

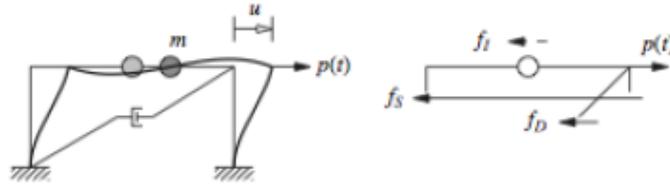


Figura 2. 1. Fuerzas en sistema de 1 grado de Libertad (Chopra, 2012)

Como se sabe, las propiedades de masa y rigidez son intrínsecas de la propia estructura, las cuales pueden ser obtenidas conociendo la composición material de la estructura, y la disposición espacial de los elementos que la constituyen, por otro lado, el coeficiente “ C ” es una idealización de cualquier tipo de amortiguamiento ya sea por fricción, deslizamiento, por corte, etc., a una disposición de amortiguamiento viscosa equivalente, es decir, que la energía disipada por estos mecanismos es la misma o igual a un amortiguador de fluido viscoso (Bozzo & Barbat, 2004).

Por último, gracias a la gráfica anterior, se puede establecer la ecuación de equilibrio dinámico para una estructura sometida a una carga externa dentro de su comportamiento elástico, la misma que tiene la forma:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = p(t) \quad (2. 1)$$

Donde la carga externa “ $p(t)$ ” está en función del tiempo.

Cabe destacar que de la misma ecuación se puede deducir la respuesta de una estructura frente a solicitaciones sísmicas, donde se considera al desplazamiento del suelo $u_g(t)$ referente a un marco fijo y un desplazamiento relativo de la estructura con respecto al suelo $u(t)$, por ultimo el desplazamiento total será la suma de estas dos componentes mencionadas.

$$u^T(t) = u_g(t) + u(t) \quad (2. 2)$$

Considerando la ecuación anterior, la ecuación de equilibrio dinámico obtiene una nueva forma, donde aparece la respuesta de la estructura frente a solicitaciones sísmicas.

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (2. 3)$$

Gracias a la expresión anterior, se puede considerar una idealización en la que una estructura obtendrá un comportamiento similar para una fuerza externa como para una solicitación sísmica.

$$p(t) = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (2. 4)$$

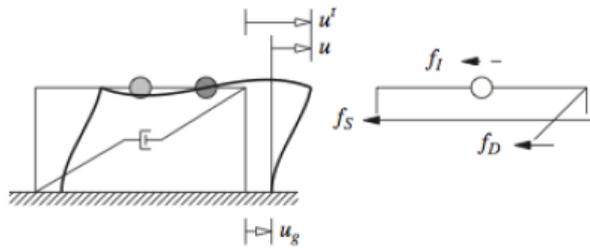


Figura 2. 2. Fuerzas en sistema de 1 grado de Libertad (Chopra, 2012)

Los sistemas de un grado de libertad podemos clasificarlos por diferentes casos, siendo estos:

2.2.1 Vibración Libre

Se considera vibración libre cuando el sistema es sometido a condiciones iniciales y luego se deja vibrar sin ningún tipo de excitación.

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = 0 \quad (2.5)$$

2.2.2 Vibración Armónica Forzada

Se considera vibración forzada cuando el sistema es sometido a una excitación externa, siendo objeto de estudio para este tipo, la aplicación de una fuerza armónica que presenta una amplitud inicial p_0 junto a una frecuencia excitadora.

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = p_0 \cdot \sin \omega \cdot t \quad (2.6)$$

2.2.3 Sometido a fuerzas en forma de pulsos

La respuesta dinámica frente a una excitación arbitraria que no obedece a ningún comportamiento periódico en función del tiempo se realiza a través del uso de métodos numéricos. Representando un comportamiento idealizado del sistema.

Es necesario acotar que, para este tipo de eventos (ejemplo de una explosión), los efectos de amortiguamiento se ignoran completamente. En la siguiente grafica se puede observar que la respuesta del sistema depende del área encerrada bajo la curva de fuerza-deformación del pulso externo.

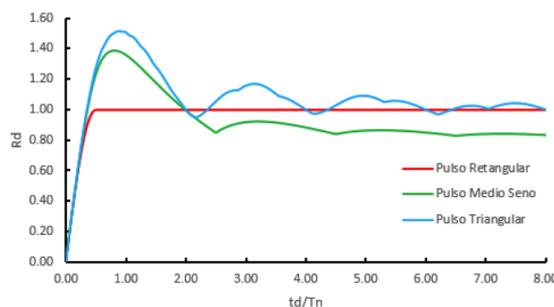


Figura 2. 3. Espectro de choque con Pulso de igual área, pero de diferentes formas. (Chopra, 2012)

2.2.4 Sistemas sometidos a los efectos de un sismo

La respuesta del sistema puede ser determinada gracias a la ecuación 2.3, donde previamente se debe conocer las propiedades del sistema (masa, rigidez y

amortiguamiento). Por ende, para que la ecuación tenga solución, basta con conocer $\ddot{u}_g(t)$. Las aceleraciones producidas por un sismo no presentan un comportamiento constante y predecible (movimiento armónico), por lo que se debe realizar lecturas de las aceleraciones en instantes de tiempo muy cortos. Basado en esto, la ciencia a lo largo de la historia ha buscado entender el comportamiento y origen de los terremotos, dando como solución los instrumentos que son capaces de medir las aceleraciones de los mismos.

Los acelerógrafos son instrumentos que fueron desarrollados en la década de 1930, siendo capaces de registrar las aceleraciones que se producen en la corteza durante un evento sísmico. Se debe mencionar que, los registros de las aceleraciones obtienen mayor precisión que los registros de desplazamientos, debido a que la integración numérica es más precisa que la derivación (Villaverde, 2009).

A continuación, la Figura 2.4 presenta el acelerograma del sismo de Lima-Callo en 1974. El registro corresponde a la componente Norte-Sur del sismo. El sismo fue registrado por la estación del Parque de la Reserva, Lima mientras que los registros numéricos obtenidos para elaborar la gráfica corresponden a un $\Delta t=0.02\text{seg}$.

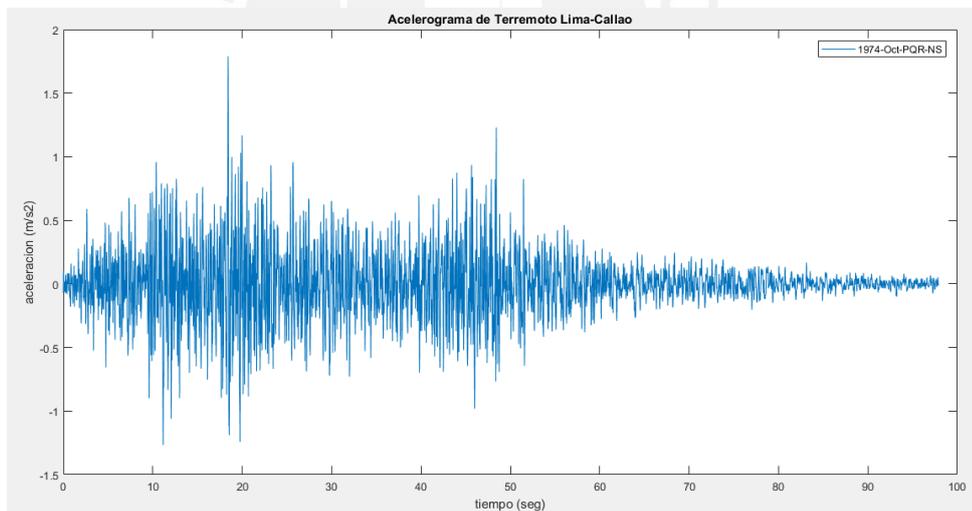


Figura 2. 4. Registro acelero gráfico Lima, Callo 1974

A partir de los registros numéricos, usualmente tomados cada 0.005, 0.010 segundos, se realiza una discretización de la excitación sísmica y así obtener la respuesta total del sistema a través de la aplicación métodos numéricos (Método de Newmark). La respuesta de vibración del sistema ante una fuerza excitadora externa depende de su periodo natural de vibración, la razón de amortiguamiento y las características del suelo. Una estructura de periodo corto tiende a vibrar a la misma frecuencia del sismo debido a su alta rigidez, mientras que una estructura de periodo largo no lo hará. Modificando

estas variables se puede obtener diferentes comportamientos estructurales y valores pico que servirán en la realización de espectros de respuesta. La Figura 2.5 muestra el comportamiento elástico de distintos osciladores de 1GDL que presentan un porcentaje de amortiguamiento constante y diferentes periodos de vibración frente a una señal sísmica.

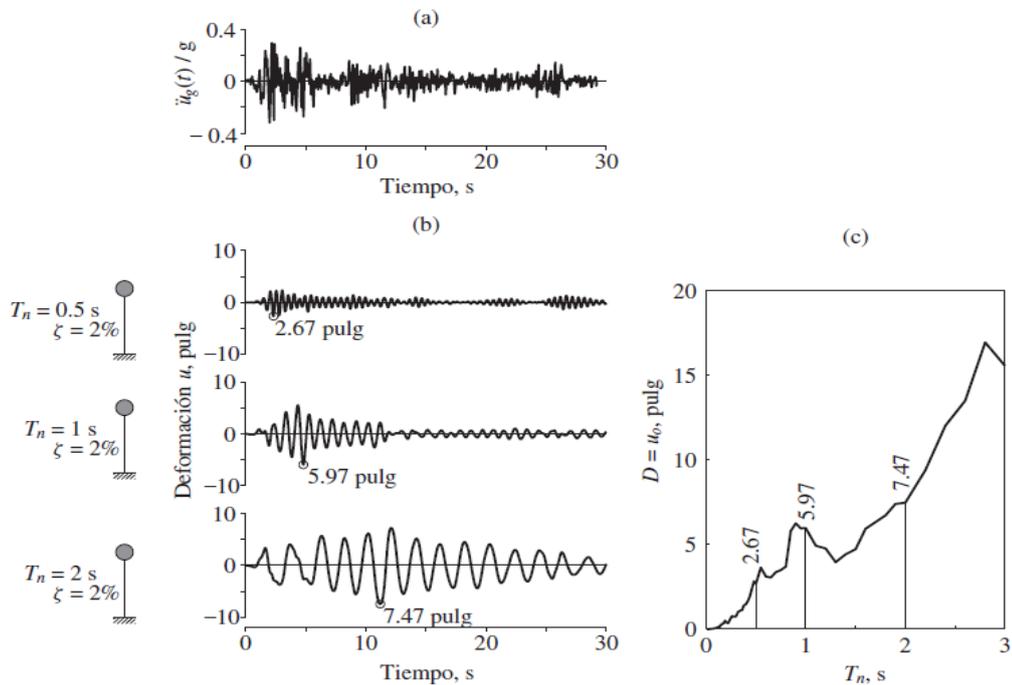


Figura 2. 5. (a) Aceleración del terreno; (b) respuesta de deformación de tres sistemas de 1GDL con $\zeta = 2\%$ y $T_n = 0.5, 1$ y 2 segundos; (c) espectro de respuesta de deformación para $\zeta = 2\%$. (Chopra, 2014)

Como se observó en la figura 2.5, el máximo desplazamiento de cada oscilador de 1GDL corresponde a un punto en el espectro de deformación de la figura 2.5 (c). Esta es la forma en la se construyen los espectros de respuesta, mismos que sirven posteriormente para el diseño de estructuras.

Haciendo la misma analogía empleando el acelerograma del sismo del Callao obtendríamos lo siguiente:

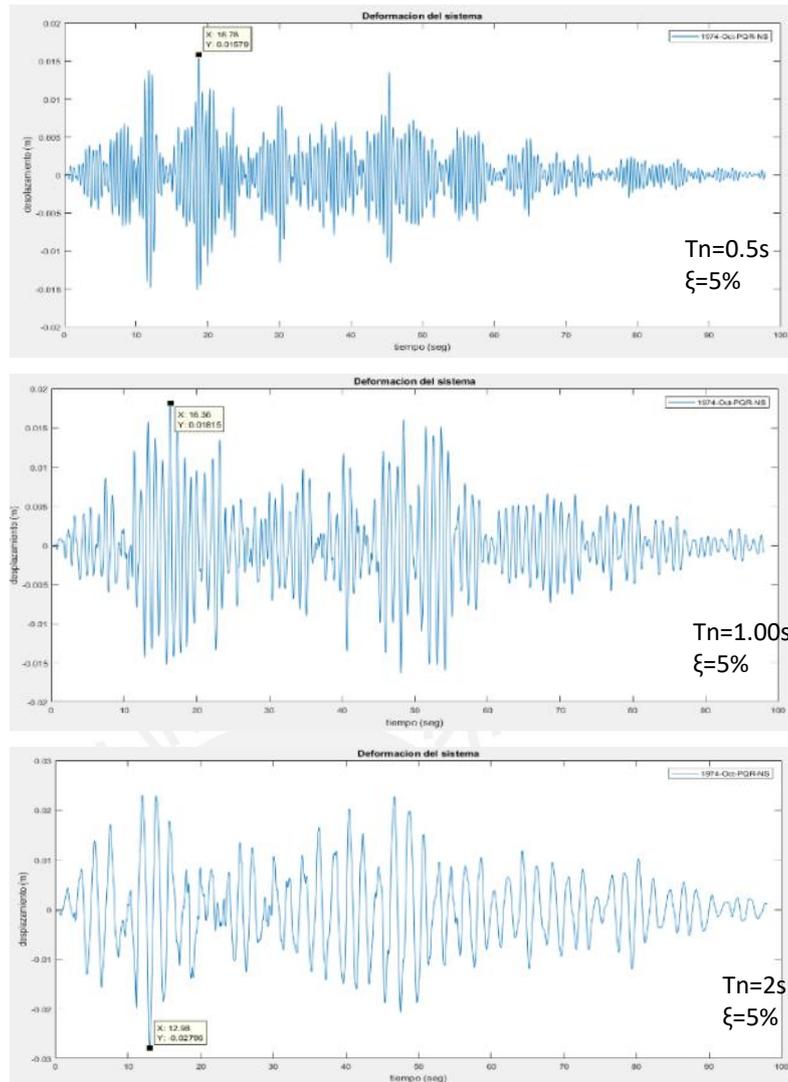


Figura 2. 6. Respuesta de deformación de tres sistemas de 1GDL con $\zeta = 5\%$ y $T_n = 0.5, 1$ y 2 segundos

La Figura 2.6 idealiza a una estructura como un oscilador de 1GDL que presenta diferentes periodos. Un periodo de vibración bajo (cerca de cero) presentará un gran número de ondas en comparación a los osciladores que poseen un periodo de vibración mayor.

El espectro de desplazamiento no es el único utilizado por los ingenieros civiles, existen además de éste, el espectro de pseudo-velocidad y pseudo-aceleración, que están ligados íntimamente con el espectro de desplazamiento. El espectro de pseudo-velocidad está ligado al máximo valor de energía de deformación del sistema, mientras que el espectro de pseudo-aceleración está ligado directamente al cortante basal de la estructura durante un sismo. Es por ello que los espectros de aceleración y velocidad son de gran utilidad para el diseño de estructuras ya que otorgan información valiosa acerca del sistema.

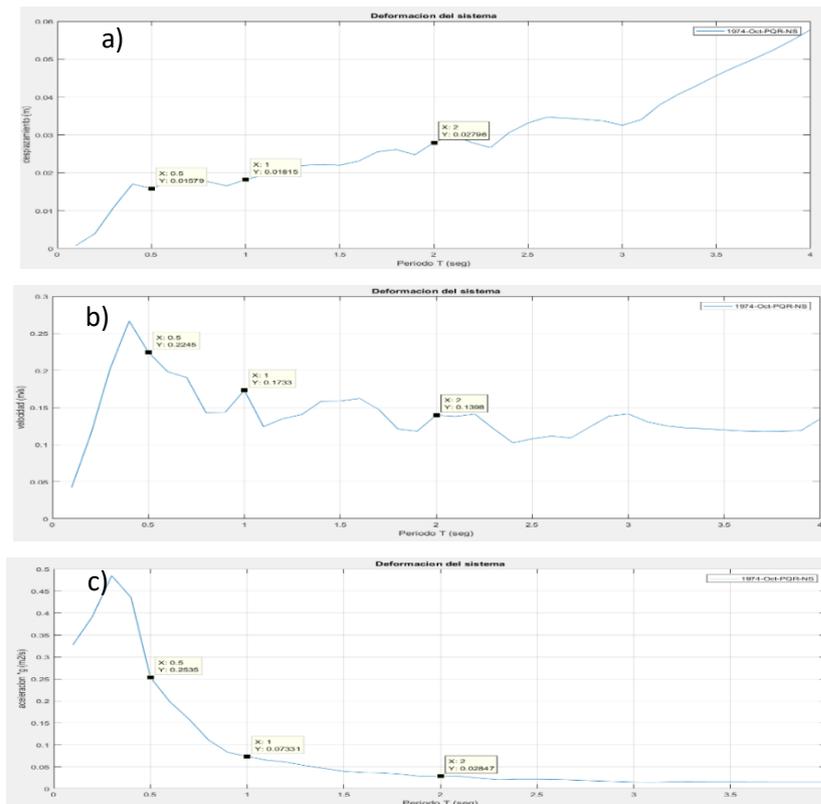


Figura 2. 7. Espectros de Respuesta ($\zeta=0.05$) para el registro de El Callo, 1974 (a) Espectro de Desplazamiento, (b) Pseudo-Espectro de Velocidad, (c) Pseudo-Espectro de Aceleración

Con la aplicación de métodos numéricos y con la señal sísmica antes mencionada, la figura 2.7 muestra los valores picos de varios osciladores de 1GDL, formando así los espectros de desplazamiento, pseudo-velocidad y pseudo-aceleración. En el diseño convencional, estos espectros son utilizados para estimar el comportamiento estructural y diseñar obras de ingeniería civil.

Por otro lado, se debe mencionar que estas estructuras son diseñadas para disipar energía mediante deformaciones inelásticas, es decir, que el sistema estructural sufrirá daño. Es importante tener en cuenta que el daño no debe ser ni tan extenso o grave para que sea irreparable, o a su vez, no resulte ser excesivamente costoso en la reparación de los mismos.

2.3.DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA.

En la actualidad, el diseño sísmico aborda dos maneras para asegurar la integridad de una estructura luego de un evento telúrico. El primero, como ya se mencionó anteriormente, es el diseño sismorresistente convencional, el cual se basa en proyectar estructuras que sean lo suficientemente rígidas, que sean capaces de deformarse e incursionar en el rango inelástico, llamándolas así estructuras dúctiles. Para lograr esto, los ingenieros combinan distintos

sistemas estructurales como los muros de corte, arriostre de marcos, etc., siendo capaces de resistir las cargas laterales que son producidas por un sismo.

La segunda forma de asegurar un sistema estructural, consiste en el uso de técnicas sismorresistentes avanzadas como el empleo de dispositivos disipadores de energía o aislamiento sísmico de base; los mismos que se adjuntan a la estructura para ayudar a disipar la energía sísmica o reducir la fuerza dinámica entrante.

Durante un sismo, existe una gran cantidad de energía que entra a la estructura, a su vez esta energía se convierte en energía cinética y potencial (energía de deformación), las mismas que deben ser disipadas a través del calor. Por lo tanto, el comportamiento de la estructura puede mejorarse, ya que, al incluir algún tipo de mecanismo, parte de esta energía será disipada y así reducirá daños en el sistema estructural. Una manera fácil de entender este principio, es observarlo a través de la relación de la conservación de la energía.

$$E_t = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (2.7)$$

Donde:

E_t =Energía total de entrada del movimiento sísmico.

E_k =Energía cinética

E_s =energía de deformación elástica

E_h = energía disipada por comportamiento inelástico (daño)

E_d = energía disipada por amortiguadores.

Es de saberse que luego de que el movimiento termina, la estructura regresa al reposo, es decir su velocidad será nula, por consiguiente $E_k = 0$, y aunque podría presentarse o no una deformación lateral, ya no existe una deformación elástica que le permita una posterior recuperación, es decir $E_s = 0$

Por lo tanto, la ecuación 2.7 pasa a ser:

$$E_h + E_d = E_t \quad (2.8)$$

Esta ecuación demuestra que parte de la energía total de ingreso a la estructura, es disipada mediante amortiguamiento y por histéresis, causante directa del daño; por ende, para proteger un sistema estructural, lo más lógico resultaría aumentar E_d a través de amortiguadores mecánicos. “En general, la adición de un sistema de disipación de energía resultará en una reducción de la distorsión y una reducción del daño (debido a la disipación de energía) y un incremento en la fuerza lateral total en la estructura debido al incremento de rigidez.” (Sarmiento & Villarreal, 2008)

La clasificación de los dispositivos de protección sísmica en primera instancia será:

- Aislamiento de base
- Disipadores de energía
- Amortiguadores de masa sintonizada

2.4.DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA

Existe una gran variedad de dispositivos disipadores de energía, los mismos que permiten disipar las vibraciones provocadas por un sismo:

2.4.1.Disipador ADAS (Added Damping and Stiffness): dispositivo formado por una serie de placas metálicas (generalmente acero ASTM grado A-36) en forma de “X”, conectadas de manera que presentan restricción en sus extremos. Durante un sismo, su deformación relativa debe aproximarse a la del entrepiso superior provocando suficiente rigidez; el movimiento relativo en la parte superior e inferior de las placas presentan una doble curvatura.

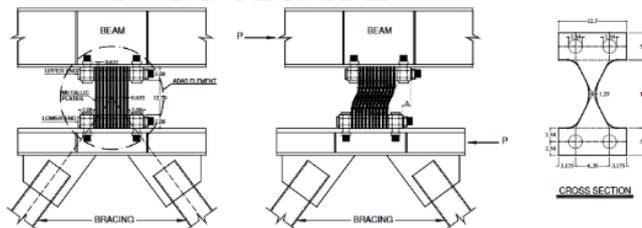


Figura 2. 8. Comportamiento del dispositivo ADAS durante un terremoto (Alehashem, Keyhani, & Pourmohammad, 2008)

Este disipador está basado en la estabilidad histerética del acero, soportando un gran número de ciclos sin degradarse. Para garantizar la efectividad, el dispositivo debe sufrir deformaciones inelásticas, de tal manera que, en toda su altura libre, obedecerá a la variación del momento flector asemejándose a una viga doblemente empotrada, de manera que las placas fluirán al mismo tiempo.

2.4.2.Disipador TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness): su comportamiento es básicamente parecido al ADAS, a excepción de que solo uno de sus bordes permanece restringido mientras que el otro extremo permanece libre a la traslación vertical. Por lo tanto, su deformación se asemeja a una viga en voladizo

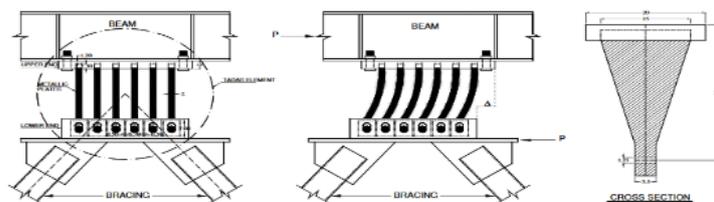


Figura 2. 9. Comportamiento del dispositivo TADAS durante un terremoto (Alehashem, Keyhani, & Pourmohammad, 2008)

Gracias a su grado de libertad, los dispositivos TADAS no sufren deformaciones producidas por cargas verticales excesiva, por lo tanto, la predicción de este elemento en su comportamiento es más adecuado (Palazzo, Francisco, & Crisafulli, 2018)

2.4.3. Sistema de Amortiguamiento “Honeycomb”: del inglés “panal de abejas” fue desarrollado por la industria japonés, y consta de una serie de placas metálicas en forma de “X” similar al ADAS, pero que se conectan lado a lado, mientras son cargadas en la dirección horizontal paralela a su plano (Hanson, Aiken, Nims, Richter, & Bachman, 1993)



Figura 2. 10. Amortiguamiento Honeycomb. (Hanson et al., 1993)

2.4.4. Barras de Pandeo restringido: estos elementos al igual que los anteriores funcionan con el mismo principio del rendimiento metálico, aunque su variación es un arriostre que trabaja a tensión/compresión y que está encerrada en un tubo de acero relleno de concreto. El comportamiento del núcleo de la placa de acero proporciona una disipación de energía estable al ceder bajo carga axial invertida, mientras que el tubo de acero relleno de hormigón que lo rodea resiste el pandeo por compresión (Soong & Spencer, 2002).

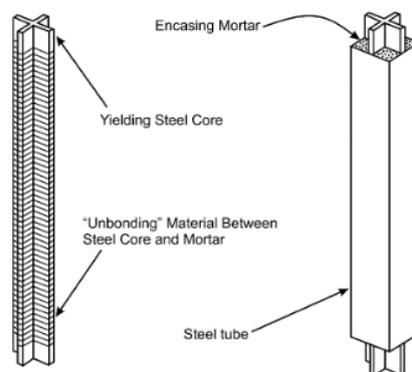


Figura 2. 11. Amortiguamiento por pandeo restringido. (Soong & Spencer, 2002).

2.4.5. Amortiguadores por fricción: como su nombre mismo lo indica, son dispositivos que funcionan mediante el deslizamiento entre dos superficies, donde la energía entrante es disipada a través de la fricción entre dos mecanismos. Estos dispositivos presentan la ventaja de disipar grandes cantidades de energía por cada ciclo histerético, aunque

las condiciones de la superficie puede variar con el tiempo, el cual pone en duda su durabilidad (Symans et al., 2008).

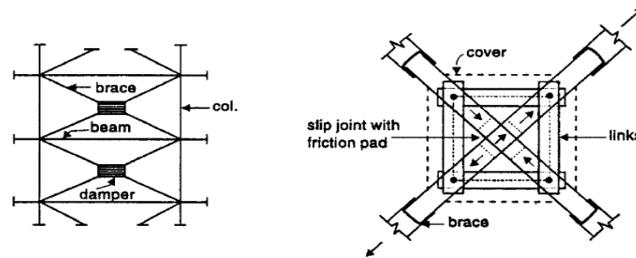


Figura 2. 12. Amortiguador de fricción de refuerzo X

2.4.6. Amortiguadores viscosos: Su mecánica es similar al comportamiento de los amortiguadores de un vehículo, el cual consiste en cilindros que se desplazan dentro un pistón embebido por un fluido altamente viscoso. Cuando este se desplaza, el fluido pasa a través de pequeños orificios de manera controlada produciéndose así la disipación de la energía

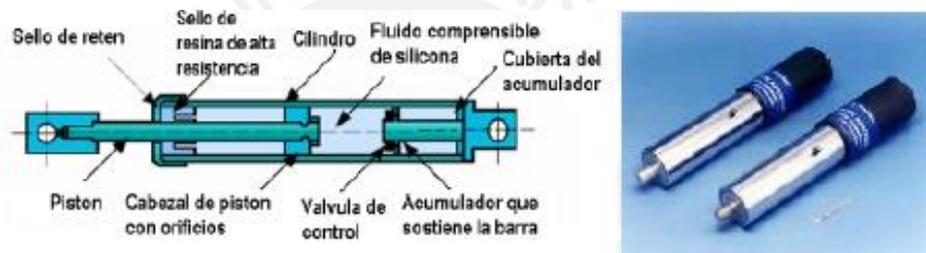


Figura 2. 13. Amortiguador de Fluido Viscoso

2.4.7. Disipadores Viscoelásticos: estos dispositivos consisten en planchas de acero, pegadas entre sí por un material viscoelástico generalmente de polímeros o sustancias vídriosas que sufre deformaciones por cortante. La cantidad de energía disipada es proporcional a la velocidad presentando la característica de que no cambia significativamente durante los periodos de vibración, idealizándose, así como un comportamiento lineal.

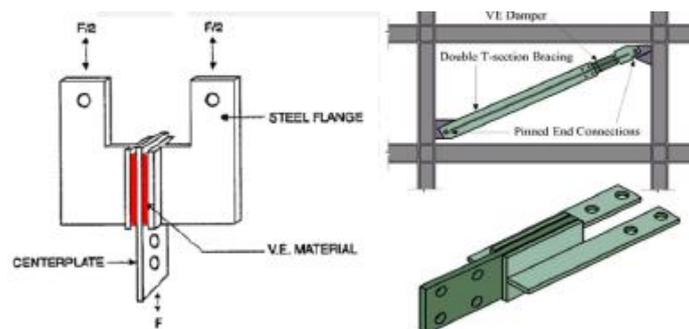


Figura 2. 14. Disipador Viscoelástico.

Todo lo anterior mostrado, se puede resumir en disipadores dependientes de la velocidad y del desplazamiento, por ende, se muestra la siguiente tabla:

Tabla 2. 1 Dispositivos Suplementarios de disipación de energía (Hanson & Soong, 2001)

Tipo	Dispositivo	Principio de Operación
Histerético	Rendimiento metálico	Fluencia de metales
	Fricción	Desplazamiento por fricción
Visco-Elástico	Visco-Elásticos solidos	Deformación de Polímeros visco-elásticos
	Viscosos and fluidos Visco-Elásticos	Deformación de fluidos viscosos u orificios de fluidos.

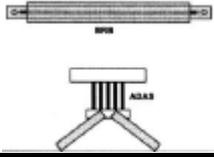
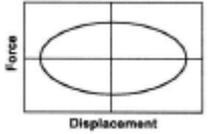
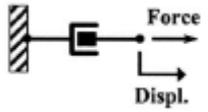
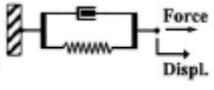
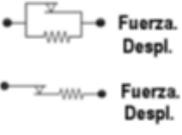
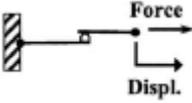
Haciendo una caracterización de los disipadores antes mostrados, se tendría a continuación lo siguiente:

Tabla 2. 2 Identificación de disipadores de energía

Principio de Operación	Disipadores de energía
Fluencia de metales	Sistema de Amortiguamiento “Honeycomb” Disipador ADAS y TADAS
Desplazamiento por fricción	Amortiguadores por fricción
Deformación de Polímeros visco-elásticos	Disipadores Viscoelásticos
Deformación de fluidos viscosos u orificios de fluidos.	Amortiguadores viscosos:

De igual manera, podemos presentar una tabla donde se presentan sus ventajas y desventajas de estos dispositivos (Symans et al., 2008)

Tabla 2. 3 . Ventajas y Desventajas de Disipadores Pasivos

	Amortiguador de Fluido Viscoso	Amortiguador viscoelástico solido	Amortiguador Metálico	Amortiguador de fricción
Esquema Básico				
Comportamiento Histerico Idealizado				
Modelo Físico Idealizado				
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Se activa con desplazamientos pequeños. -Fuerza restauradora mínima. -Para un amortiguamiento lineal, se simplifica el modelo del amortiguador. - No depende de la temperatura del ambiente ni de las frecuencias altas aplicadas. -Se ha probado ampliamente su desempeño en aplicaciones militares 	<ul style="list-style-type: none"> -Se activa a los desplazamientos pequeños - Provee fuerza restauradora - Comportamiento Lineal, simplificando así su modelación 	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamiento Histerético estable - Independiente de la temperatura y del ambiente - Material conocido por los ingenieros - Comportamiento confiable en largo periodo 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta disipación de energía por ciclo - Independiente de la temperatura del ambiente
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Posible Fuga del fluido 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad limitada de deformación - Depende de la temperatura del ambiente - Posible desprendimiento y flujo del material viscoelástico 	<ul style="list-style-type: none"> - Podría ser reemplazado luego de un sismo - Comportamiento no lineal, por lo que puede requerir análisis no Lineal 	<ul style="list-style-type: none"> - Las condiciones de la interface de deslizamiento podrían cambiar con el tiempo (relacionado con la confiabilidad). -Comportamiento No lineal muy marcado; podría requerir de un análisis no lineal – modal. -Hay desplazamientos permanentes si no actúa una fuerza restauradora.

Para fines de este proyecto el enfoque está dirigido, a los amortiguadores de fluido viscoso y a los disipadores histeréticos (ADAS), los mismos que disipan energía por medio de la velocidad y desplazamiento y son los más utilizados en el mercado de protección sísmica.

2.5. DISIPADORES METÁLICOS TIPOS ADAS:

Los disipadores histeréticos tipos ADAS, debido a la forma en X que presentan sus placas (reloj de arena), conllevan a una deformación uniforme a lo largo de toda su sección, otorgando una buena resistencia y capacidad de deformación para cargas cíclicas. A medida que la parte superior se deforma lateralmente, aplicando una fuerza perpendicular a su plano, estas placas son sometidas a esfuerzos de corte; la fuerza de corte induce a momentos de flexión a la altura de las placas, y así, esta flexión se produce en el eje débil, otorgando una doble curvatura de radios iguales (figura 2.15). Como ya se mencionó, la geometría de las placas permite que los momentos flexionantes sean distribuidos uniformemente a lo largo de la altura de la placa, produciéndose un comportamiento inelástico que es uniforme de igual manera.

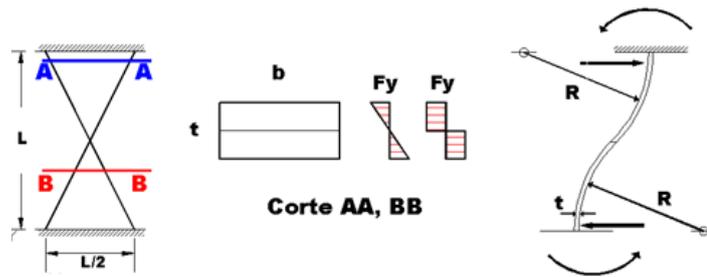


Figura 2. 15. Esfuerzo y deformación en disipador Tipo ADAS (Segovia, 2016)

2.5.1. Parámetros Elásticos del Disipador ADAS:

El cálculo para obtener los parámetros que definen al comportamiento de una placa en forma de “X” se detallan a continuación:

- Cálculo de Curvatura del Disipador

Para esta deducción se considera una placa en forma de reloj de arena, como se aprecia en la Figura 2.16, cuyo ancho (b) varía linealmente al igual que el momento M_x . Sabiendo que la parte débil de la placa se encuentra a una altura de $\frac{h}{2}$, la deducción se realizará para un $0 \leq x \leq \frac{h}{2}$, donde “ x ” se mide desde la parte inferior de la placa. Como es de suponerse, la placa es simétrica a su eje horizontal por lo que el caso será similar para $\frac{h}{2} \leq x \leq h$.

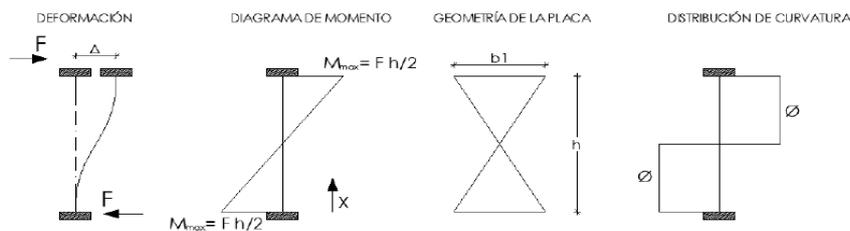


Figura 2. 16. Diagrama de deformación, momento, geometría de placa y distribución de curvatura para un disipador ADAS (Heresi, 2012)

Ecuación del Momento:

$$M_x = M_{max} \left(1 - \frac{2x}{h}\right) \quad (2.9)$$

Ecuación de la Base:

$$b_x = b_1 \left(1 - \frac{2x}{h}\right) \quad (2.10)$$

Las expresiones anteriores son tomadas de la figura 2.16 anterior, donde “b1” es el mayor ancho de la placa y “h” es la altura neta de la placa.

Recordando de resistencia de materiales, la curvatura “ ϕ_x ” es igual al momento entre su rigidez a flexión, siendo esto:

$$\phi_x = \frac{M_x}{E \cdot I_x} \quad (2.11)$$

Reemplazando 2.9 y 2.10 en la ecuación 2.11, tendremos:

$$\phi_x = \frac{M_{max} \left(1 - \frac{2x}{h}\right)}{E \cdot b_1 \left(1 - \frac{2x}{h}\right) \cdot \frac{t^3}{12}} \quad (2.12)$$

Donde “t” es el espesor de la placa.

Reduciendo términos semejantes: $\phi_x = \frac{M_{max}}{E \cdot b_1 \cdot \frac{t^3}{12}} \Rightarrow \text{constante}$

Como se aprecia la curvatura “ ϕ_x ” es constante, ya que esta no depende de la variable “x”

- Fuerza y desplazamiento del Disipador ADAS

Como siguiente punto para calcular el Momento de fluencia M_y y curvatura de fluencia ϕ_y , se elige un segmento de la placa a una altura “x”, siendo esta una sección rectangular teniendo un diagrama de deformaciones respectivo.

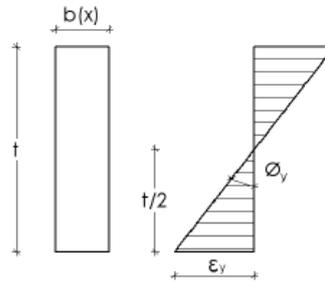


Figura 2.17. Diagrama de deformación en una sección bx (Aguilar, Rodríguez, & Mora, 2016)

Se sabe que el punto de fluencia ocurre cuando el acero llega a la fluencia f_y , la misma que esta asociada a la deformación unitaria de fluencia del acero ϵ_y (figura 2.17), por lo que la curvatura de fluencia será:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{t/2} \quad (2.13)$$

El momento de fluencia M_y es igual al esfuerzo de fluencia por el momento donde empieza la plastificación

$$M_y = f_y \cdot S_x \quad (2.14)$$

Donde:

$$S_x = b_x \cdot \frac{t^2}{6} \quad (2.15)$$

Luego, reemplazando 2.15 en 2.14, el momento de fluencia será:

$$M_y = f_y \cdot b_x \cdot \frac{t^2}{6} \quad (2.16)$$

Sabiéndose que, el momento de fluencia es máximo, cuando $b_x = b_1$

$$M_y = f_y \cdot b_1 \cdot \frac{t^2}{6} \quad (2.17)$$

Del diagrama de momentos, podemos saber que:

$$F_y = \frac{M_{y\max}}{h/2} \quad (2.18)$$

Al reemplazar al momento máximo de fluencia dentro de la fuerza de fluencia, podremos obtener lo siguiente:

$$F_y = \frac{f_y \cdot b_1 \cdot t^2}{3h} \quad (2.19)$$

La deformación de fluencia se puede calcular por la doble integración de la curvatura de fluencia:

$$\Delta_y = \iint \phi_{y(x)} \cdot dx \quad (2.20)$$

Sabiendo que la deformación de fluencia es simétrica y resolviendo la primera integral, esto será:

$$\Delta_y = 2 \int_0^{h/2} \phi_{y(x)} \cdot x \cdot dx \quad (2.21)$$

Reemplazando la curvatura de fluencia ϕ_y se determina que:

$$\begin{aligned} \Delta_y &= 2 \cdot \frac{\varepsilon_y}{t} \cdot \frac{h^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \\ \Delta_y &= \frac{\varepsilon_y \cdot h^2}{2t} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Si expresamos la función anterior en función del límite de fluencia, se tiene:

$$\begin{aligned} f_y &= E \cdot \varepsilon_y \\ \Delta_y &= \frac{f_y \cdot h^2}{2E \cdot t} \end{aligned} \quad (2.23)$$

- Rigidez Elástica De Disipador ADAS

La rigidez del disipador se la puede calcular a través de la razón entre la fuerza de fluencia y el desplazamiento de fluencia:

$$K_{DDE} = \frac{Fy}{\Delta_y} \quad (2.24)$$

Reemplazando 2.23 y 2.19 en 2.24, tendremos:

$$K_{DDE} = \frac{2 \cdot E \cdot b_1 \cdot t^3}{3h^3} \quad (2.25)$$

Todo lo calculador anteriormente, corresponde a una aproximación de los parámetros elásticos aproximados para un disipador ADAS ya que no fue considerado el ancho b_2 ubicado en el centro de la placa (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016). A continuación, se ubica una tabla con el resumen de estas aproximaciones más las ecuaciones exactas considerando el ancho b_2 (Whittaker, 1989), para ello cabe recalcar que para ambos casos se considera la presencia de “n” placas.

Tabla 2. 4 Parámetros elásticos para un Disipador ADAS

Parámetro	Aproximada	Exacta
Fuerza de Fluencia	$Fy = \frac{n \cdot fy \cdot b_1 \cdot t^2}{3h}$	$Fy = \frac{n \cdot fy \cdot b_{1eq} \cdot t^2}{3h}$
Desplazamiento de Fluencia	$\Delta_y = \frac{fy \cdot h^2}{2E \cdot t}$	$\Delta_y = \frac{fy \cdot h^2}{2E \cdot t}$
Rigidez Elástica	$K_{DE} = \frac{2 \cdot E \cdot n \cdot b_1 \cdot t^3}{3h^3}$	$K_{DE} = \frac{2 \cdot E \cdot n \cdot b_{1eq} \cdot t^3}{3h^3}$

Como es de observarse, b_{1eq} corresponde a un ancho equivalente entre los extremos, el mismo que se obtiene en función de b_1 y b_2 . Si tenemos como ejemplo un $b_1 = 0.6h$ y un $b_2 = 0.1h$, el b_{1eq} será la diferencia entre ambos, siendo este $b_{1eq} = 0.5h$

2.5.2. Modelo de Comportamiento de histéresis de Disipador ADAS

Aunque existe una variedad de modelos que representan la forma aproximada entre las relaciones de carga y descarga vs desplazamiento de cualquier elemento a analizarse, por mencionarse los más destacados son:

- Modelo de Ramberg- Osgood.

El nombre de este modelo es debido al desarrollo de los investigadores antes mencionados (Ramberg & Osgood, 1943), que representan los ciclos de histéresis de materiales dúctiles, logrando evidenciar el efecto de Bauschinger sin pérdida de rigidez (Figura 2.18). Este modelo consiste en una curva envolvente (esqueleto) mostrada por la ecuación 2.26 y su familia de curvas representada por la ecuación 2.27.

$$\frac{d}{d_y} = \frac{F}{F_y} \left(1 + \alpha \left| \frac{F}{F_y} \right|^{n-1} \right) \quad (2.26)$$

$$\frac{d - d_o}{2d_y} = \frac{F - F_o}{2F_y} \left(1 + \alpha \left| \frac{F - F_o}{2F_y} \right|^{n-1} \right) \quad (2.27)$$

Donde:

F_y= Fuerza de fluencia

D_y= desplazamiento de fluencia

α, n= coeficientes

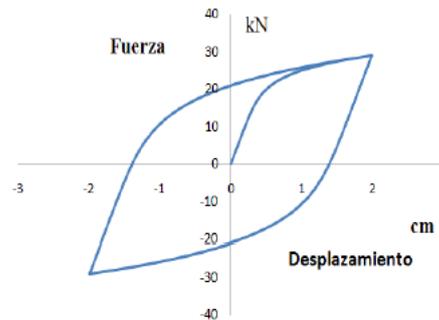


Figura 2. 18. Modelo de Ramberg-Osgood (Segovia, 2016)

Cabe mencionar que para un disipador ADAS, los coeficientes toman por valor $\alpha=1$ y $n=7$ dentro de su curva histerética

Otro modelo importante de mencionar es el de Bouc-wen, el cual se compone de una fuerza restauradora (cuya variable es el desplazamiento). La complejidad de este modelo radica en la utilización de métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial propuesta, es necesario nombrar que este modelo cumple con los estándares para determinar el comportamiento de diferentes disipadores metálicos.

$$Fr = \alpha \cdot k_1 x + (1 - \alpha) \cdot f_y \cdot z \quad (2.28)$$

Donde:

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta z \cdot |\dot{x}| \cdot |z|^{n-1} - \gamma \cdot \dot{x} \cdot |z|^n$$

A=factor de escala general.

α= Razón de proporcionalidad entre fuerza lineal/fuerza no lineal

β,γ= coeficientes de ajuste de curva

n= coeficiente que regula la suavidad de transición entre la región lineal y no lineal

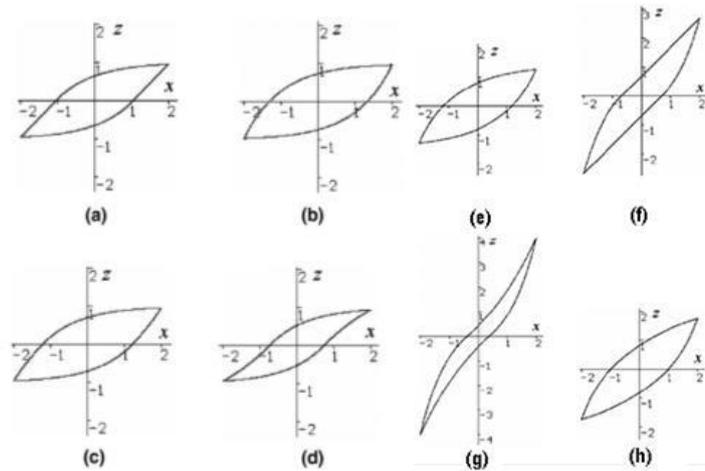


Figura 2. 19. Lazos histeréticos generados por el modelo de Bouc-Wen empleando diversos coeficientes (a) $\alpha=0.5$ $\beta=0.5$; (b) $\alpha=1.0$ $\beta=0.0$; (c) $\alpha=0.75$ $\beta=0.25$; (d) $\alpha=0.25$ $\beta=0.75$; (e) $\alpha=0.85$ $\beta=0.15$; (f) $\alpha=0.5$ $\beta=-0.5$; (g) $\alpha=0.3$ $\beta=-0.7$; (h) $\alpha=0.7$ $\beta=-0.3$

o Modelo Bilineal

Continuando con la investigación de Whittaker (1989), es posible observar el modelo bilineal antes mencionado, para esta investigación, se hizo el estudio a un pórtico de 3 niveles en la universidad de California en Berkeley (Figura 2.20), donde se implementaron disipadores ADAS en arreglo Chevron, ocupando 7 placas de acero A-36 para el primer piso, 6 para el segundo y 4 para el último.

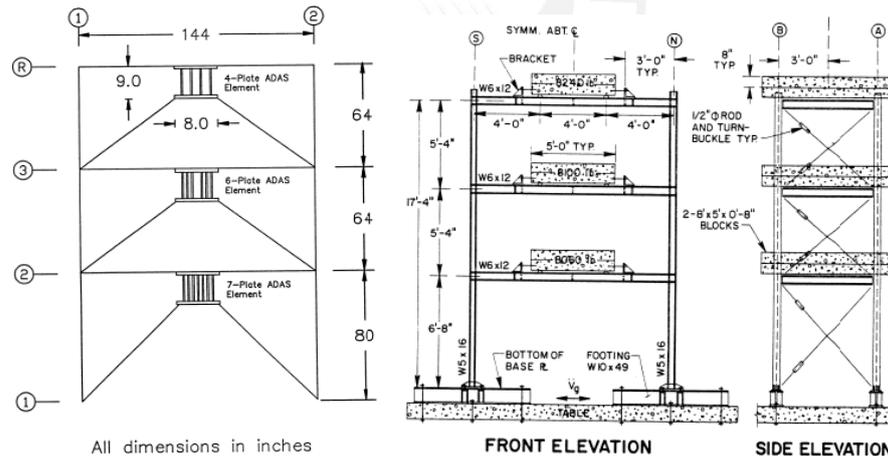


Figura 2. 20. Pórtico ensayado por Whittaker (1989)

Luego de observar el pórtico, a continuación se presenta el diagrama de histéresis del disipador del segundo piso determinado por el ensayo de Whittaker. En la Figura 2.21, se puede observar el juego de curvas correspondiente al comportamiento histerético y la envolvente a esta familia, donde se puede evidenciar claramente el comportamiento bilineal. Es así que el comportamiento de los disipadores ADAS visto desde un punto de vista sísmico-práctico, se puede considerar como un comportamiento bilineal.

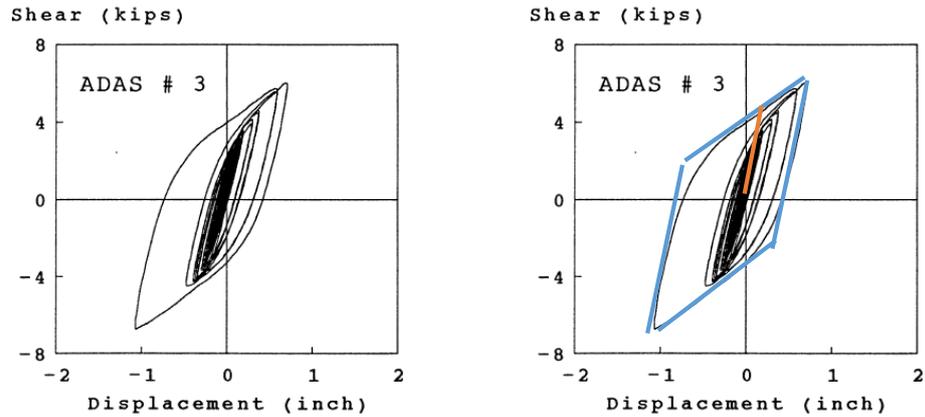


Figura 2. 21. Curvas histeréticas Whittaker (1989)

Por lo expuesto anteriormente, el modelo Bilineal, es un modelo sencillo que consta de dos factores de rigidez K_2 y K_{DDE} (Figura 2.22), el cual representa de manera adecuada al comportamiento cíclico de materiales dúctiles (acero y cobre); es importante mencionar, que en la zona de transición entre los factores rigidez, las relaciones son aproximadas ya que se considera una relación lineal cuando debería ser curva.

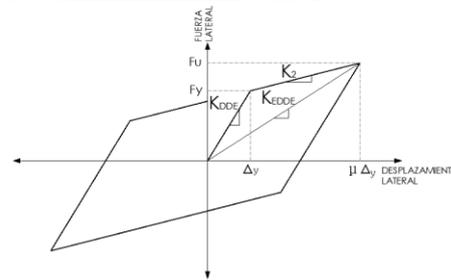


Figura 2. 22. Modelo Bilineal Idealizado (Aguir et al., 2016)

En los parámetros elásticos de un disipador ADAS, fueron deducidas las ecuaciones para el cálculo de la fuerza de fluencia, el desplazamiento de fluencia y la rigidez elástica. De la grafica anterior, se observa que falta definir la Fuerza ultima (F_u) que sería el ultimo parámetro para determinar los puntos notables de un diagrama bilineal, el cual será deducido a continuación.

- Fuerza última F_u .

Durante el momento de plastificación en un disipador ADAS, en cada uno de los puntos el esfuerzo del material es f_y , como se indica en la Figura 2.23. Bajo estas condiciones la fuerza resultante será $f_y \cdot b_x \cdot t/2$, siendo estas las que generan el momento plástico.

$$M_p = P \cdot \frac{t}{4} + P \cdot \frac{t}{4} = \frac{Pt}{2} \quad (2. 29)$$

Si reemplazamos $P = f_y \cdot b_x \cdot t/2$, obtendremos:

$$M_p = \frac{f_y \cdot b_x \cdot t^2}{4} \quad (2. 30)$$

Como sabemos que el ancho es $b_x = b_1$. Entonces:

$$M_{pmax} = \frac{f_y \cdot b_1 \cdot t^2}{4} \quad (2.31)$$

Sabiendo además que el momento máximo es producido por una fuerza última F_u por $h/2$, por lo tanto:

$$F_u \cdot \frac{h}{2} = \frac{f_y \cdot b_1 \cdot t^2}{4} \quad (2.32)$$

Por lo cual al despejar la fuerza última y para "n" placas obtendremos nuestra ecuación final

$$F_u = n \cdot \frac{f_y \cdot b_1 \cdot t^2}{2h} \quad (2.33)$$

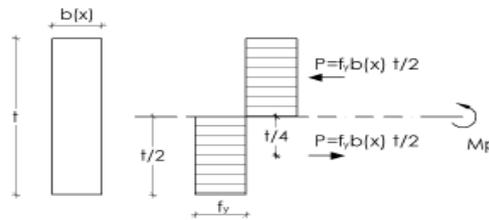


Figura 2. 23. Diagrama de esfuerzo en sección transversal (Aguilar et al., 2016)

Tabulando la información anterior se tendría lo siguiente:

Tabla 2. 5. Resumen de Parámetros de Disipador Histórico ADAS

Parámetro	ADAS
Fuerza de Fluencia	$F_y = \frac{n \cdot f_y \cdot b_{eq} \cdot t^2}{3h}$
Desplazamiento de Fluencia	$\Delta_y = \frac{f_y \cdot h^2}{2E \cdot t}$
Rigidez Elástica	$K_{DDE} = \frac{2 \cdot E \cdot n \cdot b_{eq} \cdot t^3}{3h^3}$
Fuerza Última	$F_u = n \cdot \frac{f_y \cdot b_{eq} \cdot t^2}{2h}$

Como última observación, se debe tener en cuenta que los disipadores de acero (ADAS o TADAS) tienen un desplazamiento último aproximado de 10 veces el desplazamiento de fluencia.

$$\Delta_u = \mu \Delta_y \quad (2.34)$$

Donde "μ" se le considera como a la ductilidad de los materiales. Por lo tanto, nuestra rigidez post-fluencia estará dada por:

$$K_2 = \frac{F_u - F_y}{\Delta_u - \Delta_y} \quad (2.35)$$

Por trigonometría, la rigidez efectiva será la razón entre la fuerza última y su desplazamiento último.

$$K_{EDDE} = \frac{Fu}{\Delta_u} \quad (2.36)$$

Cabe señalar que un parámetro utilizado en el prediseño de los disipadores es la constante α , siendo esta la relación entre la rigidez de post-fluencia con respecto a la rigidez elástica.

$$\alpha = \frac{K_2}{K_{DDE}} \quad (2.37)$$

Todo lo mostrado anteriormente es clara evidencia que las expresiones que definen a los puntos notables del comportamiento histerético bilineal de un disipador ADAS es parte del conocimiento teórico de la resistencia de materiales

2.5.3. Aplicación de Disipadores Metálicos ADAS

Esta clase de dispositivos de disipación de energía sísmica del tipo pasivo fue utilizada por primera vez en Estados Unidos, luego del terremoto de Loma Prieta en 1989, donde un edificio en el centro de San Francisco en California fue declarado vulnerable en el año 1991 debido a que este podría sufrir el colapso de su estructura en el caso de presentarse un nuevo sismo severo.

El edificio objeto de estudio contaba con un área de 14000 pies cuadrados, constando de dos pisos altos, y un espacio de estacionamiento subterráneo que ocupaba toda la manzana; fue construido en 1967 con columnas de concreto armado ubicadas a 27 fts de distancia. Se observó que tal estructura presentaba columnas cortas por la presencia del mezzanine, y un efecto torsional debida a la mala distribución de rigidez en planta como se muestra en la Figura 2.24.

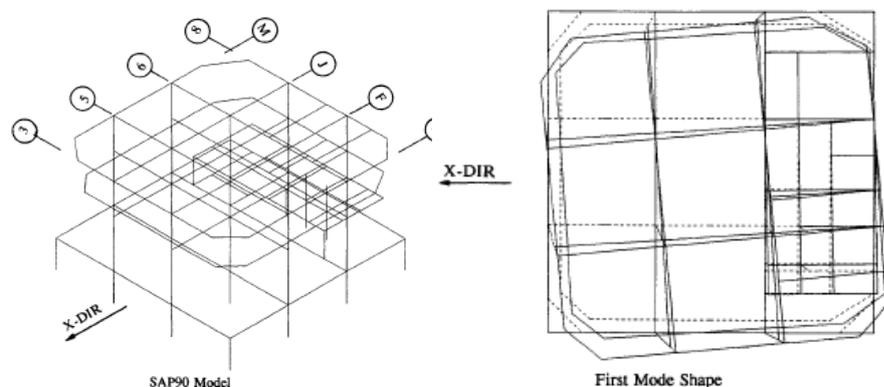


Figura 2. 24. Distribución espacial y primer modo de vibración del edificio de San Francisco (Perry et al., 1993)

Varias alternativas fueron analizadas, tales como brazos de acero convencionales o muros de corte de hormigón, los mismos que fueron considerados y rechazados a la vez por la importante demanda de construcción requerida; al final se optó por reforzar los marcos

de la estructura con arriostres diagonales de acero y dispositivos de disipación de energía tipo ADAS en configuración chevron lo cual se verifica en la Figura 2.25.

Estos disipadores consistían en 5 placas de acero de 9 plgs entre los bloques extremos, los mismos que presentaban una fuerza de 150 kips y un desplazamiento de fluencia de 0.15plgs, dando una rigidez lateral de 1000 kips/ in. (Perry, Fierro, Sedarat, & Scholl, 1993)

Es importante mencionar que este edificio requirió de consideraciones especiales ya que las normas y códigos en ese tiempo no contaban con un modo análisis o diseño para este tipo de elementos. Para ello se realizaron distintos tipos de análisis (entre ellos análisis no lineales), los cuales demostraban que el comportamiento de la estructura era estable bajo máximas deformaciones laterales.

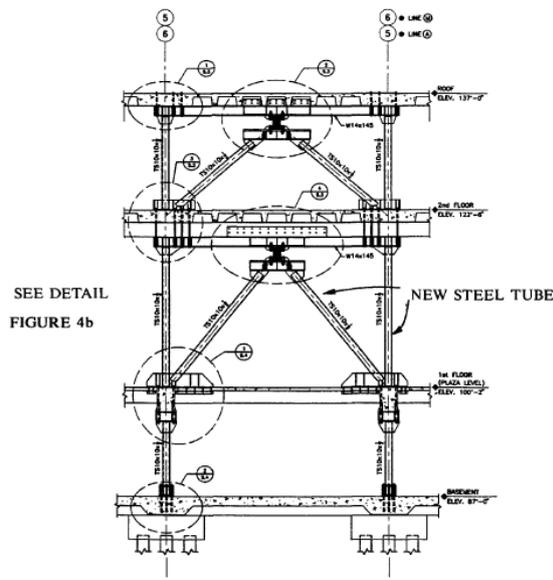


Figura 2. 25. Pórticos reforzados con riostra de acero y disipadores ADAS (Perry et al., 1993)

En México el estudio de estas técnicas de protección sísmica ya existía antes que en Estados Unidos. Esto es debido a los sismos presentados de 1985, donde se observaron grandes daños estructurales en los edificios de mediana altura, por lo cual surgió la necesidad de incursionar en el control de la respuesta sísmica de edificaciones dirigido especialmente a los dispositivos de disipación sísmica del tipo pasivo.

En la “Reestructuración Sísmica De Un Edificio En La Ciudad De México Con Sistemas De Disipadores ADAS”, Vargas, Gómez, & Tena-Colunga, (1994), menciona que para esa fecha en México existen dos edificios reestructurados con dispositivos disipadores ADAS según Martínez Romero (1993); mientras que el inmueble objeto de estudio, aunque no resultó con daños aparentemente graves luego de aquel sismo, debió ser reestructurado por no cumplir con los requerimientos a la norma RCDF-93. En la descripción de la edificación de 12 niveles se detalla que la estructura estaba formada por

un cuerpo central y dos laterales separados por juntas constructivas, donde el material predominante fue un concreto de $f'c=280\text{Kg/cm}^2$ y un acero de $f_y=2108\text{ kg/cm}^2$. Este edificio regular con una planta de 60m de largo por 20m de ancho utilizaba columnas rectangulares, cuadradas o circulares donde sus dimensiones variaban entre 40x115 cm y de 85x85cm en planta baja a 40x40cm en el último piso y de 110 y 85 cm de diámetro en planta baja a 45 cm en el último piso, cambiando de sección cada dos pisos típicamente. Mediante varios análisis se corroboró que el inmueble debería ser reforzado por no cumplir con el especificado en las Normas Técnicas Complementarias (NTC-1987); por lo cual se propuso la utilización de disipadores ADAS, las mismas que ayudan a incrementar la rigidez, la capacidad sismo-resistente y la distribución de energía de los sistemas estructurales.

Las dimensiones de las placas (ADAS) aunque no se proporcionan con precisión por razones de patentes, se sabe que los peraltes de sus gargantas varían entre 5" y 14.5", sus espesores son de 0.75" a 1.5" mientras que el número de placas por dispositivo era de 3 a 8. Estos dispositivos estaban conectados a las columnas por arriostres metálicos en forma de V invertida y un par de vigas I que les brindan sus condiciones de apoyo en el centro del claro de las crujías. De igual manera que el caso del edificio de San Francisco de EEUU, a esta edificación se le aplicaron análisis lineales y no lineales para determinar su comportamiento estructural.

En Perú la mayor parte de edificaciones son protegidos con disipadores de fluido viscoso, esto es debido a la alta rigidez con la que se construyen las estructuras para evitar grandes desplazamientos de entrepiso, aunque existen también unos pocos que presentan disipadores metálicos, como el edificio Barlovento o la Torre Orquídeas que utilizan disipadores TADAS. U otras edificaciones que emplean dispositivos tipo SLB como los departamentos de odontología USMP o la planta embotelladora-Lindley.

2.6.DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

El control de las vibraciones a través de material viscoso ha sido empleado por varias décadas tanto en estructuras aeroespaciales o aeronáuticas. Sin embargo, en las estructuras de ingeniería civil, los primeros amortiguadores Viscoelásticos fueron usados en 1969, donde 10 000 disipadores fueron empleados en las torres gemelas, los mismos que ayudaban a reducir las fuerzas causadas por el viento (Mahmoodi, Robertson, Yontar, Moy, & Feld, 1987).

Luego de eso, los amortiguadores de fluido viscoso y los Viscoelásticos han sido implementados en las estructuras para reducir el daño ante sollicitaciones sísmicas o de viento. En esta sección, se discutirá el comportamiento de estructuras equipadas con amortiguadores de fluido viscoso bajo circunstancias sísmicas.

2.6.1. Comportamiento Histerético lineal y no lineal de amortiguadores de fluido viscoso.

- Amortiguador viscoso Lineal.

Como primer punto, se considera un elemento viscoso puro, el mismo que está sujeto a un desplazamiento relativo al tiempo dado por:

$$x(t) = X_o \cdot \sin \omega \cdot t \quad (2.38)$$

Del cual, X_o se conoce como el desplazamiento de amplitud entre los extremos del elemento y ω corresponde a la fuerza de frecuencia circular. La fuerza axial $F(t)$ inducida al elemento es directamente proporcional a la velocidad relativa entre estos extremos.

$$F(t) = C_L \cdot \dot{x}(t) \quad (2.39)$$

Donde:

C_L : es la constante de amortiguamiento Lineal.

Si se reemplaza la ecuación 2.38 en la ecuación 2.39 obtendremos:

$$F(t) = C_L \cdot \omega \cdot X_o \cdot \cos \omega \cdot t \quad (2.40)$$

A través de las bases trigonométricas, se sabe:

$$\cos \omega \cdot t = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \omega \cdot t}$$

Si se hace el reemplazo respectivo de la identidad trigonométrica anterior, en la ecuación 2.40 se tendrá la ecuación que determina el comportamiento histerético lineal de un amortiguamiento viscoso.

$$\frac{F(t)}{C_L \cdot \omega \cdot X_o} = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{X_o}\right)^2} \quad (2.41)$$

Este comportamiento se puede visualizar en la siguiente Figura 2.26.

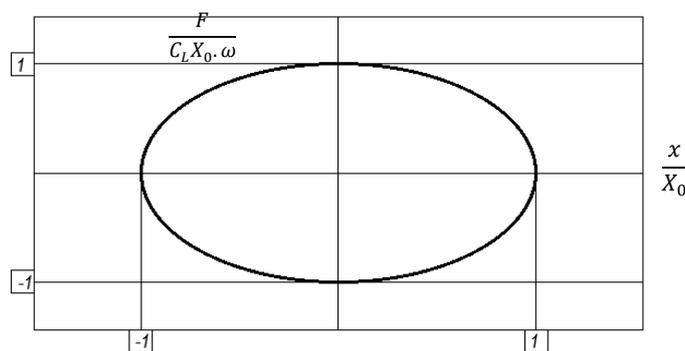


Figura 2. 26. Comportamiento Histerético de un amortiguador Viscoso Lineal

La amplitud de la máxima fuerza inducida en un amortiguador viscoso del tipo lineal es directamente proporcional a la frecuencia de excitación, al desplazamiento y a la constante de amortiguamiento. Además, la máxima fuerza en un amortiguador viscoso del tipo lineal ocurre cuando su desplazamiento es nulo; es decir, las fuerzas generadas por un amortiguador viscoso lineal en una estructura son desfasadas a las fuerzas

generadas por el sistema estructural, lo cual presenta una gran ventaja sobre los de comportamiento histerético, los mismos que generan su máxima fuerza cuando el sistema estructural alcanza su máximo desplazamiento.

La energía disipada por el amortiguador viscoso del tipo lineal en cada ciclo E_{vd} es el área encerrada por la curva de fuerza vs desplazamiento. Siendo esta de la siguiente manera.

$$E_{vd} = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F(t) \cdot \dot{x}(t) \cdot dt$$

$$E_{vd} = C_L \cdot \pi \cdot \omega \cdot X_0^2 \quad (2.42)$$

La energía disipada por cada ciclo es directamente proporcional a la constante de amortiguamiento, a la excitación de frecuencia y a su vez proporcional al cuadrado de su amplitud de desplazamiento.

o Amortiguador viscoso no Lineal.

Los amortiguadores de fluido viscoso pueden ser diseñados para comportarse como elementos viscosos no lineales a través del ajuste de su aceite de silicona y de los orificios por el que transita este fluido. La principal ventaja de los amortiguadores viscosos no lineales es que, en el instante de su velocidad pico, la fuerza dentro del amortiguador es controlada para evitar la sobrecarga en su sistema o a su vez para proteger el sistema de arriostamiento.

La fuerza axial desarrollada por un amortiguador viscoso no lineal $F(t)$ es expresada mediante:

$$F(t) = C_{NL} \cdot \text{sgn}(\dot{x}(t)) \cdot |\dot{x}(t)|^{\alpha_{vd}} \quad (2.43)$$

Donde:

C_{NL} : Constante de amortiguamiento no lineal

α_{vd} : coeficiente de velocidad (0.2 – 1.0)

$\text{sgn}(\dot{x}(t))$: función signo

Cabe mencionar que cuando $\alpha_{vd}=1$, el dispositivo actúa como un amortiguador viscoso del tipo lineal como se presentó en la ecuación 2.39; por otro lado, cuando el coeficiente de velocidad es mayor a 1, el dispositivo actúa como un elemento de transmisión o bloqueo, desarrollando así, grandes fuerzas a altas velocidades. Las unidades de bloqueo pueden utilizarse para acoplar múltiples elementos de una estructura que son resistentes a las cargas laterales, sirviendo como ejemplo, los tramos adyacentes de un puente, durante un evento sísmico.

La mejor manera de visualizar la ventaja de los amortiguadores viscosos no lineales con un coeficiente de velocidad menor a uno se presenta en la siguiente Figura, donde se observa claramente la reducción de fuerzas de amortiguamiento a altas velocidades.

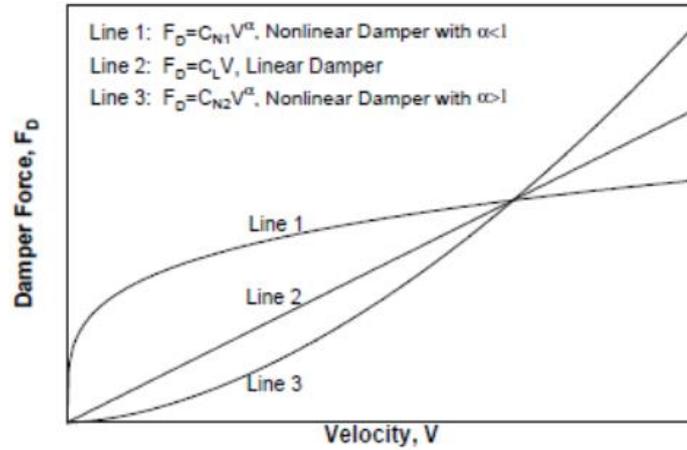


Figura 2. 27. Propiedades de fuerza- velocidad de diferentes amortiguadores viscosos no lineales(Hwang, 2002)

Considerando el amortiguador que presenta un coeficiente de velocidad menor a 1, sujeto a un desplazamiento armónico relativo tiempo-historia presentador por $x(t)$ (ecuación 2.38), obtendremos nuestra fuerza axial en función a las amplitudes de este desplazamiento.

$$F(t) = C_{NL} \cdot \text{sgn}(\cos \omega \cdot t) \cdot |\omega \cdot X_o \cdot \cos \omega \cdot t|^{\alpha_{vd}} \quad (2.44)$$

Si sustituimos la ecuación de identidad trigonométrica del coseno en la ecuación 2.44, se obtiene la relación fuerza-desplazamiento para un amortiguador viscoso no lineal.

$$\frac{F}{C_{NL}(X_o \cdot \omega)^{\alpha_{vd}}} = \pm \left(1 - \left(\frac{x(t)}{X_o} \right)^2 \right)^{\frac{\alpha_{vd}}{2}} \quad (2.45)$$

Los ciclos histeréticos descritos por la ecuación 2.45 se visualizan mejor en la Figura 2.28 para 3 diferentes coeficientes de velocidad. A pesar de que las fuerzas en el amortiguador viscoso no lineal permanecen desfasadas de las fuerzas desarrolladas por el sistema estructural, la respuesta cíclica del amortiguador no lineal se aproxima a una forma rectangular para las relaciones de fuerza vs desplazamiento a medida que el coeficiente de velocidad va disminuyendo. Sin embargo, es importante mencionar, que la amplitud inducida por una máxima fuerza en el amortiguador viscoso no lineal permanece directamente proporcional a la constante de amortiguamiento no lineal, la excitación de frecuencia y las amplitudes de los desplazamientos.

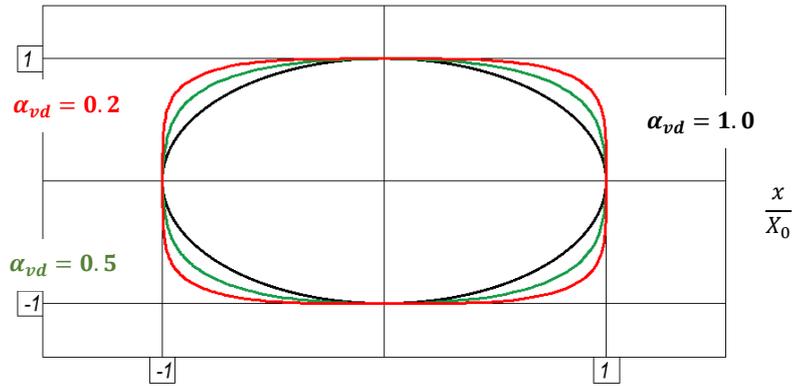


Figura 2. 28. Ciclo histerético de amortiguador viscoso no Lineal con diferente coeficiente de velocidad
 La energía disipada por el amortiguador viscoso no lineal para cada ciclo histerético será el área encerrada por la curva de fuerza vs desplazamiento.

$$E_{vd} = \int_0^{2\pi} \frac{2\pi}{\omega} F(t) \cdot \dot{x}(t) \cdot dt$$

$$E_{vd} = 2\sqrt{\pi} \cdot C_{NL} \cdot (X_0)^{\alpha_{vd}+1} \omega^{\alpha_{vd}} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{\alpha_{vd}}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{2} + \frac{\alpha_{vd}}{2}\right)} \quad (2.46)$$

Donde:

Γ : es la función gamma

2.6.2. Aplicación de los disipadores de fluido viscoso.

En las últimas décadas se han realizado investigaciones en la aplicación de los disipadores de fluido viscoso; hasta fines de los años 80 estos dispositivos eran de uso exclusivo del gobierno americano para la industria militar; el uso de estos disipadores sobre estructuras netamente de ingeniería civil empezó en 1993, en la aplicación sobre el Centro Médico San Bernardino, el cual posee 5 edificios y está ubicado al este de Los Ángeles, California, donde se colocaron 186 disipadores de fluido viscoso administrados por el empresa “Taylor Devices INC” (Avilés, 2001).

Los disipadores de energía de Fluido Viscoso Taylor han sido empleados tanto en la construcción de edificios nuevos o en la restauración de otros, además de su aplicación en obras civiles de puentes y estadios. Un ejemplo importante de mencionar es el de la ciudad de México, donde se emplearon 98 disipadores en la construcción de la Torre Mayor, tratándose de un edificio esbelto de 57 niveles y 225m de altura. (Tena-Colunga, 2003).

A manera de ejemplo, se presenta una tabla de diferentes estructuras en diferentes países que poseen disipadores de fluido viscoso:

Tabla 2. 6. Aplicación de Disipadores de Fluido Visco en el mundo. (Taylor devices inc., 2018)

Estructura	Ciudad / País	Datos de los dispositivos	Año de instalación	Información Adicional
Centro Cívico de San Francisco	San Francisco - USA	Total: 292 100 ton 55 ton	1997	Edificio de oficinas gubernamentales de 80,000 metros cuadrados con amortiguadores en elementos de refuerzo diagonales para disipar la energía sísmica
Estación de Tren	Beijing - China	Total: 32 130 ton	1999	Reforzamiento de una estación de ferrocarril. Amortiguadores utilizados en elementos de refuerzo de chevron para disipar la energía del terremoto
Puente Amolanas	Santiago - Chile	Total: 4 300 ton	2000	El nuevo puente utiliza amortiguadores para absorber la energía sísmica, reducir el movimiento y distribuir fuerzas mientras permite el movimiento térmico libre
Edificio de la compañía internacional/computadoras	Taipéi - Taiwán	Total: 144 26.6 ton 43.4 ton 58.3 ton 135 ton	2001	Nueva construcción, edificio de 14 pisos que usa amortiguadores para disipar la energía del terremoto. Edificio del primo a Taishin Bank.
Torre Mayor	México - México	Total: 98 570 ton 280 ton	2002	La nueva torre de oficinas / hoteles de gran altura de 55 pisos, 1 helipuerto con una altura de 225mts.

Tena-Colunga (2003) comenta otros casos similares en la utilización de disipadores pasivos de energía en la ciudad de México. De igual manera hace un hincapié que desde el punto de vista del comportamiento estructural global para edificios sobre terreno blando, el uso de los disipadores representa un alto costo para los inversionistas. Varios estudios (Sarmiento & Villarreal, 2008) sugieren que, la inversión inicial representada en la instalación de los disipadores, se compensa con los ahorros derivados para mantener operativa a toda una estructura y disminuir sus costos en la reparación luego de un evento sísmico. A pesar de esto, tanto en México como otros países de Latinoamérica son pocos los inversionistas que toman en cuenta las consecuencias a largo plazo y basan sus criterios solamente considerando los costos iniciales de construcción.

Debido a su peligro sísmico, Chile ha sido uno de los pocos países en Latinoamérica en incorporar disipadores sísmicos y aislamiento de base. Además, su propia norma de la construcción (NCh2745) incorpora pautas y formulaciones para el diseño de estos dispositivos (M. Herrera, 2018). En la actualidad, dentro de su constitución se han

construido un número considerable de edificios con aislamiento de base y disipadores sísmicos.

En el Perú existen edificaciones con protección sísmica, a pesar que de la norma E.030 no otorgue recomendación alguna en el diseño de estos elementos; a manera de ejemplo y el caso más conocido, es la aplicación de amortiguadores de fluido viscoso en la torre del Aeropuerto internacional Jorge Chávez, donde se emplearon 56 dispositivos. A continuación, se muestra una tabla de manera resumida donde se han empleado estos dispositivos dentro del territorio peruano.

Tabla 2. 7 Aplicación de DFV en el Perú

Estructura	Numero de Dispositivos	Año de instalación	Ubicación
Aeropuerto Internacional Jorge Chávez	56	2006	Lima
El Quinde del Ica	14	2015	Ica
Banco de la Nación	16	2014	Lima
Edificio T Tower	22	2016	Lima
Edificio Gerpal	30	2014	Lima
Hotel Costa Sol	16	2013	Lima
Nueva sede SUNAT	24	2016	Lima
Centro Empresarial Panorama Plaza Negocios	78	2012	Lima
C.C. San Miguel	50	2014	Lima
Edificio Seguros Pacífico	48	2015	Lima

Sin importar las ventajas o desventajas en la inclusión de estos dispositivos (amortiguadores de fluido viscoso o metálicos) en los diseños de edificaciones u otro tipo de estructura civil, lo ideal es comparar costos para una solución apropiada desde el punto de vista económico, el mismo que puede variar en cada caso particular donde se evalúe distintos tipos de diseños.

2.7. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Con el fin de determinar las ventajas o desventajas en la inclusión de dispositivos de disipación de energía, lo más adecuado es comparar los costos de las soluciones con y sin dispositivos de respuesta pasiva. Consecuentemente, el resultado óptimo será aquel que tenga una solución apropiada desde un punto de vista económico, aunque ese resultado puede variar en cada caso particular.

Generalmente un diseño económico se traduce como el máximo ahorro durante el proceso de construcción, y es aquí donde se obvia la protección sísmica que se puede otorgar a la estructura mediante dispositivos de respuesta pasiva, que a su vez pueden compensarse en el ahorro gastos de reparación o interrupción de negocios luego de desarrollarse un evento sísmico de gran magnitud.

Cada estructura tiene características y restricciones únicas que el equipo de diseño tiene que investigar cuidadosamente, con el fin de determinar qué tipo de sistema de amortiguamiento puede alcanzar el mejor rendimiento en términos de costo, cronograma de construcción, etc. Para la evaluación de implementación de un sistema de modificación dinámica se debe considerar lo siguiente (Lago, Trabucco, & Wood, 2019):

- Fuente de la excitación dinámica
- Comportamiento de la estructura
- Interacción amortiguador-estructura
- Espacio disponible de implementación
- Material de construcción, método y cronograma
- Capacidades de elevación en sitio durante la instalación
- Requisitos de mantenimiento e inspección

Además de esto, los costos de los dispositivos de amortiguamiento se pueden dividir en cuatro categorías (Tse, Kwok, & Tamura, 2012)

- Diseño y estudio de viabilidad
- Adquisición de componentes mecánicos y de fabricación
- Instalación in situ y puesta de marcha en obra
- El mantenimiento del sistema durante un periodo de tiempo.

En las últimas décadas, varias investigaciones han desarrollado tecnologías para controlar la respuesta de las estructuras frente a un sismo, aunque existe una gran variedad de estudios sobre el comportamiento de las estructuras implementadas con aisladores y disipadores de energía, son pocas las aplicaciones debido a la falta de normas en la materia y a la carencia de investigación para reducir costos (R. Herrera & Carboney, 2005).

Últimamente en los países Latinoamericanos se empieza a incursionar en los disipadores de energía del tipo pasivo por medio de la fluencia de dispositivos metálicos (Cano & Zumaeta, 2012), y en la determinación de parámetros para su diseño por medio de la histéresis (Colunga, 2017) evidenciando el ahorro económico que estos presentan, fabricándose de diversas formas y configuraciones con placas de acero (Sarmiento & Villarreal, 2008).

Generalmente los dispositivos que dependen del desplazamiento son menos costosos que aquellos que dependen de la velocidad (Liang, Lee, Dargush, & Song, 2012). Un factor importante en los costos de implementación de estos dispositivos es la disponibilidad que se tenga en la zona a desarrollarse la actividad. Además de esto, los dispositivos dependientes del desplazamiento suelen ser reemplazados después de un evento sísmico importante, representando un costo adicional en la producción de dispositivos metálicos para la protección sísmica de una estructura. Por otro lado, también deben considerarse los costos de reparación e interrupción de negocios por no contar con un buen sistema de protección sísmica.

Los disipadores dependientes del desplazamiento (comportamiento bilineal), no son los dispositivos más efectivos a diferencia de los amortiguadores dependientes de la velocidad (amortiguadores de fluido viscoso), sin embargo, como se demostró en capítulos anteriores estos han sido utilizados para la protección de estructuras contra terremotos. Pese a ello, los disipadores metálicos pierden su efectividad para excitaciones inducidas por el viento y tráfico, ya que la durabilidad de los dispositivos bilineales no es tan buena como los disipadores de fluido viscoso. Por lo cual se recomienda la utilización de disipadores de comportamiento bilineal para la protección contra terremotos y en obras de presupuesto limitado.

Para la toma de decisión en la utilización de amortiguamiento bilineal (en este caso utilización de ADAS) se deben considerar dos criterios: fuerza de amortiguamiento y costo. Si la estructura diseñada tiende a poseer una gran ductilidad, los disipadores con mayor adaptación de amortiguamiento proporcionarán una gran cantidad de fuerza de amortiguamiento, ejerciendo presión sobre los elementos estructurales, mientras que los amortiguadores de comportamiento bilineal no lo harán, por ende, lo ideal es la utilización de los disipadores metálicos (Lago et al., 2019).

Como dato adicional el precio de los disipadores de comportamiento bilineal puede resultar de un tercio a una quinta parte en comparación a los amortiguadores de fluido viscoso. Sin embargo, el costo de instalación es prácticamente el mismo para todos los tipos de amortiguadores al igual que los costos de interrupción de negocios (Liang et al., 2012).

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

En la ejecución del presente trabajo de investigación se analizará la estructura objetivo sin protección sísmica y luego se estudiará el caso de la implementación de disipadores de fluido viscoso y disipadores histeréticos actuando por separado, obteniendo así la implementación óptima del tipo de disipadores a emplearse para la estructura objeto de estudio. Consecuentemente, se realizará un análisis no-lineal de los disipadores y el costo de impacto en la implementación que tendrá cada uno de ellos. A continuación, se listan los pasos a seguir para evaluar y comparar el comportamiento de una edificación.

- Análisis de la estructura sin protección sísmica
 - Análisis estático o fuerzas estáticas equivalentes

El análisis estático aplicado en una edificación consiste en determinar cargas estáticas en cada uno de los niveles de la estructura, simulando el efecto de un sismo. A diferencia del análisis dinámico, en este método se supone solamente el primer modo de vibración y las cargas aplicadas son distribuidas en forma triangular despreciando así los demás modos. La norma E.030 del diseño sismorresistente en el artículo 28.2.1 muestra la ecuación para determinar el cortante basal por medio de la siguiente expresión:

$$V = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot P \quad (3.1)$$

Debe tenerse en cuenta que el valor de C/R no debe considerarse menor que 0.11 para un diseño convencional (“Reglamento Nacional de Edificaciones,” 2016).

Así mismo el periodo fundamental de vibración en cada dirección de análisis se lo puede estimar mediante la ecuación 3.2.

$$T = \frac{h_n}{C_T} \quad (3.2)$$

O alternativamente mediante la ecuación 3.3.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n P_i \cdot d_i^2)}{(g \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot d_i)}} \quad (3.3)$$

Para una explicación más detallada a esta aplicación se lo puede encontrar en el artículo 28 de la norma E.030 del diseño sismorresistente.

- Análisis Modal.

El análisis modal de la estructura no es otra cosa que determinar las frecuencias naturales de vibración y los modos de vibrar que este presenta. Debido a la frecuencia natural de vibración que tiene cada modo de la estructura y la frecuencia natural de vibración del terreno, es posible que se produzca el efecto de resonancia, siendo esta la

sincronía entre ambas frecuencias. Como se observó en el capítulo anterior, estas frecuencias y periodos de la estructura son representado por osciladores de un grado de libertad, que presentan un movimiento pendular de un lado a otro, esta es la forma más básica que representa a una estructura. Haciendo más complejo lo descrito anteriormente, la idealización de una estructura como un cuerpo tridimensional, presentará modos de vibrar rotacionales y traslacionales; generalmente al primer modo de vibración se lo conoce como Periodo fundamental.

○ **Análisis Dinámico Espectral**

La norma E.030 establece valores para realizar un análisis espectral, lo cual implica conocer los parámetros de zona, así como también las características de la estructura para poder determinar el cortante basal actuante en la edificación y las derivas que se presentan. Es importante mencionar que el cortante determinado por este método no puede ser menor al 80% del cortante estático calculado con previa anterioridad, por lo cual se debe corregir los valores de análisis espectral por la razón entre el cortante basal estático y el cortante basal dinámico. Los parámetros sísmicos empleados están dados en la norma peruana de edificaciones.

Para el análisis de ambas direcciones, se realiza el espectro de pseudo aceleraciones que se obtiene a través de la ecuación 3.4

$$S_{a(T)} = \frac{Z U C_{(T)} S}{R} g \tag{3.4}$$

Donde C toma valores de:

$$\begin{array}{llll} T < T_p & C = 2.5; & T_p < T < T_L & C = 2.5 \left(\frac{T_p}{T} \right) \\ & & T > T_L & C = 2.5 \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2} \right) \end{array}$$

El cálculo de las derivas de la estructura será por medio de la combinación cuadrática completa o CQC por sus siglas, misma que está estimada por defecto en el programa a un amortiguamiento del 5% de la estructura

○ **Análisis Dinámico Tiempo-Historia**

Como su nombre lo indica, este análisis consiste en obtener la respuesta dinámica de la estructura en intervalos de tiempo replicando el movimiento el suelo. Este análisis se lleva a cabo haciendo uso de siete señales sísmicas, que deben ser escaladas y corregidas para un espectro de diseño según el ASCE7-16 en sus coordenadas Norte-Sur y Este-Oeste. Las señales sísmicas empleadas son:

1. Lima 1966
2. Lima 1991
3. Lima 1970
4. Arequipa 2001
5. Pisco 2007
6. Ayacucho 2014
7. Tacna 2015.

Las 3 primeras señales fueron registradas por estaciones ubicadas en la ciudad de Lima, los registros de los sismos del 2001 y 2014 fueron tomados por estaciones ubicadas en Moquegua, el registro del 2007 corresponde a la estación ubicada en Ica, mientras que el último registro fue tomado de una estación en Tacna.

- Análisis de la edificación empleando disipadores de fluido viscoso y disipadores hysteréticos

En este apartado se realiza el análisis de la estructura implementando los disipadores de fluido viscoso y los disipadores hysteréticos a través del análisis modal y del dinámico tiempo-historia. El objetivo de su aplicación es reducir la respuesta sísmica y disminuir el daño en los elementos estructurales.

De la máxima deriva determinada para los sentidos X-X y Y-Y se procede a determinar la deriva objetivo mediante la siguiente ecuación:

$$B = \frac{D_{max}}{D_{obj}} \quad (3.5)$$

D_{max} = distorsión máxima objetivo obtenida del análisis tiempo-historia

D_{obj} = distorsión objetivo (valor a querer obtenerse aplicando el manual HAZUS).

Luego de haber determinado el valor de “B” se procede a encontrar el amortiguamiento efectivo por medio de la ecuación 3.6.

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_o)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})} \quad (3.6)$$

Donde el valor de β_o corresponde al amortiguamiento inherente de la estructura del 5%. Consecuentemente se procede a determinar el amortiguamiento que adoptaran los dispositivos restando el 5% antes mencionado con la ecuación 3.7.

$$\beta_h = \beta_{eff} - 5\% \quad (3.7)$$

El amortiguamiento determinado por la ecuación anterior, no debe sobrepasar un valor del 30% especificado por la norma. Es importante mencionar que lo descrito anteriormente es aplicado a estructuras que se están diseñando, mas no para estructuras al cual se desea aplicar reforzamiento, pero sin embargo nos otorga una idea del valor requerido.

Luego de esto se procede a implementar los disipadores dentro de la estructura y se evalúa el comportamiento que tiene la misma. Un seguimiento detallado para esta aplicación se describe en el apartado 3.2 para la metodología y aplicación de los disipadores de fluido viscoso e hysteréticos.

- Análisis no Lineal de lo disipadores.

El análisis no lineal de los disipadores corresponde a determinar la cantidad de energía que disipan estos elementos durante el evento sísmico, así como también de las fuerzas máximas y sus máximos desplazamientos producidos en ellos. La energía disipada por los disipadores estará dada por:

$$\% \text{ disipación de energía} = \frac{E. \text{ de los disipadores}}{E. \text{ del Sismo}} \quad (3.8)$$

Así mismo se analizará la ductilidad demandada en la estructura al ser aplicado los disipadores, teniendo en cuenta la reducción de fuerzas elásticas para un cortante estático vs la cortante en un análisis tiempo-historia durante un sismo máximo considerado.

3.1. Metodología para la selección de Disipadores de Fluido Viscoso y Disipadores metálicos ADAS

En el mundo existe un gran número de códigos e investigaciones para el diseño y reforzamiento de estructuras con elementos de disipación de energía sísmica, ya sea del tipo activo, pasivo o híbrido; estos códigos otorgan recomendaciones básicas para estructuras que presentan un amortiguamiento adicional, tales como el código europeo (Euro código 8 (CEN, 2003)), el código de construcción japonés (BCJ, 2013; JSSI, 2003, 2005, 2007) y los estándares de Nueva Zelanda (NZS, 2006), mas no demuestran lineamientos específicos para poder diseñarlos. (Lago, Trabucco, & Wood, 2018).

A diferencia de los mencionados, Estados Unidos presenta pautas disponibles en el diseño de edificios nuevos (ASCE, 2017a) así como para edificios existentes (ASCE, 2017b) con sistemas de amortiguamiento y aislamiento sísmico. A continuación, se revisa brevemente la historia de desarrollo de los estándares de EE. UU y de otros sitios.

Tabla 3. 1 Estándares para protección sísmica

ATC-14	Guía para profesionales en la evaluación de edificios existentes para identificar deficiencias y vulnerabilidades sísmicas.	Estados Unidos
FEMA-172 FEMA 178	Desarrollo de información sobre técnicas para disminuir las deficiencias sísmicas en varios tipos de construcción y los establecimientos de declaraciones para evaluaciones sísmicas en zonas de alta sismicidad	
ASCE31-03	Procedimiento para niveles de evaluación sísmica de edificios existentes	
ASCE41-06 hasta su versión actualizada del ASCE41-13	introduce un enfoque que incluye pasos de evaluación de tres niveles para el edificio existente y las estrategias de modernización relativas.	
TJBDPA	manual técnico para la evaluación sísmica y la modernización de los edificios RC existentes.	Japón
GB50223 (Código Chino)	propuso cuatro categorías de protección para mejorar los requisitos de protección sísmica: moderada, estándar, enfatizada y protección particular.	China

La utilización de los sistemas de disipación de energía del tipo pasivo dentro de una estructura, tiene por objetivo cumplir con las exigencias establecidas en los códigos y normas de una región, reducir costos de daño luego de un evento sísmico y tratar de reducir la complejidad de su implementación.

3.1.1. PROCEDIMIENTO

En este apartado se presenta un diagrama de flujo para el proceso de la aplicación de los sistemas de amortiguamiento (o aislamiento de base), basado principalmente en los requisitos del ASCE41-13 y el ASCE7-16, como una estrategia de adaptación de los mismos.

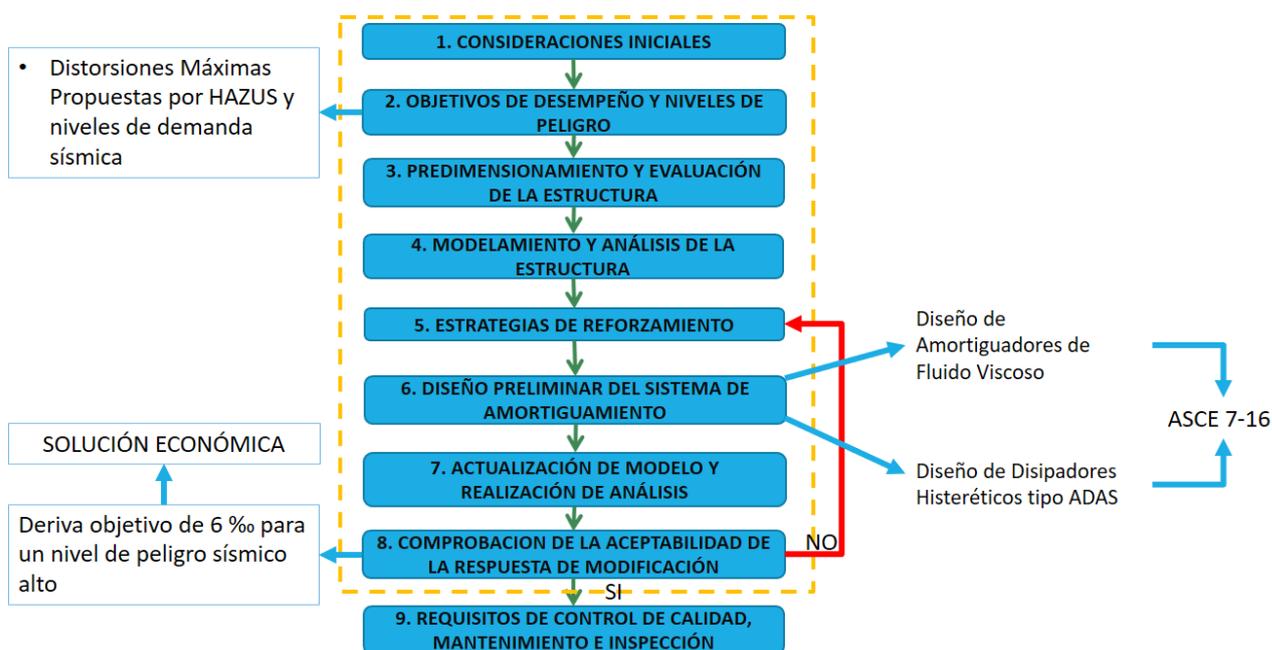


Figura 3. 1 Procedimiento del diseño de disipadores

3.1.1.1. CONSIDERACIONES INICIALES

Se realiza una evaluación de la estructura, es decir, si la edificación tiene una capacidad de rendimiento aceptable y a su vez se verifica las posibles deficiencias.

- Es importante destacar que en este punto se debe tomar en cuenta las características del sistema estructural, el tipo de material y las dimensiones geométricas.
- Las consideraciones económicas para la aplicación del reforzamiento de una estructura por medio de la implementación de dispositivos de disipación de energía deben ser considerados previamente.

3.1.1.2. OBJETIVOS DE DESEMPEÑO Y NIVELES DE PELIGRO

Luego de realizar la primera evaluación, es importante plantearse un desempeño aceptable de la estructura. Un objetivo de desempeño consiste en la aplicación de una o más condiciones de “nivel de peligro sísmico” seleccionado con un “nivel de desempeño estructural” objetivo. Esas aplicaciones pueden estar en función de la seguridad de los ocupantes, durante y después del evento sísmico, el costo de aplicación de los elementos y reparación de la estructura. En otras palabras, los objetivos de desempeño se basan en el nivel del daño estructural y no estructural durante un terremoto, presentando ventajas en la disminución de esos daños y la interrupción del uso de la estructura en caso de terremotos futuros.

El comité VISION 2000 (SEAOC, 1995), divide a las estructuras en 3 grupos de acuerdo a la importancia que estas presentan y el nivel de desempeño que estas deben tener. La tabla 3.2 muestra la propuesta dada por el comité VISION 2000. Así mismo, en la normativa del diseño sismorresistente del Perú E.030 se muestra el nivel de desempeño sísmico deseado para un nivel de movimiento sísmico (“Reglamento Nacional de Edificaciones,” 2016) en el Artículo 3 apartado 3.2.

“Se reconoce que dar protección completa frente a todos los sismos no es técnica ni económicamente factible para la mayoría de las estructuras. En concordancia con tal filosofía se establecen en la presente Norma los siguientes principios:

- a) La estructura no debería colapsar ni causar daños graves a las personas, aunque podría presentar daños importantes, debido a movimientos sísmicos calificados como severos para el lugar del proyecto.
- b) La estructura debería soportar movimientos del suelo calificados como moderados para el lugar del proyecto, pudiendo experimentar daños reparables dentro de límites aceptables.

c) Para las edificaciones esenciales, se debería tener consideraciones especiales orientadas a lograr que permanezcan en condiciones operativas luego de un sismo severo.”

Tabla 3. 2 Niveles recomendados de desempeño esperados

1. Instalaciones Básicas		NIVEL DE DESEMPEÑO SÍSMICO			
2. Instalaciones Esenciales					
3. Instalaciones de Seguridad Crítica		TOTALMENTE OPERACIONAL	OPERACIONAL	SEGURIDAD	COLAPSO
0... Desempeño Inaceptable					
Nivel de Movimiento Sísmico	Frecuente (T=43 años)	1	0	0	0
	Ocasional (T=72 años)	2	1	0	0
	Raro (T=475 años)	3	2	1	0
	Muy Raro (T=970 años)	-	3	2	1

Referenciándonos a la norma peruana de la construcción, para cumplir con los niveles de desempeño propuestos por el SEAOC, la norma propone los límites de distorsión de entrepiso que se deben cumplir tanto para los sentidos X-X y Y-Y de la estructura al ser sometida a un análisis dinámico del 7 % frente a un nivel de movimiento sísmico muy raro (sismos con periodos de retorno de 475 años) para un material predominante de concreto armado.

Para la presente investigación nos regiremos a las distorsiones máximas propuestas por el HAZUS empleando el capítulo 5, donde se muestran los niveles de desempeño sísmico que deben presentar las estructuras de acuerdo a sus elementos estructurales y la altura que estas poseen (HAZUS99, 2003). La tabla 3.3 muestra un resumen del tipo de sistemas estructurales utilizados en una edificación, así como también de la nomenclatura de acuerdo al nivel de altura que estas poseen; mientras que en la tabla 3.4 se coloca el nivel de desempeño sísmico presentado en este manual además de la distorsión permisible para niveles de diseño sísmico altos hasta los empleados en los pre-códigos

Tabla 3. 3 Sistemas estructurales (HAZUS99, 2003)

Descripción	Altura				Designación
	Rango		Típicos		
	Nombre	# Pisos	# Pisos	Altura (m)	
Sistemas Aporticados	Baja Altura	1-3	2	6	C1L
	Mediana Altura	4 -7	5	15	C1M
	Gran altura	8+	12	37	C1H
Sistemas con Muros de Corte	Baja Altura	1-3	2	6	C2L
	Mediana Altura	4 -7	5	15	C2M
	Gran altura	8+	12	37	C2H
Sistemas aporticados rellenos con muros de albañilería	Baja Altura	1-3	2	6	C3L
	Mediana Altura	4 -7	5	15	C3M
	Gran altura	8+	12	37	C3H

Tabla 3. 4 Distorsiones máximas permisibles (HAZUS99, 2003)

Nivel de Diseño Sísmico	Designación	Deriva de entrepiso para un Límite de daño estructural en edificios de concreto armado			
		Daño Leve	Daño Moderado	Daño Severo	Daño completo o colapso
ALTO	C1L	0,0050	0,0100	0,0300	0,0800
	C1M	0,0033	0,0067	0,0200	0,0533
	C1H	0,0025	0,0050	0,0150	0,0400
	C2L	0,0040	0,0100	0,0300	0,0800
	C2M	0,0027	0,0067	0,0200	0,0533
	C2H	0,0020	0,0050	0,0150	0,0400
MODERADO	C1L	0,0050	0,0087	0,0233	0,0600
	C1M	0,0033	0,0058	0,0156	0,4000
	C1H	0,0025	0,0043	0,0117	0,0300
	C2L	0,0040	0,0084	0,0232	0,0600
	C2M	0,0027	0,0056	0,0154	0,0400
	C2H	0,0020	0,0042	0,0116	0,0300
BAJO	C1L	0,0050	0,0080	0,0200	0,0500
	C1M	0,0033	0,0053	0,0133	0,0333
	C1H	0,0025	0,0040	0,0100	0,0250
	C2L	0,0040	0,0076	0,0197	0,0500
	C2M	0,0027	0,0051	0,1320	0,0333
	C2H	0,0020	0,0038	0,0099	0,0250
	C3L	0,0030	0,0060	0,0150	0,0350
	C3M	0,0020	0,0040	0,0100	0,0233
C3H	0,0015	0,0030	0,0075	0,0175	
PRE-CÓDIGO	C1L	0,0040	0,0064	0,0160	0,0400
	C1M	0,0027	0,0043	0,0107	0,0267
	C1H	0,0020	0,0032	0,0080	0,0200
	C2L	0,0032	0,0061	0,0158	0,0400
	C2M	0,0021	0,0040	0,0105	0,0267
	C2H	0,0016	0,0031	0,0079	0,0200
	C3L	0,0024	0,0048	0,0120	0,0280
	C3M	0,0016	0,0032	0,0080	0,0187
C3H	0,0012	0,0024	0,0060	0,0140	

La tabla 3.4 muestra las distorsiones máximas para un límite de daño estructural en edificios de concreto armado frente a diferentes niveles de diseño sísmico. Estos niveles de diseño sísmico corresponden al nivel de amenaza sísmica al que es expuesto el sistema estructural, por ejemplo, un nivel de diseño sísmico alto, corresponderá a un nivel de movimiento sísmico muy raro conocido como el MCE_R (sismo máximo considerado con

periodo de retorno de 975 o 2475 años), mismo que es empleado en los requisitos de diseño sísmico para estructuras con sistemas de aislamiento o amortiguamiento según ASCE 7-16.

Así mismo se puede observar que las derivas en sistemas aporticados y sistemas con muros de corte son similares para los niveles de daño severo y niveles de daño completo o colapso. Una estructura compuesta con muros de corte podría comportarse de manera similar a una estructura de sistemas aporticado con secciones robustas, al compartir el mismo tipo de material, las secciones para ambos sistemas presentarán agrietamientos y daños cuando el concreto alcance su máxima deformación.

3.1.1.3. PREDIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Es de vital importancia obtener información acerca del comportamiento de la estructura para identificar cualquier deficiencia en su dinámica. Por lo tanto, se deben evaluar todos los componentes de la estructura para determinar si estos satisfacen o no al desempeño deseado. La información requerida para evaluar la estructura debe contener:

- Descripción del edificio, incluido el número de pisos y predimensionamiento
- Descripción del sistema estructural, incluyendo las propiedades de los materiales, la carga impuesta por piso entre otros.
- Tipo de edificación y la ocupación que se le da.
- Nivel de desempeño
- El tipo de suelo sobre el cual esta cimentada y la zona en la que está ubicada según el mapa de peligros sísmicos.

3.1.1.4. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

En este paso, el diseñador debe realizar un modelo matemático del sistema estructural empleando un software apropiado. Como recomendación importante se debe tener en cuenta que:

- Las características de las cargas deben incluirse directamente sobre el modelo
- En caso de usar los vectores Ritz por un programa de análisis comercial, se debe cumplir los siguientes requisitos:
 - Inclusión de todos los modos posibles en donde se capture al menos el 90% de la participación de masa
 - Las lecturas de los pasos de tiempo de la señal sísmica deben ser lo más pequeño posible.

Para realizar el análisis sísmico del edificio se ha empleado el software ETABS, para el cual se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para realizar el modelo matemático:

- Base de las columnas empotradas
- Asignación de 3 grados de libertad
- Asignar nudos rígidos en la unión de vigas y columnas en cada nivel para simular un comportamiento de diafragma rígido
- Definir las fuentes de masa establecidas por la norma
- Establecer los vectores Ritz

3.1.1.5. ESTRATEGIAS DE REFORZAMIENTO

Una vez determinada las deficiencias del edificio, se procede a decidir una estrategia de modernización adecuado para lograr los objetivos de rendimiento. La solución del equipamiento adoptado debe considerarse posteriormente en el modelo construido del paso anterior a través de sus efectos en la mejora de resistencia, rigidez, comportamiento y la nueva deformación que presentará la estructura. Estas estrategias pueden variar según sea el caso de reforzamiento, tales como:

- Modificación local de componentes.
- Eliminación o reducción de irregularidades
- Refuerzo de elementos estructurales
- Reducción de masa
- Aislamiento sísmico
- Disipación de energía en la implementación de dispositivos

Es importante mencionar que la aplicación de uno de ellos podría llevar a la modificación de la dinámica de la estructura. Además de esto, es importante saber que el aislamiento sísmico es recomendable para edificios relativamente rígidos con perfiles bajos y gran masa y menos efectivos para estructuras ligeras y flexibles. Por otro lado, los sistemas amortiguamiento pueden ser eficaces en la modificación de efectos en la estructura debido a las deformaciones excesivas causadas por una rigidez insuficiente. En general, los desplazamientos estructurales pueden reducirse por la adición de amortiguamiento en el sistema estructural, aunque en otros casos las fuerzas transferidas a la estructura pueden incrementarse esencialmente.

Los amortiguadores de fluido viscoso son generalmente utilizados en EE.UU. para la protección de estructuras altas (Lai, Wang, J Schoettler, & Mahin, 2015). Referido a esto, observaciones en las estructuras durante los terremotos de Tohoku en Japón del 2011 y en Colima de México en el 2003 concluyó que la aplicación de los amortiguadores de

fluido viscoso en edificios de gran altura satisfacen los requerimientos en el resguardo de vida, es decir, estos dispositivos son eficientes para controlar el nivel de daño (Takewaki, Moustafa, & Fujita, 2013)

Debido a lo antes mencionado, para el presente trabajo se emplearán los dispositivos de disipación de energía. Las recomendaciones a seguir son las siguientes:

El diseñador debe elegir a priori los tipos de amortiguadores que protegerán a la estructura, la configuración de instalación, así como su distribución de los dispositivos en todo el edificio.

1. Selección de los dispositivos de disipación de energía: clasificados a su vez como ya se observó en el capítulo anterior dependientes de la velocidad y dependientes del desplazamiento.
2. Configuración geométrica de los amortiguadores: luego de elegir qué tipo de disipadores se emplearán, se procede a determinar la configuración a implementarse en la estructura.
3. Distribución de los amortiguadores: dado el tipo de amortiguadores y la configuración geométrica a emplearse la distribución de los dispositivos a lo largo de la planta del edificio y a la altura del mismo deben ser analizadas para poder determinar la mejor respuesta a la estructura.

Para el caso de esta investigación los requisitos mínimos de diseño de amortiguadores en disposición Chevron según el código ASCE en el capítulo 18 establece que:

- El sistema de amortiguamiento debe contar como mínimos dos dispositivos por nivel cada dirección de análisis y ubicados estratégicamente para no ocasionar efectos de torsión
- El amortiguamiento efectivo total del modo fundamental en la dirección de interés no debe ser mayor al 35% del amortiguamiento crítico.

3.1.1.6. DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO

Basado en el sistema de amortiguamiento seleccionado y su respectiva distribución, se deberá llevar a cabo un diseño preliminar del dispositivo.

i. Diseño de amortiguadores de fluido viscoso

- a. Análisis del edificio sin amortiguamiento adicional
- b. Definición de los registros tiempo – historia
- c. Determinación de los desplazamientos máximos
- d. Elección de los objetivos de desempeño
- e. Determinación del amortiguamiento requerido
- f. Ubicación y disposición de los amortiguadores

g. Definición de las propiedades del amortiguador (K, C, α)

Donde K corresponde a la rigidez del brazo metálico, dada por la ecuación:

$$K = \frac{E \cdot A}{L} \quad (3.9)$$

Siendo:

E= módulo de elasticidad del acero

A= área de la sección del brazo metálico

L= Longitud del brazo metálico

Mientras que el coeficiente de amortiguamiento “C” para disipadores de fluido viscoso no lineales será determinado de la siguiente ecuación:

$$\beta_H = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos(\theta_j)^{1+\alpha}}{2 \pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (3.10)$$

Siendo:

β_H = Amortiguamiento de la estructura

λ = Parámetro lambda

C_j = coeficiente de amortiguamiento del disipado

ϕ_{rj} = desplazamiento relativo entre ambos extremos del disipador j en la dirección horizontal

θ_j = ángulo de inclinación del disipador

A= amplitud de los desplazamientos modales

ω = frecuencia angular

m_i = masa del nivel i

ϕ_i = desplazamiento del nivel i

Es importante mencionar que el valor “C” antes encontrado considera un coeficiente de amortiguamiento constante para todos los modos, motivo por el cual servirá de estimación para poder determinar luego de varias iteraciones el valor ideal.

El valor de α corresponde al coeficiente de velocidad que otorgará un comportamiento no lineal al disipador de fluido viscoso.

h. Verificación de cumplimiento de la deriva objetivo

ii. Diseño de disipadores histeréticos metálicos ADAS

Para el pre-diseño de los disipadores se siguen los pasos recomendados en el Análisis Sísmico de estructuras con Disipadores de Energía ADAS O

TADAS (Aguiar et al., 2016), el cual se transcribe textualmente a continuación:

1. Se determina la rigidez total del piso K_{Total}

$$K_{total} = \frac{K_{marco}}{\alpha} \quad (3.11)$$

2. Se procede a determinar la rigidez de los arriostres y disipadores

$$K_{C-D} = K_{total} - K_{marco} \quad (3.12)$$

3. Se encuentra la rigidez equivalente de un arriostre y disipador, K_{eq}

$$K_{eq} = \frac{K_{C-D}}{N_d} \quad (3.13)$$

Donde N_d es el número de arriostres

4. Se halla la rigidez de la diagonal del arriostre

$$K_{DIAG} = \frac{K_{eq}[\beta + 2\mu \cos(\theta)^2 + \alpha^* \beta (\mu - 1)]}{\beta[1 + \alpha^*(\mu - 1)]} \quad (3.14)$$

5. Se procede a calcular la rigidez elástica del disipador

$$K_{DDE} = \beta K_{DIAG} \quad (3.15)$$

6. Luego se calcula la rigidez post-fluencia del disipador K_2

$$K_2 = \alpha^* K_{DDE} \quad (3.16)$$

α^* es la relación entre rigidez y sus valores varían entre 0, 0.03 y 0.05

7. Se determina la rigidez efectiva K_{EDDE}

$$K_{EDDE} = \frac{K_{DDE} + K_2 (\mu - 1)}{\mu} \quad (3.17)$$

8. El desplazamiento de fluencia Δ_y

$$\Delta_y = \frac{V_u}{\mu K_{EDDE}} \quad (3.18)$$

Conocidos los valores requeridos de rigidez elástica, desplazamiento de fluencia, cortante último, y la rigidez post fluencia; se procede a calcular las demás propiedades del disipador y el número de placas necesarias aplicando las ecuaciones de la tabla 2.4 del capítulo anterior.

Como dato adicional, en un estudio realizado a 360 pórticos de 5 a 25 pisos de altura a través de un análisis no lineal “Pushover”, aplicando arriostres en Disposición Chevron con inclinación de 40° a 45°, se determinaron valores óptimos de α y β (Tena-Colunga & Hernández, 2016; Tena-Colunga & Nangullasmú, 2013). Estos parámetros estructurales corresponden a la proporción de rigidez entre el marco y el marco arriostrado, así como de la rigidez lateral del disipador frente a la rigidez del arriostre respectivamente.

Los valores óptimos determinados para α y β se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 3. 5 Valores óptimos para α y β

NIVELES	H/L	Θ	α	β
5	0.53	40°	0.25	0.50
	0.63	45°	0.25	0.50
10	1.05	40°	0.25	0.75
	1.25	45°	0.25	0.50
15	1.58	40°	0.25	0.75
	1.88	45°	0.25	0.50
20	2.10	40°	0.50	0.50
	2.50	45°	0.50	0.75
25	2.63	40°	0.50	0.50
	3.13	45°	0.50	0.75

3.1.1.7. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL Y REALIZACIÓN DE ANÁLISIS

Una vez determinada la configuración geométrica, la estrategia empleada en la implementación de los elementos y un prediseño propuesto, se debe verificar el modelo anterior más la aplicación de los disipadores adoptados. Para ello, se debe actualizar el modelo estructural de construcción simple agregando el modelo explícito de los disipadores.

Para el análisis, se pueden emplear procedimientos lineales como no lineales según los diferentes criterios. En este punto es importante mencionar que los procedimientos de análisis lineales solo se pueden utilizar cuando hay dispositivos presentes en todos los niveles de la estructura; y se deben realizar análisis de propiedades de límite superior e inferior. Estos criterios deben satisfacer lo siguiente:

- El amortiguamiento adicionado no superará el 30%, tal como lo especifica el código ASCE7-16
- La rigidez proporcionada por los elementos debe incluirse en el modelo matemático
- Los dispositivos de disipación de energía se considerarán para evaluar la regularidad del edificio.

3.1.1.8. COMPROBACIÓN DE LA ACEPTABILIDAD DE LA MODIFICACIÓN DE RESPUESTA

Para esta fase se puede comparar la respuesta de la edificación sin protección con la nueva estructura a la que se le han implementado los dispositivos. Este proceso permite observar las variaciones de respuesta de base y las actualizadas, ayudando al diseñador a darse cuenta de la cantidad de mitigación que se está efectuando en la estructura. Por recomendación se debe comparar las respuestas de fuerza cortante en el tiempo – historia y la reducción de deriva del sistema (Zhou, Lu, Weng, & Zhang, 2012)

Hay que tener en cuenta las implicaciones económicas en el momento de verificar la viabilidad del diseño; Para el caso en el que la estrategia implementada no resulte económica, hay tres opciones posibles:

- Considerar más refinamiento en los análisis
- Diseñar un esquema de refuerzo diferente
- Considerar un objetivo de rendimiento diferente

3.1.1.9. REQUISITOS DE CONTROL DE CALIDAD, MANTENIMIENTO E INSPECCIÓN

Este proceso va referido únicamente a la documentación necesaria para los controles de calidad estructural, mantenimiento, además de que se debe realizar unas observaciones estructurales periódicas durante proceso de reacondicionamiento.



4 CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.1. ESTUDIO DEL CASO: DESCRIPCIÓN:

El edificio objeto de estudio está conformado por un sistema estructural de pórticos (vigas y columnas) que no cumple con las exigencias de la Norma Peruana de la construcción, la cual considera una deriva máxima permisible de 7%.

La edificación presenta una forma rectangular en planta de 42,6 x 16,30 m., presentando un volado a cada lado en el eje X-X de 1.5m a excepción del piso de Cubierta, que mide 31,10 x 20,40 m. como se muestra a continuación.

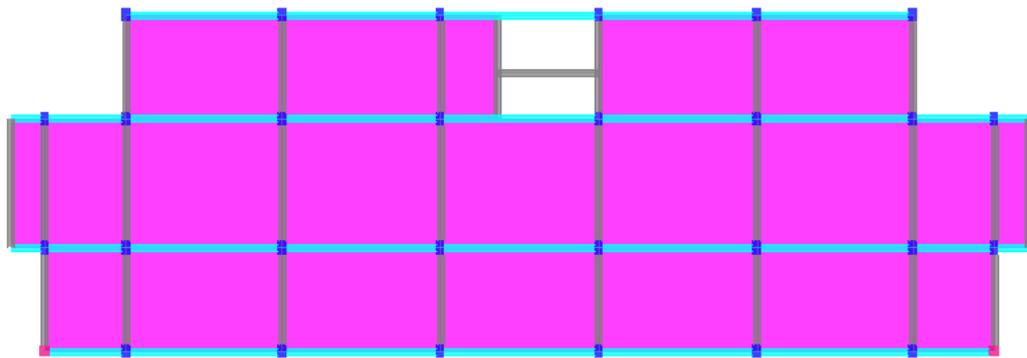


Figura 4. 1 Vista en Planta de Edificación

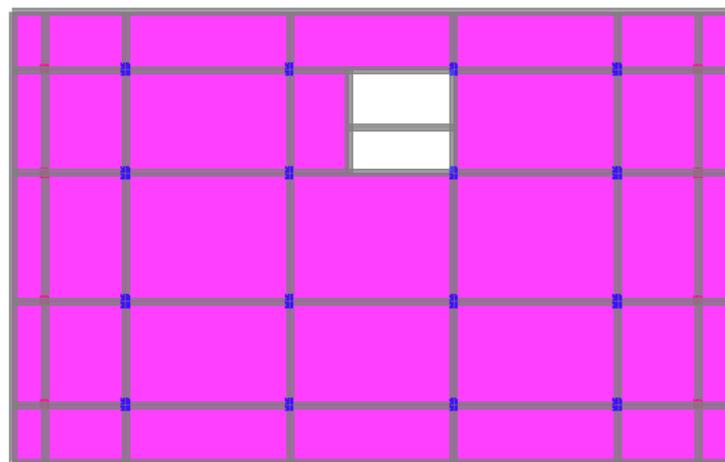


Figura 4. 2 Losa de Cubierta

4.1.1. Características de la edificación y el sistema estructural

La estructura de estudio consta de 11 niveles y una azotea con una altura de 4,5m para el primer nivel y 3,5m para los siguientes, ubicada en la zona costera del Perú sobre un suelo de tipo S1 destinado a ser un edificio multifamiliar, con columnas de 50x50 esquineras, 50x70 interiores y vigas de 30x60 para los 5 primeros pisos, mientras que los pisos superiores tienen columnas de 45x45 y 40x65 con vigas de 30x50 repartidos de manera similar a los pisos anteriores, además de losas macizas de 20cm de espesor.

Las características de los materiales se encuentran resumidos en la tabla 4.1 mientras que las cargas empleadas en la estructura se encuentran en la tabla 4.2

Tabla 4. 1 Propiedades de los materiales

Material	Propiedad	Valor	Unidad
Concreto	Resistencia a la compresión	350	Kg/cm ²
		280	
	Módulo de elasticidad	280 624 250 998	Kg/cm ²
Acero	Peso específico	2 400	Kg/m ³
	Esfuerzo de Fluencia	4 200	Kg/cm ²
	Módulo de elasticidad	2 000 000	Kg/cm ²

Tabla 4. 2 Cargas Consideradas.

Tipo de Peso	Cantidad	Unidad
Peso de Losa	Calculado por el software	Kg/m ²
Peso de Tabiquería	250	Kg/m ²
Peso de acabados	100	Kg/m ²
Carga viva en piso típico	200	Kg/m ²
Carga viva en azotea	100	Kg/m ²

4.2. ANÁLISIS LINEAL DE LA ESTRUCTURA SIN PROTECCIÓN SÍSMICA.

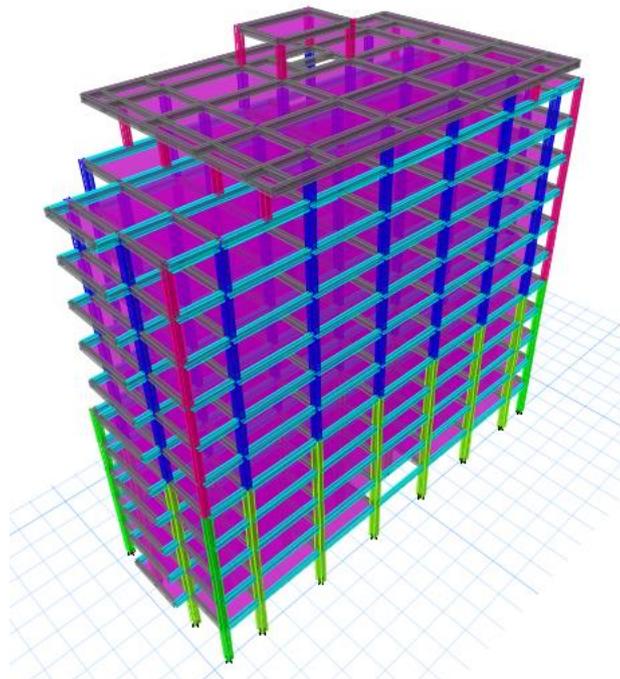


Figura 4. 3 Vista 3D de la edificación objeto de estudio

4.2.1. Análisis Estático

Realizando la aplicación de la ecuación 3.3 y 3.1 para los sentidos X-X y Y-Y se tendrá el periodo fundamental estático y la cortante basal actuante en la edificación en la tabla 4.3

Tabla 4. 3 Periodo fundamental estático y Fuerza cortante actuante

	SENTIDO X-X	SENTIDO Y-Y
Periodo (seg)	2,07	2,199
Fuerza Cortante Basal (KN)	2 395	2 254

Es importante mencionar que el periodo fundamental estático debe ser similar a los periodos determinados para un análisis modal y en el caso de diseño, los valores de cortante basal de diseño no deben ser menores al 80% del valor antes determinado para una estructura regular según la norma E.030.

4.2.2. Análisis Modal

Gracias al modelamiento matemático en el programa ETABS, es posible obtener los periodos de nuestra edificación de manera rápida, los mismos que se muestran en la tabla 4.4

Tabla 4. 4 Resultados de un análisis Modal

MODOS	T (seg)	UX	UY	RZ
1	2,258	0%	79,11%	0%
2	2,097	79,35%	0%	0.46
3	1,895	0,38%	0%	77,86%

Como es de observarse en la tabla anterior, los dos primeros modos de nuestra estructura son traslaciones mientras que el tercero es rotacional, además de considerar a nuestra edificación como una estructura flexible.

4.2.3. Análisis Dinámico Espectral

Los parámetros utilizados para la realización del espectro de aceleraciones se detallan en la tabla 4.5

Tabla 4. 5 Parámetros dados por la norma E.030

Parámetro	Valor
Z	0.45
U	1
C	Dependiente del periodo
S	1
R	8

- Factor de zona $Z=0.45g$ por encontrarse en la zona costera, que representa un gran peligro sísmico.
- Factor de uso $U=1$, correspondiente de una edificación de uso departamental
- Factor de amplificación de sismicidad C (dependiente del periodo) conociéndose previamente que T_p , que será determinado por el tipo de suelo. Es importante mencionar que la relación de C/R mínimo será de 0.11 según la norma.
- Factor del tipo de suelo $S=1$ por referirse a un suelo rígido, normalmente de grava, mismo que corresponde un valor de $T_p=0.4$ segundos
- Para este caso se ha seleccionado un factor de reducción $R=8$

Lo que se tiene por resultado:

$$Z = 0.45, U = 1.0, S = 1.0, T_p = 0.4, T_l = 2.5, R = 1, C = \begin{cases} 2.5, & T \leq T_p \\ 2.5 \frac{T_p}{T}, & T_p \leq T < T_l \\ \frac{2.5 T_p T_l}{T^2}, & T \geq T_l \end{cases}$$

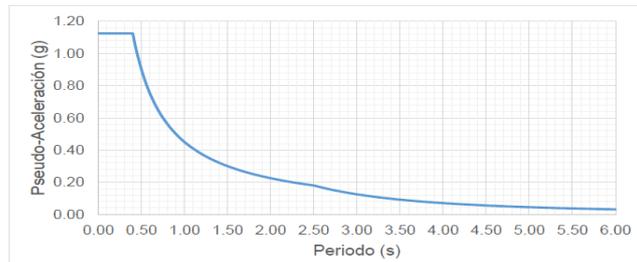


Figura 4. 4 Espectro de aceleraciones $R=1$

Empleando el espectro de aceleraciones a nuestra estructura, en la Figura 4.5 se presenta la gráfica de las derivas.

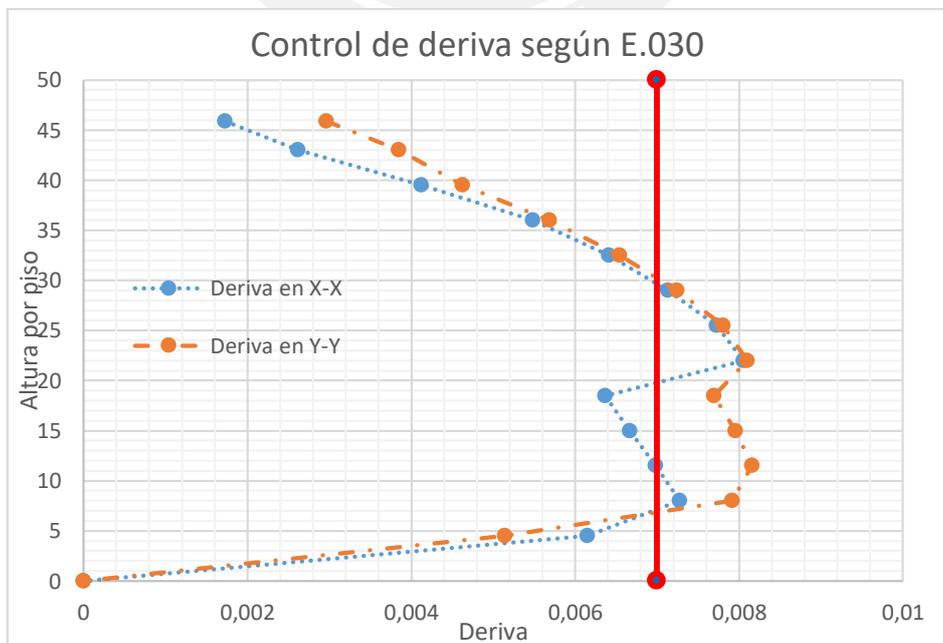


Figura 4. 5 Control de Deriva de la Estructura según E.030

Como es de observarse en la Figura 4.5 la edificación no cumple con lo establecido en la norma E.030, por lo cual se decide implementar en la estructura dispositivos que mejoren su comportamiento estructural. Para ello se procede a realizar un análisis tiempo-historia para un sismo máximo considerado “MCE_R” (sismo con periodo de retorno de 2475 años) según el código ASCE 7-16, ya que la norma impone que se debe realizar el control de deriva para el sismo antes mencionado al momento de aplicar sistemas que añadan amortiguamiento adicional a la estructura.

4.2.4. Análisis Dinámico Tiempo – Historia.

Este análisis se lleva a cabo para analizar la estructura sin disipadores y posteriormente comparar los resultados con una estructura con dispositivos de disipación de energía implementados. Para ello se utilizan las señales antes mencionadas en el capítulo 3 y se hace un ajuste al espectro de diseño (señales espectro-compatibles), según normativa E.031 y ASCE 7-16.

Los registros sísmicos utilizados son los que se detallan a continuación.

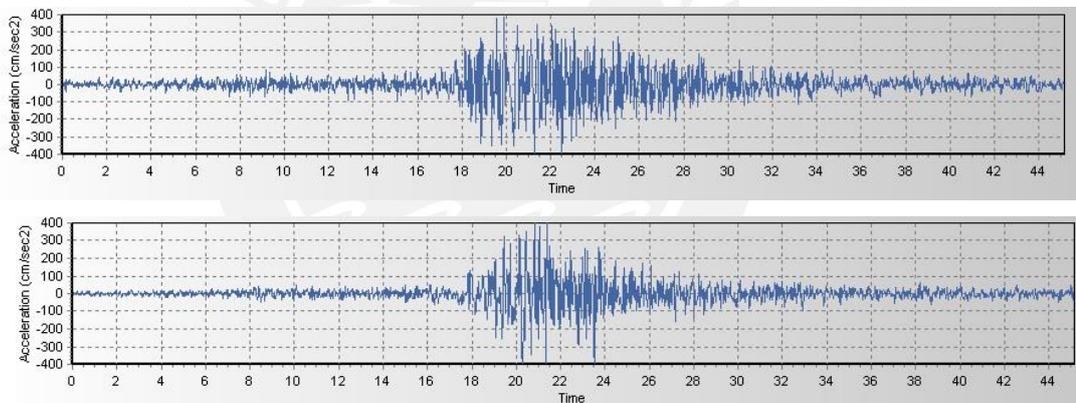


Figura 4. 6 Sismo de Lima de 1966 en sus coordenadas E-W & N-S

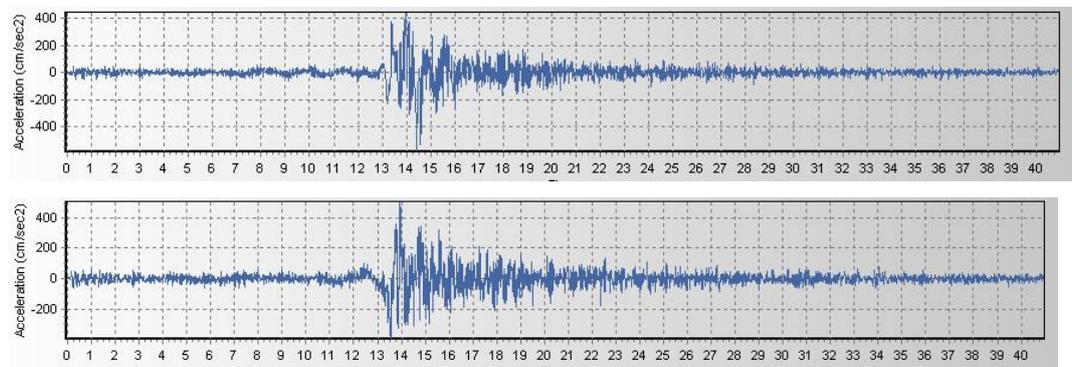


Figura 4. 7 Sismo de Lima de 1991 en sus coordenadas de E-W & N-S

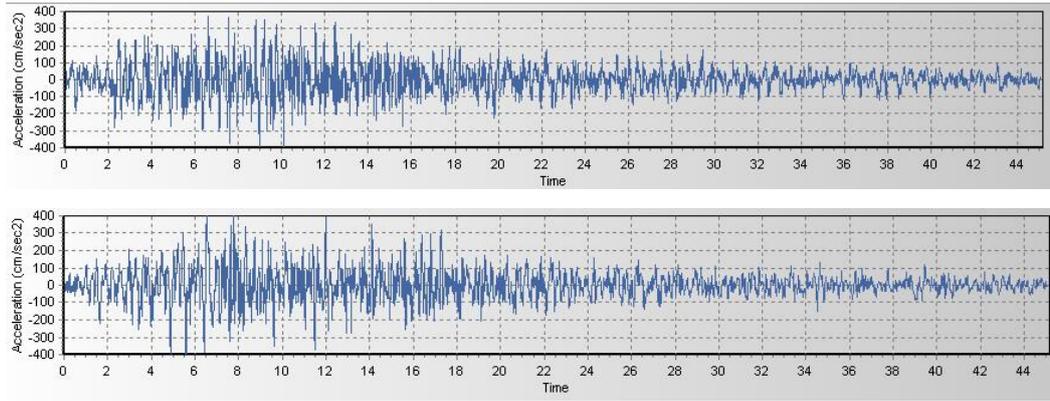


Figura 4. 8 Sismo de Lima de 1970 en sus coordenadas de E-W & N-S

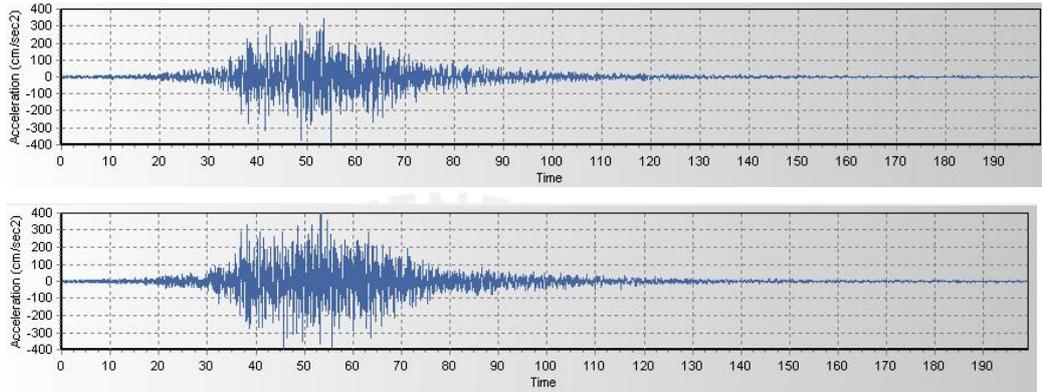


Figura 4. 9 Sismo de Arequipa de 2001 en sus coordenadas de E-W & N-S

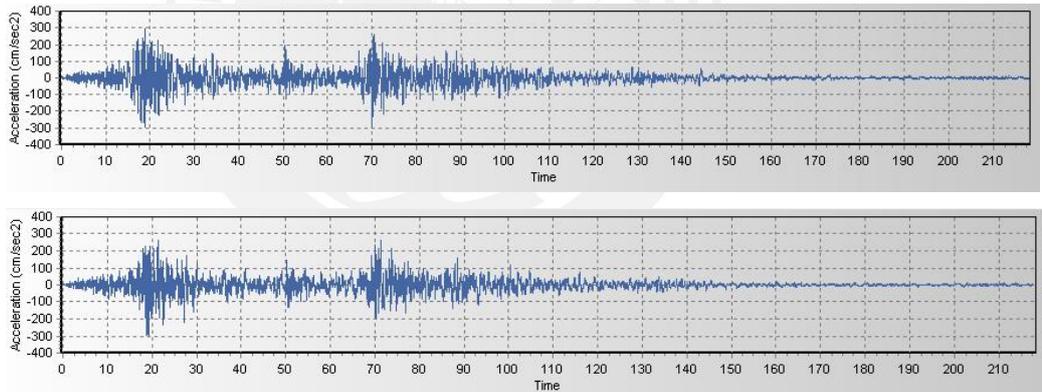


Figura 4. 10 Sismo de ICA de 2007 en sus coordenadas E-W & N-S

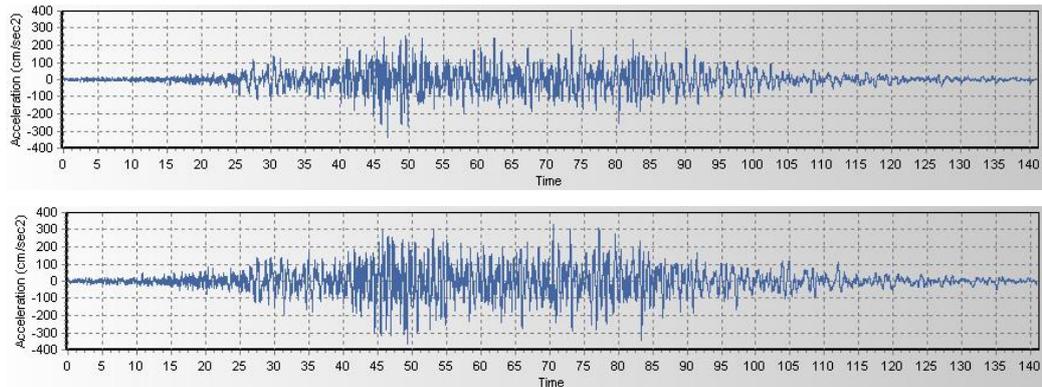


Figura 4. 11 Sismo de Moquegua de 2014 en sus coordenadas de E-W & N-S

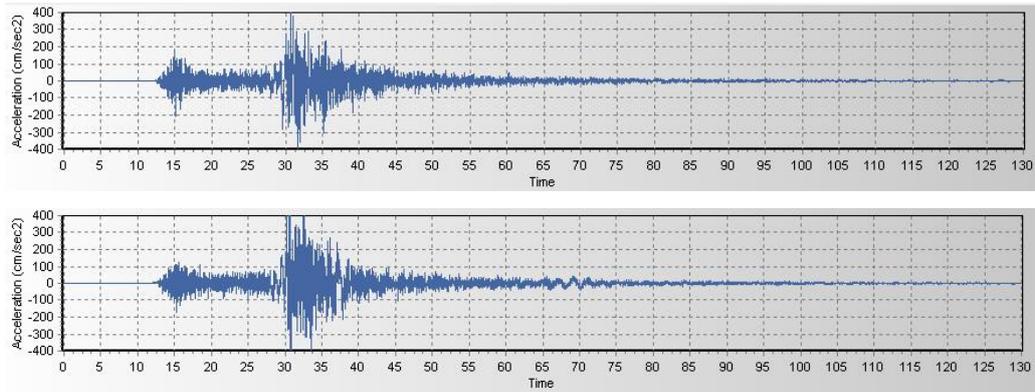


Figura 4. 12 Sismo de Tacna de 2015 en sus coordenadas de E-W & N-S.

Hay que considerar que el análisis de la estructura debe realizarse en la dirección X-X y Y-Y con las señales sísmicas en sus coordenadas E-W y alternada por las coordenadas N-S. Hay que destacar que para señales espectro compatibles, el acelerograma en la dirección de análisis deberá tener un espectro que no sea menor al 90% del espectro de diseño.

A continuación, se presentan el control de deriva determinada para las señales antes mostradas a un sismo máximo considerado (MCE_R).

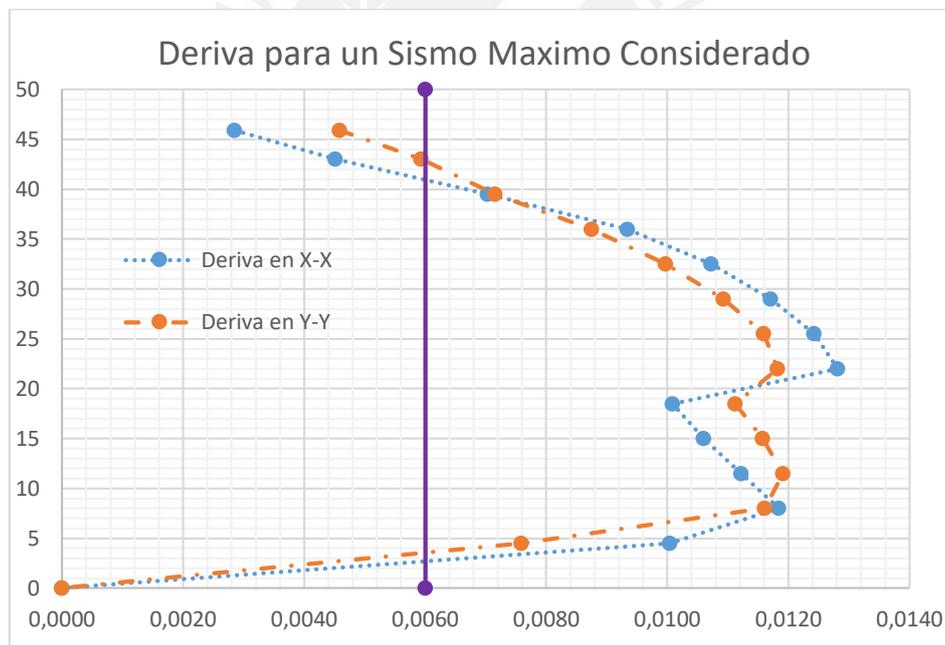


Figura 4. 13 Control de Deriva para un sismo máximo considerado

Los valores de deriva mostrados en la Figura 4.13 son un promedio de las derivas obtenidas a través de las señales sísmicas antes mostradas. Por otro lado, se ha fijado como un control de deriva límite del 6 %. Este valor ha sido tomado como deriva objetivo a través de un análisis de las distorsiones máximas propuestas por Hazus99 para un edificio mayor a 8 pisos, con un sistema estructural aporticado, donde se presentarán daños moderados y por la flexibilidad de la estructura.

4.3. ANÁLISIS CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO.

Aplicando la ecuación 3.7 del capítulo anterior, tendremos que el amortiguamiento requerido para el control de derivas es del orden de 30% aproximadamente para los sentidos X-X y Y-Y. Un total de 4 arriostres fueron utilizados en el sentido X-X, aplicando 2 disipadores en cada uno de ellos; mientras que para el sentido Y-Y se utilizaron 6 arriostres, aplicando de igual manera 2 disipadores en cada uno de ellos. Estos fueron aplicados en el perímetro esquinero de la estructura a diferencia de 2 arriostres aplicados en el interior de la estructura en el sentido Y-Y para los primeros 7 niveles. Para los niveles superiores se emplearon 4 arriostres, 2 en el sentido horizontal y 2 para el transversal, esto se puede visualizar de mejor manera en las Figuras 4.14 y 4.15 como se muestran a continuación.

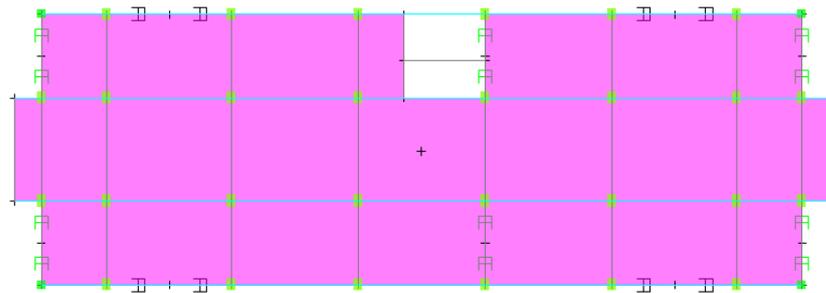


Figura 4. 14 Distribución de los disipadores de fluido viscoso visto en planta

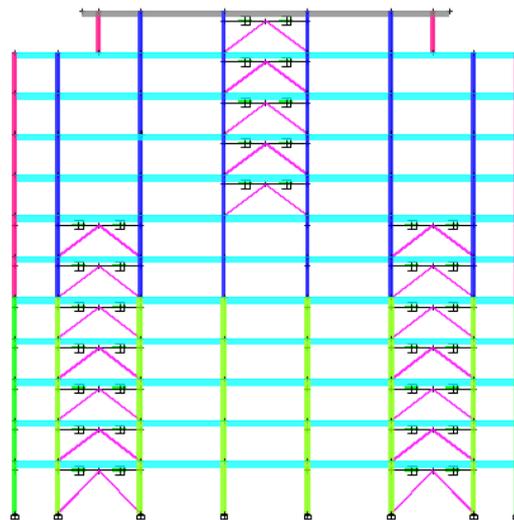


Figura 4. 15 Vista frontal de edificación con DFV

Aplicando las ecuaciones 3.9 y 3.10 descritas en el capítulo 3, y realizando un proceso iterativo se determinaron los coeficientes para la aplicación de los DFV mostrados en la tabla 4.6. La aplicación de una menor cantidad de disipadores en los pisos superiores se debe al poco amortiguamiento requerido para cumplir con la deriva objetivo, efecto no ocurrido en los pisos inferiores.

Tabla 4. 6 Valores determinados para Amortiguadores de fluido viscoso

	X-X (T=2.10 seg)	Y-Y (T=2.26 seg)
Exponente de velocidad	0.3	0.3
Coefficiente de amortiguamiento “C” (tonf* s/m)	95 (7 primeros pisos) 80 (pisos siguientes)	90 (7 primeros pisos) 80 (pisos siguientes)

4.3.1. Análisis Modal

La ventaja de la aplicación de los disipadores de fluido viscoso es que la modificación del periodo de la estructura es mínima, esto se evidencia en la tabla 4.7

Tabla 4. 7 Resultados de un análisis Modal para DFV

MODOS	T	UX	UY	RZ
1	2.26	0%	79%	0%
2	2.10	79%	0%	0.46%
3	1.896	0%	0%	78%

La tabla 4.7 muestra que la aplicación de los disipadores de fluido viscoso no afecta al periodo de vibración de la estructura, debido a que esta clase de dispositivos son dependientes de la velocidad que ingresa al sistema y no rigidiza el sistema estructural.

4.3.2. Análisis Dinámico Tiempo – Historia.

Al igual que la estructura sin disipadores, se hace uso de los mismos registros sísmicos escalados a un sismo máximo considerado. A diferencia de lo anterior, en el software se especifica que se realice un análisis tiempo-historia (FNA) descrito así por sus siglas de fast nonlinear analysis, lo cual describe la incidencia del comportamiento no lineal de los disipadores en el modelo matemático. Las derivas obtenidas por la aplicación de los disipadores se detallan a continuación en la Figura 4.16.

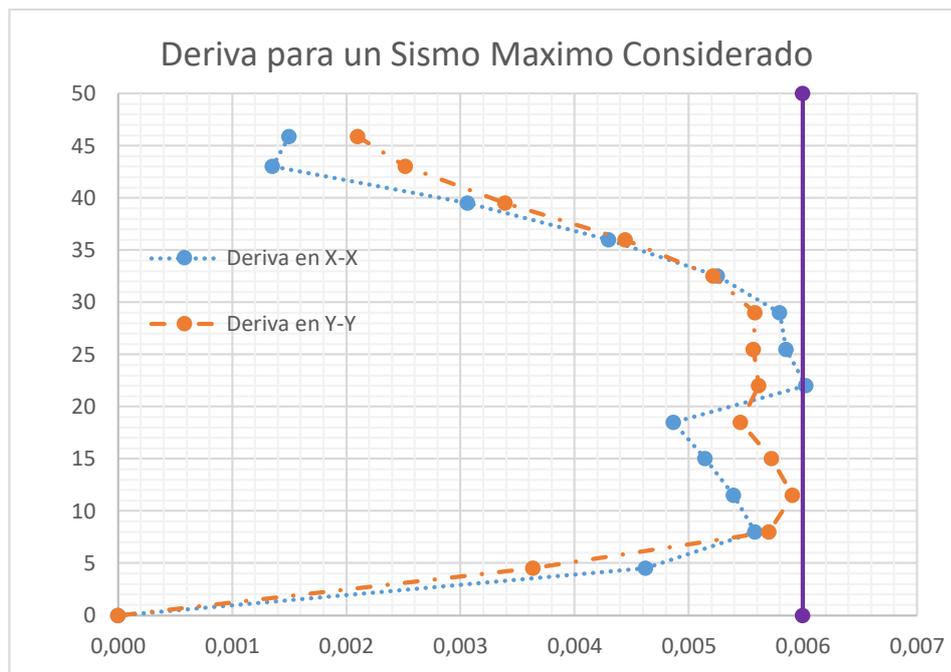


Figura 4. 16 Control de deriva aplicando DFV

Como es de observarse de la figura anterior, la estructura cumple con la deriva propuesta aplicando los criterios por el manual HAZUS. Además de esto, se describe a continuación el porcentaje de reducción de deriva debido a la aplicación de los disipadores en la tabla 4.8

Tabla 4. 8 Comparación entre derivas para un DFV

Piso	Elevación	Deriva en X-X		% de Reducción	Deriva en Y-Y		% de Reducción
		Sin Protección	Con DFV		Sin Protección	Con DFV	
CUBIERTA	45,9	0,0029	0,0015	47,34%	0,0046	0,0021	54,21%
AZOTEA	43	0,0045	0,0014	69,97%	0,0059	0,0025	57,56%
Piso11	39,5	0,0070	0,0031	56,37%	0,0072	0,0034	52,57%
Piso10	36	0,0093	0,0043	53,96%	0,0088	0,0044	49,24%
Piso9	32,5	0,0107	0,0053	51,02%	0,0100	0,0052	47,68%
Piso8	29	0,0117	0,0058	50,48%	0,0109	0,0056	48,94%
Piso7	25,5	0,0124	0,0059	52,89%	0,0116	0,0056	51,99%
Piso6	22	0,0128	0,0060	52,98%	0,0118	0,0056	52,49%
Piso5	18,5	0,0101	0,0049	51,73%	0,0111	0,0055	50,98%
Piso4	15	0,0106	0,0051	51,44%	0,0116	0,0057	50,53%
Piso3	11,5	0,0112	0,0054	51,95%	0,0119	0,0059	50,37%
Piso2	8	0,0118	0,0056	52,86%	0,0116	0,0057	50,88%
Piso1	4,5	0,0100	0,0046	53,97%	0,0076	0,0036	52,09%

Visto de manera gráfica la tabla 4.8 se tiene lo siguiente:

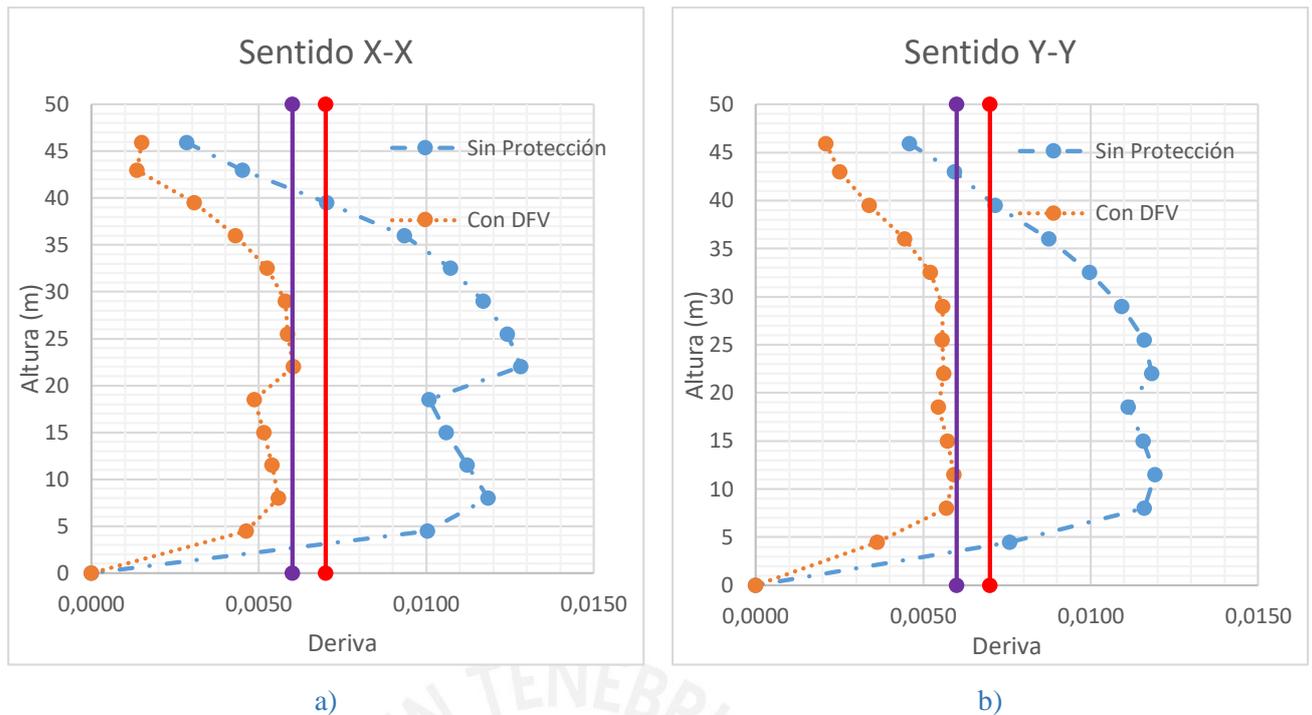
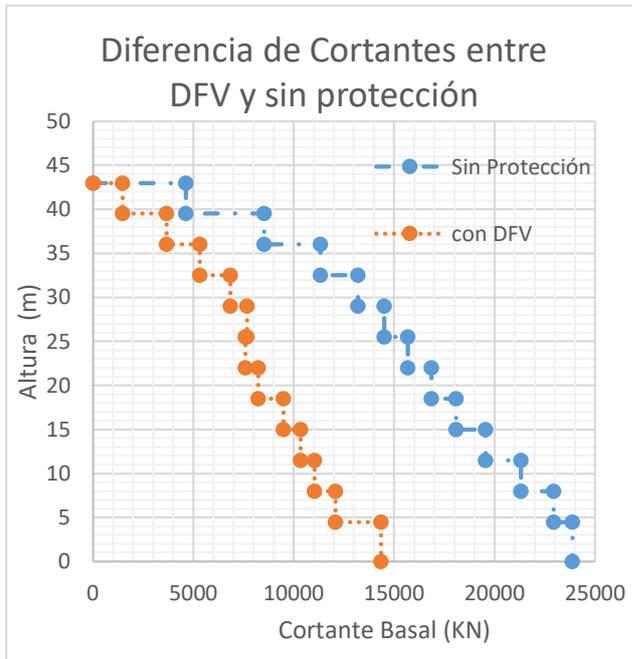


Figura 4. 17 Comparación entre derivas para el a) sentido X-X y b) sentido Y-Y con DFV

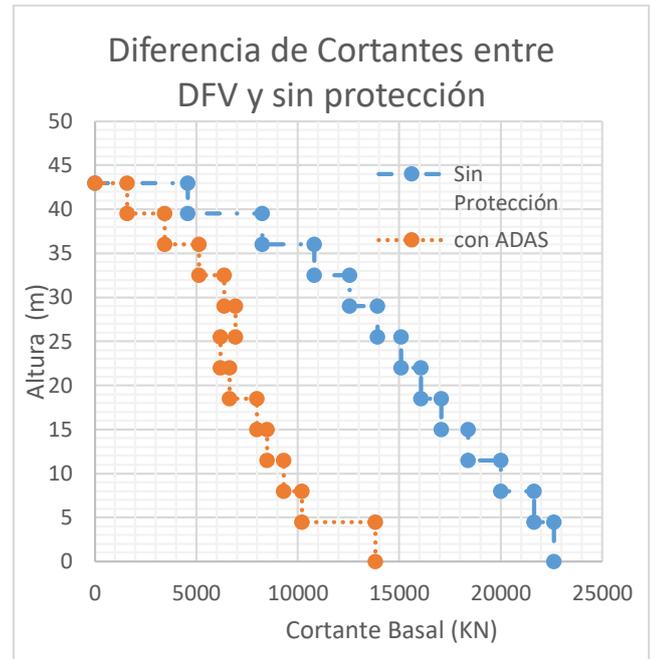
Como es de observarse en la tabla 4.8, debido a la aplicación de los disipadores de fluido viscoso, el porcentaje de reducción de deriva se encuentra superior al 50% para un sismo MCE_R . Se puede apreciar además en las figuras 4.17 (a) y (b) que la estructura cumple con la deriva objetiva impuesta del 6 %, (línea de color morada) y con la deriva de la norma E.030 en un escenario de sismo con periodo de retorno de 2475 años (línea del color rojo). Otro hecho importante de destacar es la reducción de cortantes que produce la aplicación de los DFV en la estructura como se muestra en la tabla 4.9

Tabla 4. 9 Comparación de fuerzas cortantes con DFV vs sin Protección

Piso	Cortante en X-X		% de Reducción	Cortante en Y-Y		% de Reducción
	Con DFV	Sin Protección		Con DFV	Sin Protección	
CUBIERTA	252	318	20,67%	220	345	36,10%
AZOTEA	1489	4633	67,85%	1604	4595	65,09%
Piso11	3665	8539	57,08%	3440	8241	58,25%
Piso10	5333	11330	52,93%	5129	10804	52,52%
Piso9	6840	13197	48,17%	6366	12546	49,26%
Piso8	7687	14499	46,98%	6930	13933	50,26%
Piso7	7590	15675	51,58%	6188	15096	59,01%
Piso6	8245	16851	51,07%	6638	16059	58,67%
Piso5	9483	18087	47,57%	7986	17071	53,22%
Piso4	10344	19546	47,08%	8500	18391	53,78%
Piso3	11044	21322	48,20%	9311	20012	53,47%
Piso2	12081	22955	47,37%	10218	21636	52,77%
Piso1	14337	23872	39,94%	13819	22621	38,91%



a)



b)

Figura 4. 18 Diferencia de Cortantes en DFV en a) sentido X-X y b) sentido Y-Y

Debido a la implementación de los disipadores de fluido viscoso en la estructura, como se puede evidenciar en la tabla 4.9 y Figura 4.18 (a) y (b), las fuerzas cortantes de cada piso se reducen alrededor del 50%.

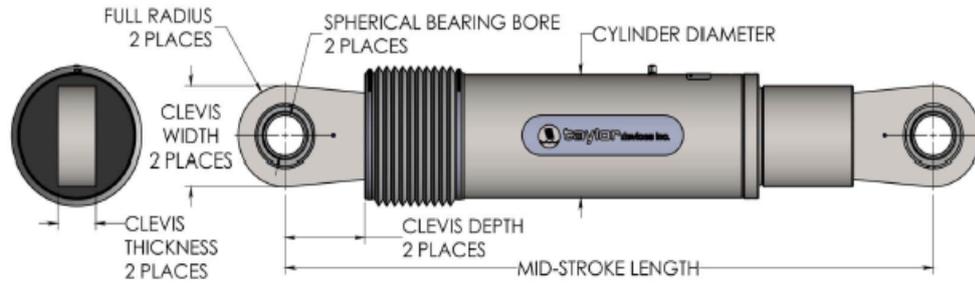
Así mismo del análisis tiempo historia se tienen las fuerzas axiales producidas en los disipadores. Para el diseño final se seleccionaron disipadores que superen a la fuerza axial obtenida del análisis tiempo-historia como se muestra en la tabla 4.10

Tabla 4. 10 Resumen de fuerzas axiales en disipadores

RESUMEN	
Cantidad	Fuerza
180	500 KN

Estos datos son importantes para elegir los dispositivos requeridos. Gracias a la empresa Taylor Devices nosotros tenemos el siguiente catálogo para la selección de los disipadores.

FLUID VISCOUS DAMPERS & LOCK-UP DEVICES



FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	SPHERICAL BEARING BORE DIAMETER (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	BEARING THICKNESS (mm)	MAXIMUM CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)	WEIGHT (kg)
250	17120	38.10	867	±75	43	33	100	83	114	41
500	17130	50.80	1067	±100	55	44	127	102	150	82
750	17140	57.15	1194	±100	59	50	155	129	184	136
1000	17150	69.85	1238	±100	71	61	185	150	210	193
1500	17180	78.20	1315	±100	77	67	205	162	241	250
2000	17170	88.90	1575	±125	91	78	235	191	285	408
3000	17180	101.80	1575	±125	142/117*	89	325/286*	210	350	705
4000	17190	127.00	1880	±125	142	111	325	210	425	1202
6500	17200	152.40	2134	±125	154	121	350	305	515	1880
8000	17210	177.80	2242	±125	178	135	415	317	585	2495

Figura 4. 19 Catálogo de DFV impuesto por Taylor Devices

Tabla 4. 11 Disipadores Taylor requeridos mediante análisis

FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	SPHERICAL BEARING BORE DIAMETER (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	BEARING THICKNESS (mm)	MAXIMUM CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)	WEIGHT (kg)
500	17130	50,8	1067	±100	55	44	127	102	150	82

Como dato final el amortiguamiento total presente en la estructura con la implementación de los disipadores de fluido viscoso para los sentidos X-X y Y-Y este dado en la tabla 4.12

Tabla 4. 12 Amortiguamiento en estructura por disipadores Fluido Viscoso

SENTIDO	Amortiguamiento efectivo
X-X	31.06%
Y-Y	23.19 %

4.4. ANÁLISIS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS TIPO ADAS

Al igual que los disipadores de fluido viscoso, en este capítulo se verificará el comportamiento de la estructura implementando los disipadores histeréticos ADAS, con el objetivo de evaluar la reducción de la respuesta sísmica y por ende el daño en la estructura. Las placas empleadas en este tipo de disipación de energía son de acero ASTM A-36 los mismos que poseen las propiedades mecánicas descritas en el AISC 360:

$$E = 2\,038\,553 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_y = 2\,530,62 \text{ kg/cm}^2$$

Donde E es el módulo de elasticidad del acero mientras que σ_y es el esfuerzo de fluencia del material.

Aplicando los criterios descritos en el capítulo anterior para verificar el comportamiento de la estructura frente a la variación de parámetros que describen a estos disipadores y utilizando la distribución de ADAS mostrada en la figura 4.20 se tendrá lo siguiente:

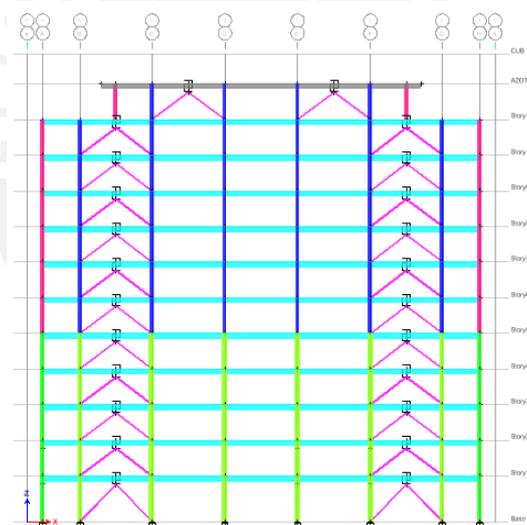


Figura 4. 20 Disposición de los disipadores metálicos ADAS

- Diferentes medidas de espesor

Para evaluar el comportamiento de la estructura, se utilizaron 30 placas con una altura de 30 cm modificando el espesor de las placas. La razón del amplio número de placas se debe al amortiguamiento adicional que se desea agregar a la estructura. Además de esto, se determinaron las propiedades no lineales de los disipadores con espesores de 2,5 3,0, 3,5 y 4,0 cm. La curva histerética de estos disipadores se muestra a continuación:

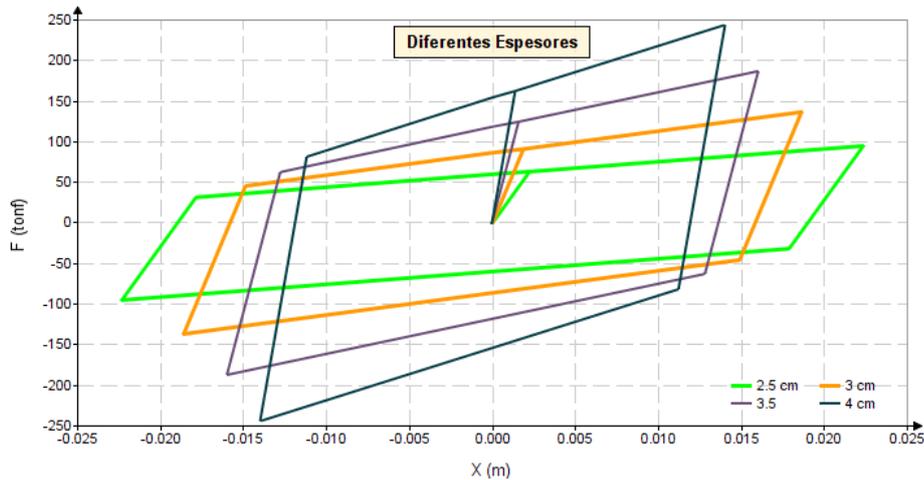


Figura 4.21 Curva histerética de ADAS para diferentes espesores

La figura 4.21 muestra las curvas histeréticas de los ADAS para diferentes espesores. A medida que se aumenta el espesor, el desplazamiento de fluencia disminuye mientras que el esfuerzo de fluencia aumenta junto a su esfuerzo último. Esto indica el aumento de rigidez y amortiguamiento en el dissipador (mayor área de la curva equivale a un mayor amortiguamiento). Si analizamos el comportamiento de la estructura junto a estos parámetros se tendrían las siguientes derivas.

Tabla 4.13 Deriva de la estructura en un tiempo – historia variando la medida del espesor

Piso	Elevación	Espesor de 2,5 cm	Espesor de 3,0 cm	Espesor de 3,5 cm	Espesor de 4,0 cm
CUBIERTA	45,9	0,0019	0,0018	0,0017	0,0017
AZOTEA	43	0,0023	0,0022	0,0022	0,0023
Piso11	39,5	0,0043	0,0043	0,0043	0,0044
Piso10	36	0,0059	0,0058	0,0059	0,0060
Piso9	32,5	0,0068	0,0068	0,0069	0,0070
Piso8	29	0,0075	0,0075	0,0076	0,0077
Piso7	25,5	0,0081	0,0080	0,0080	0,0082
Piso6	22	0,0083	0,0082	0,0083	0,0084
Piso5	18,5	0,0067	0,0066	0,0066	0,0067
Piso4	15	0,0070	0,0070	0,0070	0,0071
Piso3	11,5	0,0072	0,0073	0,0074	0,0076
Piso2	8	0,0075	0,0076	0,0077	0,0079
Piso1	4,5	0,0065	0,0065	0,0067	0,0069

Tomando los valores máximos para cada espesor tendremos lo siguiente:

Tabla 4.14 Resumen de derivas para la variación de espesores

Espesor	2,5 cm	3cm	3,5 cm	4cm
Deriva	0,0083	0,0082	0,0083	0,0084

Como es de observarse en la tabla 4.14, si aumentamos de manera gradual el espesor de las placas, las derivas en el comportamiento de la estructura son similares. Para ello se analiza la demanda en la curva histerética del dissipador de

2,5cm y 4,0cm para el registro sísmico del 1991 en los pisos inferiores y observar el efecto que se presenta en la estructura durante estos cambios.

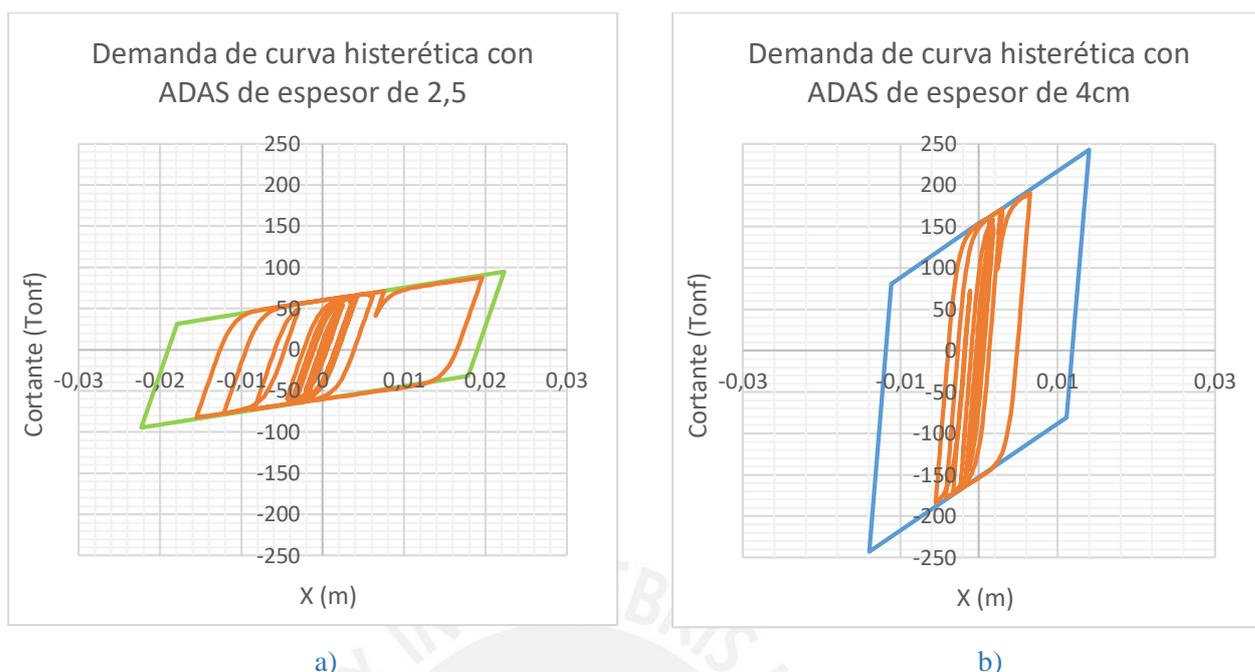


Figura 4. 22 Demanda de curva histerética en ADAS a) espesor de 2,5 cm y b) 4,0 cm

La figura 4.22 muestra la demanda histerética en el disipador de 2,5 cm y 4,0 cm. Como se aprecia, el disipador de menor espesor tiene una mayor incursión en el rango inelástico, llegando a disipar una mayor cantidad de energía a diferencia del disipador con mayor espesor. Esto se debe a que la fuerza ingresante al disipador de menor dimensión rompe la fluencia del material antes que el otro, proporcionando un amortiguamiento similar entre ambos disipadores; motivo por el cual se obtienen valores de derivas similares.

- Diferentes Número de placas

Al igual que la variante del cambio de espesor, en este caso se aumenta el número de placas gradualmente, teniendo parámetros constantes un espesor de 3cm y una altura de 30cm. Con los datos antes mencionados, se calculan las propiedades no lineales de los disipadores para 15, 30, 35, 40 y 45 placas. A continuación, se muestra la curva histerética de los disipadores:

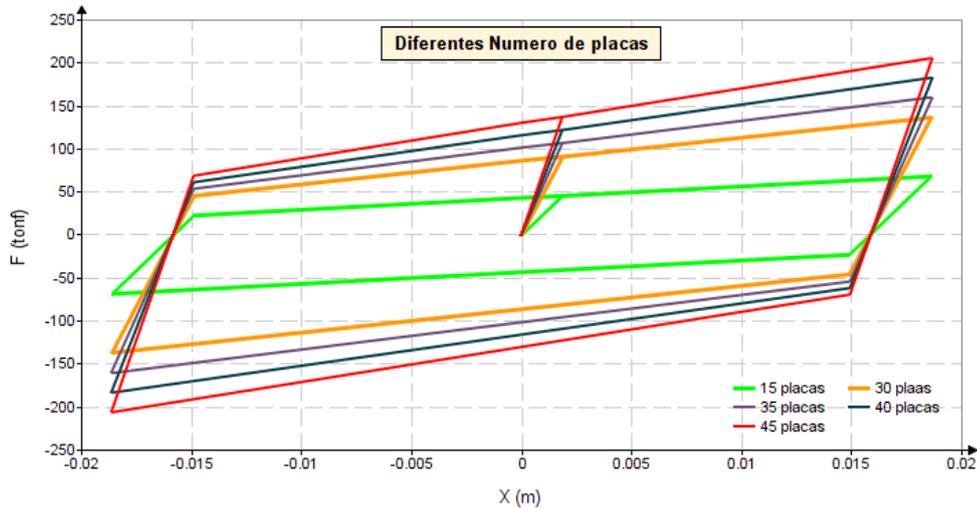


Figura 4. 23 Curva histerética de ADAS para diferente número de placas

La figura 4.23 muestra las curvas histeréticas de los ADAS para diferente número de placas. A medida que se aumenta el número de las placas y se mantiene constante el espesor y altura del elemento, el desplazamiento de fluencia es el mismo para todos, mientras que el esfuerzo de fluencia va creciendo en cada caso. Al igual que el caso anterior, la rigidez y el amortiguamiento crecen en el disipador, permitiendo un mejor control de respuesta en la estructura. Si analizamos el comportamiento de la estructura junto a estos parámetros se tendrían las siguientes derivas.

Tabla 4. 15 Deriva de la estructura en un tiempo – historia variando el número de placas.

Piso	Elevación	15 placas	30 Placas	35 Placas	40 Placas	45 Placas
CUBIERT A	45,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0017
AZOTEA	43	0,0024	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022
Piso11	39,5	0,0045	0,0043	0,0042	0,0042	0,0042
Piso10	36	0,0061	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058
Piso9	32,5	0,0070	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068
Piso8	29	0,0078	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075
Piso7	25,5	0,0084	0,0080	0,0079	0,0079	0,0080
Piso6	22	0,0087	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082
Piso5	18,5	0,0069	0,0066	0,0066	0,0066	0,0065
Piso4	15	0,0071	0,0070	0,0069	0,0069	0,0070
Piso3	11,5	0,0074	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073
Piso2	8	0,0078	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076
Piso1	4,5	0,0066	0,0065	0,0065	0,0066	0,0066

Tomando los valores máximos para cada número de placas tendremos lo siguiente:

Tabla 4. 16 Resumen de derivas para la variación de número de placas

	15	30	35	40	45
Deriva	0,0087	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082

Como es de observarse en la tabla 4.16, si aumentamos de manera gradual el número de las placas, la variación de las derivas de 15 a 30 placas tiene un cambio considerable, luego de esto, las derivas se mantienen similares. Si se analiza la demanda histerética en el dissipador de 15 y 45 placas del primer piso como ejemplo se tendría lo siguiente:

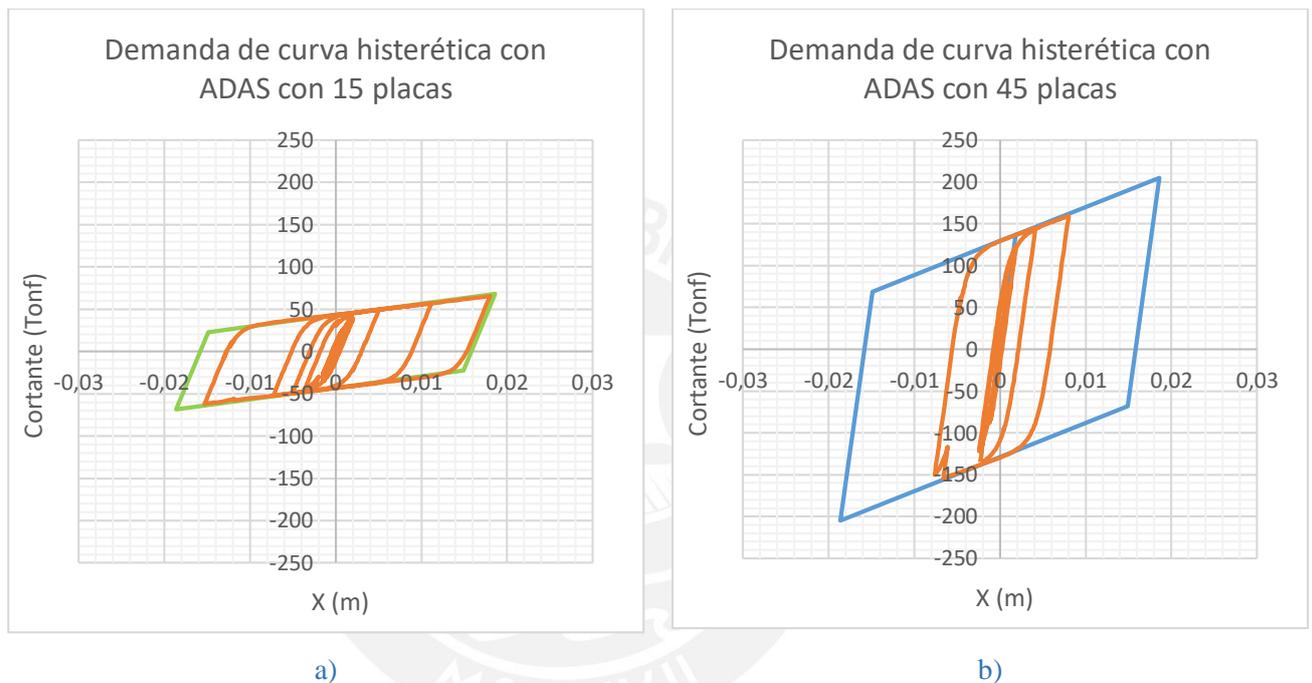


Figura 4. 24 Demanda de curva histerética en ADAS a) 15 placas y b) 45 placas

La figura 4.24 muestra la demanda histerética en el dissipador de 15 placas y 45 placas. Como se aprecia, el dissipador con menor número de placas tiene una mayor incursión en el rango inelástico, absorbiendo en su mayor parte la histéresis íntegra del dissipador. Debido al menor número de placas y al poco amortiguamiento, el sistema de disipación está trabajando a su máximo desarrollo. Ese efecto no ocurre en el dissipador con el mayor número de placas, ya que presenta una mayor área envolvente en su curva histerética, resistiendo esfuerzos cortantes de mayor magnitud.

Por lo tanto, la mejor opción para llegar a la deriva objetivo propuesta en esta investigación, se procede a aumentar el número de arriostres en la estructura como se aprecia en la figura 4.25. Tomando de ejemplo lo anterior, se realiza una

comparación entre el aumento de arriostres con un número importante de placas junto a un espesor de 3cm y una altura de 30 cm.

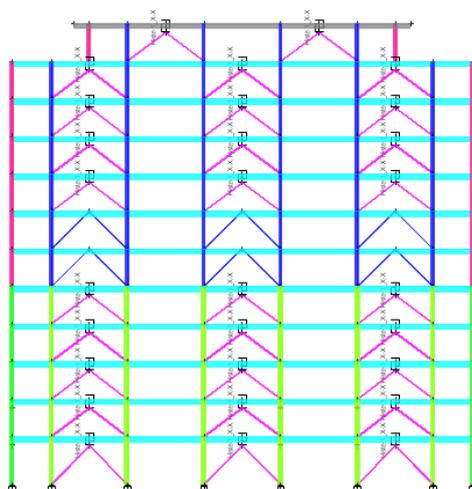


Figura 4. 25 Aumento del número de arriostres

Tabla 4. 17 Deriva de la estructura en un tiempo – historia aumentando el número de arriostres y variando el número de placas significativamente.

Piso	Elevación	30 Placas	160 Placas
CUBIERTA	45,9	0,0021	0,0024
AZOTEA	43	0,0021	0,0024
Piso11	39,5	0,0038	0,0044
Piso10	36	0,0053	0,0059
Piso9	32,5	0,0063	0,0067
Piso8	29	0,0068	0,0075
Piso7	25,5	0,0067	0,0082
Piso6	22	0,0070	0,0085
Piso5	18,5	0,0062	0,0068
Piso4	15	0,0067	0,0072
Piso3	11,5	0,0071	0,0076
Piso2	8	0,0073	0,0080
Piso1	4,5	0,0063	0,0071

Tomando los valores máximos para cada número de placas tendremos lo siguiente:

Tabla 4. 18 Resumen de derivas para la variación de número de placas

	30	160
Deriva	0,0073	0,0085

De acuerdo a los resultados observados en la tabla 4.17 y 4.18, es evidente que el aumento de placas o arriostres no es la mejor solución en la aplicación de los disipadores ADAS para estructuras flexibles. Es así que, para poder llegar a la deriva propuesta por esta investigación, se procede a realizar el aumento de las secciones de los elementos estructurales.

C50x70 → C60x80

C40x65 → C 55x75

V 30x50 → V30x65

V30x60 → V30x75

Realizando un mismo proceso iterativo, se llegó a determinar las propiedades óptimas de las dimensiones de los disipadores como se propone a continuación en la tabla 4.19.

Tabla 4. 19 Dimensión de disipadores ADAS

TIPOS	b1 (cm)	h (cm)	t (cm)	n	b2 (cm)	K _{DDE} (tonf/m)	K2 (tonf/m)	F _y (tonf)	Desplazamiento de fluencia Δ _y (m)	Desplazamiento de ultimo Δ _u (m)	V _u (tonf)	K _{EDDE} (tonf/m)
ADAS 3 X-X (11 - azotea)	10,00	20,00	1,75	10,00	2,00	7285,18	364,26	10,34	0,00142	0,014	15,50	1056,35
ADAS 2 X-X (5,8-10)	16,00	30,00	2,50	20,00	3,00	20451,36	1022,57	45,70	0,00223	0,022	68,54	2965,45
ADAS 1 X-X (1-4)	16,00	30,00	2,50	25,00	3,00	25566,17	1278,31	57,12	0,00223	0,022	85,69	3707,09
ADAS 1 Y-Y (1-10)	16,00	30,00	2,50	20,00	3,00	20451,36	1022,57	45,70	0,00223	0,022	68,54	2965,45
ADAS 2 Y-Y (10-azotea)	10,00	20,00	1,75	10,00	2,00	7285,18	364,26	10,34	0,00142	0,014	15,50	1056,35

Un total de 6 arriostres fueron utilizados en el sentido X-X, mientras que para el sentido Y-Y se utilizaron 8 arriostres. Estos fueron aplicados en el perímetro esquinero de la estructura a diferencia de 2 arriostres aplicados en el interior de la estructura en el sentido X-X y 4 arriostres aplicados en el sentido Y-Y como se muestra en las figuras 4.26 y 4.27:

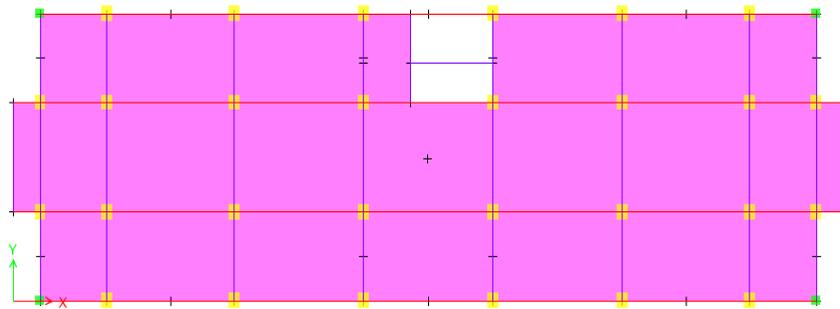


Figura 4. 26 Distribución de Disipadores metálicos ADAS

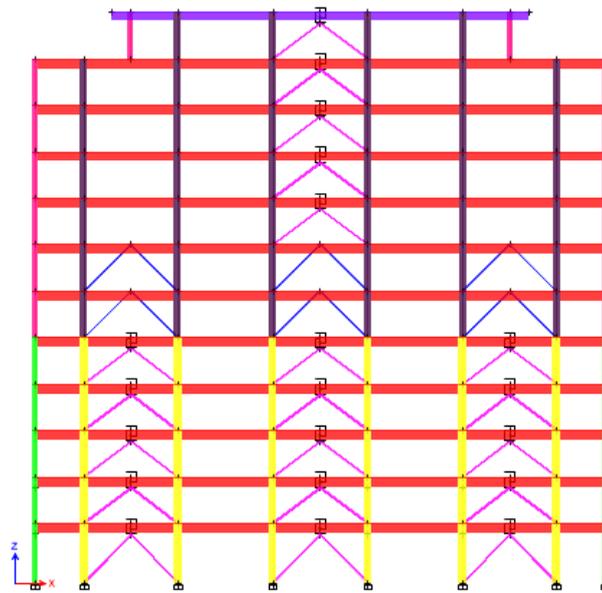


Figura 4. 27 Vista en elevación de estructura con Disipadores ADAS

4.4.1. Análisis Modal

La aplicación de los disipadores histeréticos ADAS modifica el periodo de la estructura, haciendo que aumente la demanda sísmica de la edificación y más aún si sus elementos estructurales como vigas y columnas han sido modificados.

Tabla 4. 20 Resultados de un análisis Modal para disipadores ADAS

MODOS	T	UX	UY	RZ
1	1,548	0%	79,2%	0%
2	1,445	81,53%	0%	0,37%
3	1,284	0,28%	0%	79,31%

Como se observa en la tabla 4.20 el aumento de los periodos de la estructura es notorio en comparación a la implementación de los disipadores de fluido viscoso, demostrándose el aumento de rigidez de nuestra edificación.

4.4.2. Análisis Dinámico Tiempo – Historia.

Aplicando los mismos conceptos para el análisis dinámico tiempo – historia previsto para los amortiguadores de fluido viscoso tendremos lo siguiente:

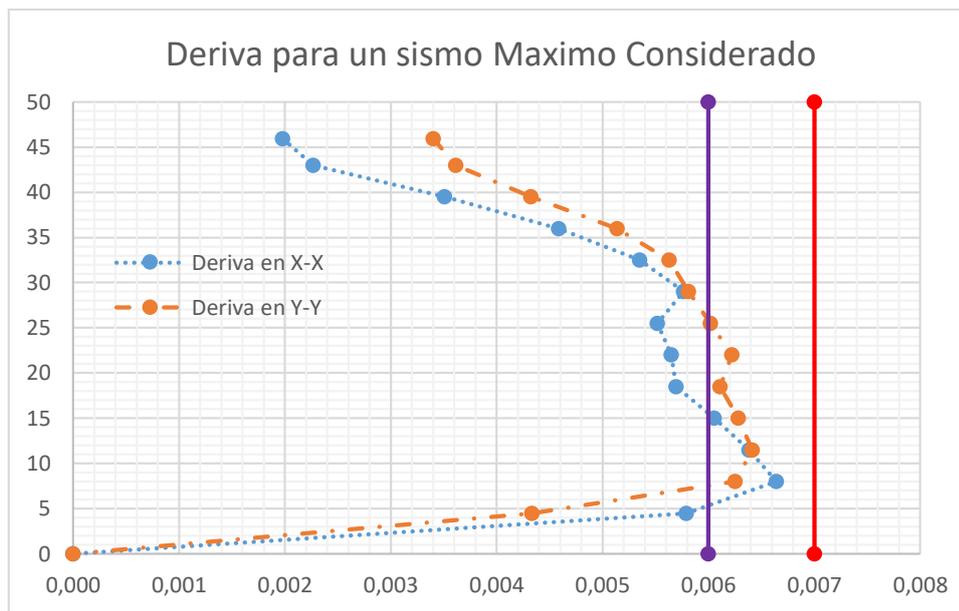


Figura 4. 28 Deriva de estructura con disipadores metálicos ADAS

Con la aplicación de los disipadores metálicos ADAS no se logra cumplir con la deriva objetivo propuesta en esta investigación (Línea morada de figura 4.28). Por lo cual se procede a cambiar la deriva objetivo a un valor de 6,5 ‰ mientras se cumpla con lo impuesto en la norma E.030 (línea de color rojo) en un escenario de sismo con periodo de retorno de 2475 años. A continuación, se muestra la comparación de las derivas de la estructura base junto con la estructura ultima modificada.

Tabla 4. 21 Comparación entre derivas para disipadores ADAS

Piso	Elevación	Deriva en X-X		% de Reducción	Deriva en Y-Y		% de Reducción
		Sin Protección	Con Protección		Sin Protección	Con Protección	
CUBIERTA	45,9	0,0029	0,0020	30,66%	0,0046	0,0034	25,87%
AZOTEA	43	0,0045	0,0023	49,76%	0,0059	0,0036	39,08%
Piso11	39,5	0,0070	0,0035	50,10%	0,0072	0,0043	39,58%
Piso10	36	0,0093	0,0046	50,87%	0,0088	0,0051	41,26%
Piso9	32,5	0,0107	0,0054	50,12%	0,0100	0,0056	43,50%
Piso8	29	0,0117	0,0058	50,73%	0,0109	0,0058	46,83%
Piso7	25,5	0,0124	0,0055	55,61%	0,0116	0,0060	48,10%
Piso6	22	0,0128	0,0057	55,90%	0,0118	0,0062	47,34%
Piso5	18,5	0,0101	0,0057	43,56%	0,0111	0,0061	45,09%
Piso4	15	0,0106	0,0061	42,86%	0,0116	0,0063	45,73%
Piso3	11,5	0,0112	0,0064	43,12%	0,0119	0,0064	46,18%
Piso2	8	0,0118	0,0066	43,91%	0,0116	0,0063	46,13%
Piso1	4,5	0,0100	0,0058	42,34%	0,0076	0,0043	42,93%

Visto de manera gráfica la tabla 4.21 se tiene lo siguiente:

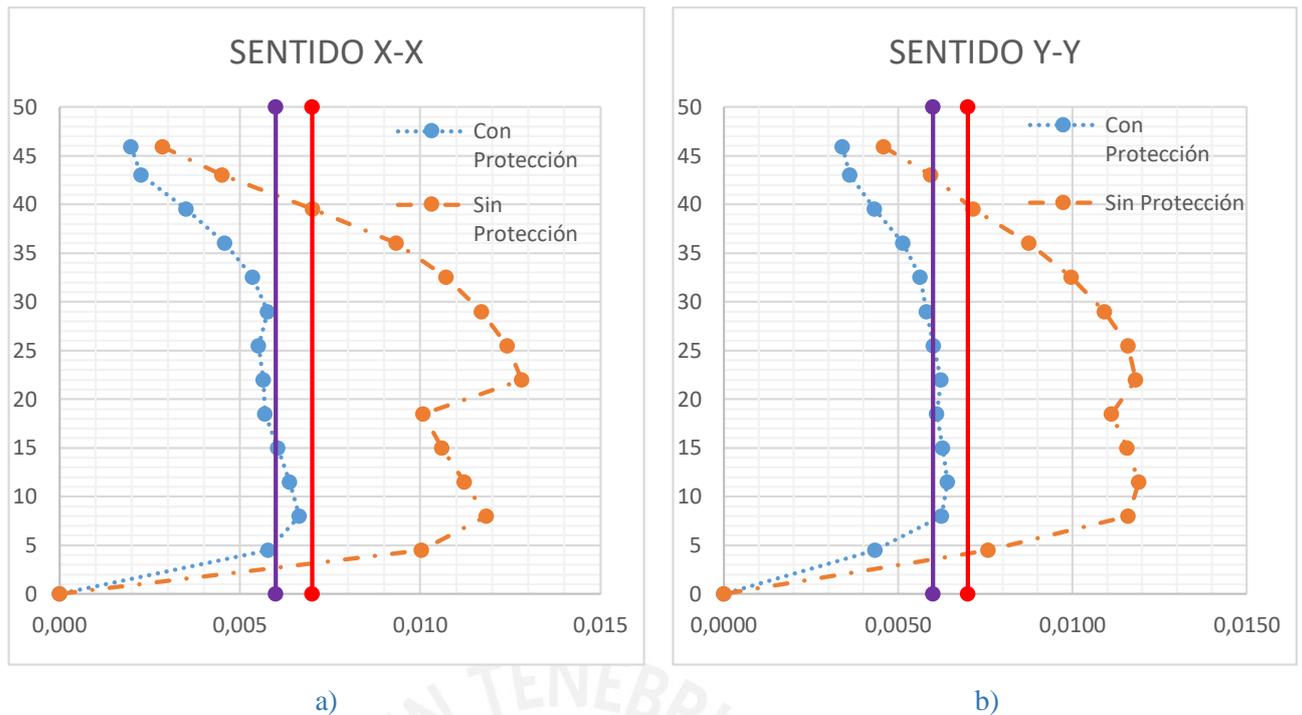


Figura 4. 29 Comparación entre derivas entre estructura original junto con ADAS

La reducción de las derivas entre la estructura original y la edificación final implementando los disipadores ADAS se encuentra entre el 40% y 60% aproximadamente (como se muestra en la tabla 4.21) Así mismo se observa, en las figuras 4,29 (a) y (b), la estructura no cumple con la deriva impuesta del 6 % inicialmente (línea de color morado), pero a su vez cumple con las especificaciones de la norma E.030 (línea de color rojo) para un escenario de sismo con periodo de retorno de 2475 años.

A continuación, se muestra la comparación de reducción de derivas que ocurre en la estructura con solo aumentar las secciones de sus elementos estructurales en la tabla 4.22

Tabla 4. 22 Comparación de estructura base junto a estructura con secciones aumentadas

Piso	Elevación	Deriva en X-X		% de Reducción	Deriva en Y-Y		% de Reducción
		Sin Protección	Secc. aumentadas sin ADAS		Sin Protección	Secc. aumentadas sin ADAS	
CUBIERTA	45,9	0,0029	0,0019	34,07%	0,0046	0,0036	21,15%
AZOTEA	43	0,0045	0,0025	45,03%	0,0059	0,0043	28,34%
Piso11	39,5	0,0070	0,0039	43,79%	0,0072	0,0051	28,83%
Piso10	36	0,0093	0,0053	43,62%	0,0088	0,0061	29,76%
Piso9	32,5	0,0107	0,0062	42,49%	0,0100	0,0069	30,95%
Piso8	29	0,0117	0,0068	41,94%	0,0109	0,0073	32,78%
Piso7	25,5	0,0124	0,0073	41,04%	0,0116	0,0077	33,74%
Piso6	22	0,0128	0,0076	40,64%	0,0118	0,0079	33,16%
Piso5	18,5	0,0101	0,0071	29,99%	0,0111	0,0078	29,85%
Piso4	15	0,0106	0,0074	30,64%	0,0116	0,0081	30,34%
Piso3	11,5	0,0112	0,0076	32,38%	0,0119	0,0083	30,71%
Piso2	8	0,0118	0,0078	33,86%	0,0116	0,0081	30,00%
Piso1	4,5	0,0100	0,0068	32,29%	0,0076	0,0056	25,70%

La tabla 4.22 muestra un porcentaje de reducción de derivas entre el 30% y 45% cuando se aumentan las secciones de los elementos estructurales sin la aplicación de los disipadores ADAS.

Como resultado final se presenta la comparación de la estructura de secciones aumentadas junto a la misma estructura implementando los disipadores histeréticos ADAS en la tabla 4.23.

Tabla 4. 23 Comparación de estructura con secciones aumentadas junto a estructura ultima modificada.

Piso	Elevación	Deriva en X-X		% de Reducción	Deriva en Y-Y		% de Reducción
		Secc. aumentadas sin ADAS	con ADAS		Secc. aumentadas sin ADAS	con ADAS	
CUBIERTA	45,9	0,0019	0,0020	-5,17%	0,0036	0,0034	5,99%
AZOTEA	43	0,0025	0,0023	8,60%	0,0043	0,0036	14,98%
Piso11	39,5	0,0039	0,0035	11,23%	0,0051	0,0043	15,11%
Piso10	36	0,0053	0,0046	12,86%	0,0061	0,0051	16,38%
Piso9	32,5	0,0062	0,0054	13,27%	0,0069	0,0056	18,16%
Piso8	29	0,0068	0,0058	15,14%	0,0073	0,0058	20,90%
Piso7	25,5	0,0073	0,0055	24,71%	0,0077	0,0060	21,67%
Piso6	22	0,0076	0,0057	25,71%	0,0079	0,0062	21,21%
Piso5	18,5	0,0071	0,0057	19,39%	0,0078	0,0061	21,73%
Piso4	15	0,0074	0,0061	17,62%	0,0081	0,0063	22,09%
Piso3	11,5	0,0076	0,0064	15,88%	0,0083	0,0064	22,32%
Piso2	8	0,0078	0,0066	15,19%	0,0081	0,0063	23,04%
Piso1	4,5	0,0068	0,0058	14,84%	0,0056	0,0043	23,19%

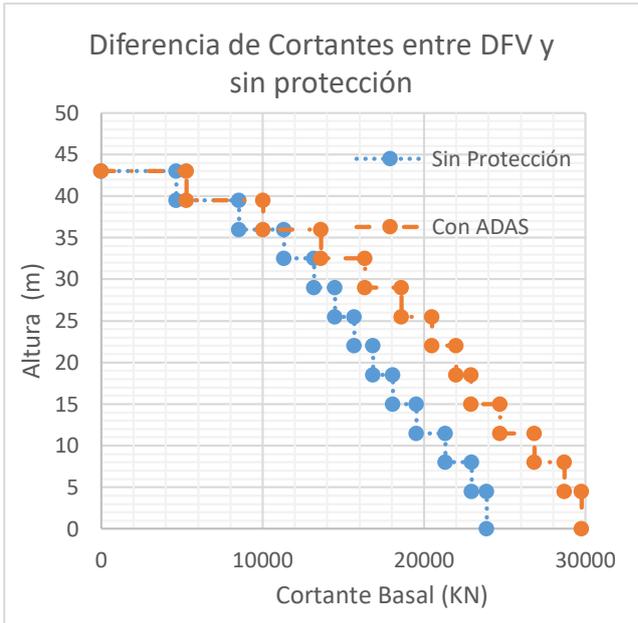
Junto a la aplicación de los disipadores metálicos ADAS y al aumento de las secciones estructurales, se tiene un porcentaje de reducción de derivas entre el 8% y 26% aproximadamente como se observa en la tabla 4.23.

Haciendo la comparación entre cortantes para la estructura de base y la edificación final con ADAS tendremos lo siguiente:

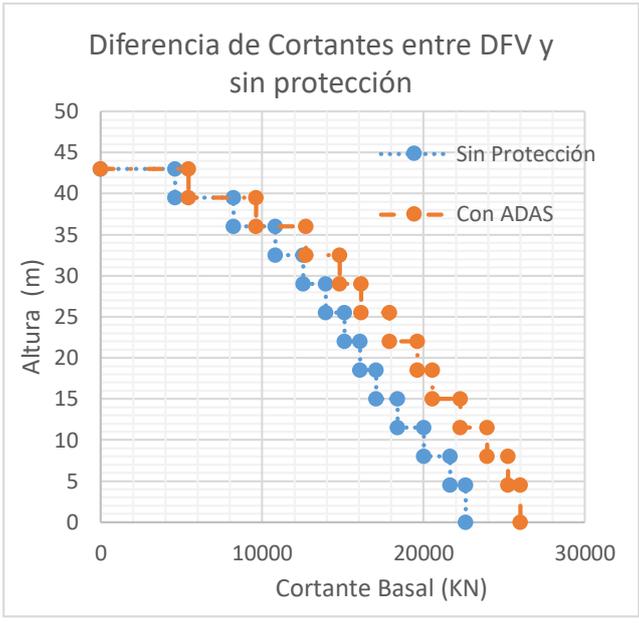
Tabla 4. 24 Comparación de cortantes entre estructura de secciones aumentadas y ADAS.

Piso	Cortante en X-X		% de Incremento	Cortante en Y-Y		% de Incremento
	Con ADAS	Estr. Base		Con ADAS	Estr. Base	
CUBIERTA	427	318	34,41%	457	345	32,53%
AZOTEA	5276	4633	13,89%	5446	4595	18,54%
Piso11	10033	8539	17,49%	9624	8241	16,78%
Piso10	13611	11330	20,13%	12701	10804	17,56%
Piso9	16357	13197	23,95%	14804	12546	18,00%
Piso8	18613	14499	28,38%	16141	13933	15,85%
Piso7	20495	15675	30,74%	17913	15096	18,66%
Piso6	21991	16851	30,50%	19631	16059	22,25%
Piso5	22918	18087	26,71%	20539	17071	20,31%
Piso4	24722	19546	26,48%	22291	18391	21,21%
Piso3	26859	21322	25,97%	23946	20012	19,66%
Piso2	28701	22955	25,03%	25238	21636	16,65%
Piso1	29756	23872	24,65%	25999	22621	14,93%

Visto de manera gráfica lo anterior tendremos.



a)

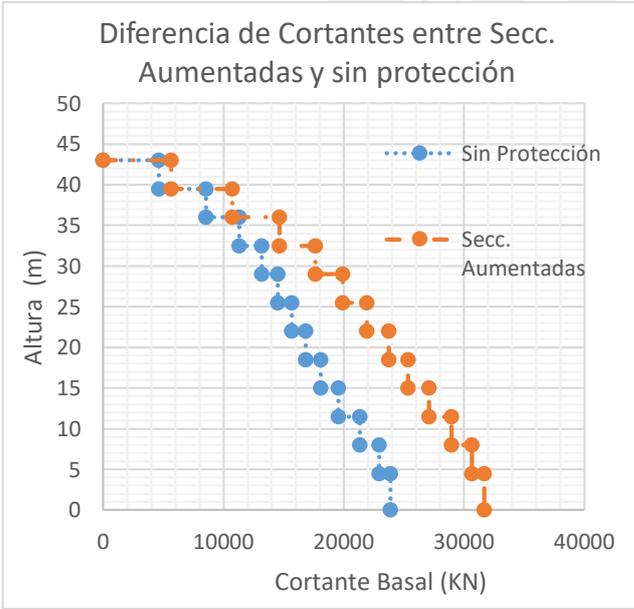


b)

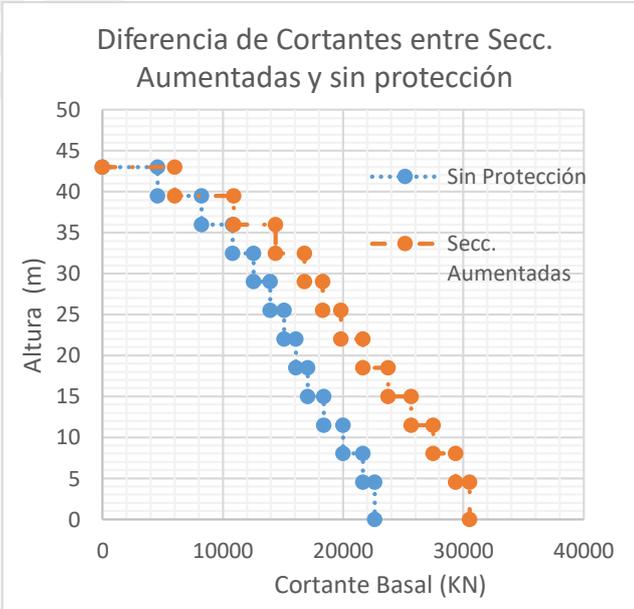
Figura 4. 30 Diferencia de cortantes en disipadores ADAS a) sentido X-X y b) sentido Y-Y estructura Base junto con ADAS

La tabla 4.24 y Figura 30 (a) y (b) muestra un incremento de cortantes entre el 13 y 30%, esto se debe a la demanda sísmica impuesta por la nueva estructura cuando se aumentaron las secciones de sus elementos estructurales y por ser una edificación más rígida debido a la implementación de los ADAS.

La comparación de cortantes para la estructura de secciones aumentadas sin protección sísmica y la estructura base estará da la siguiente manera:



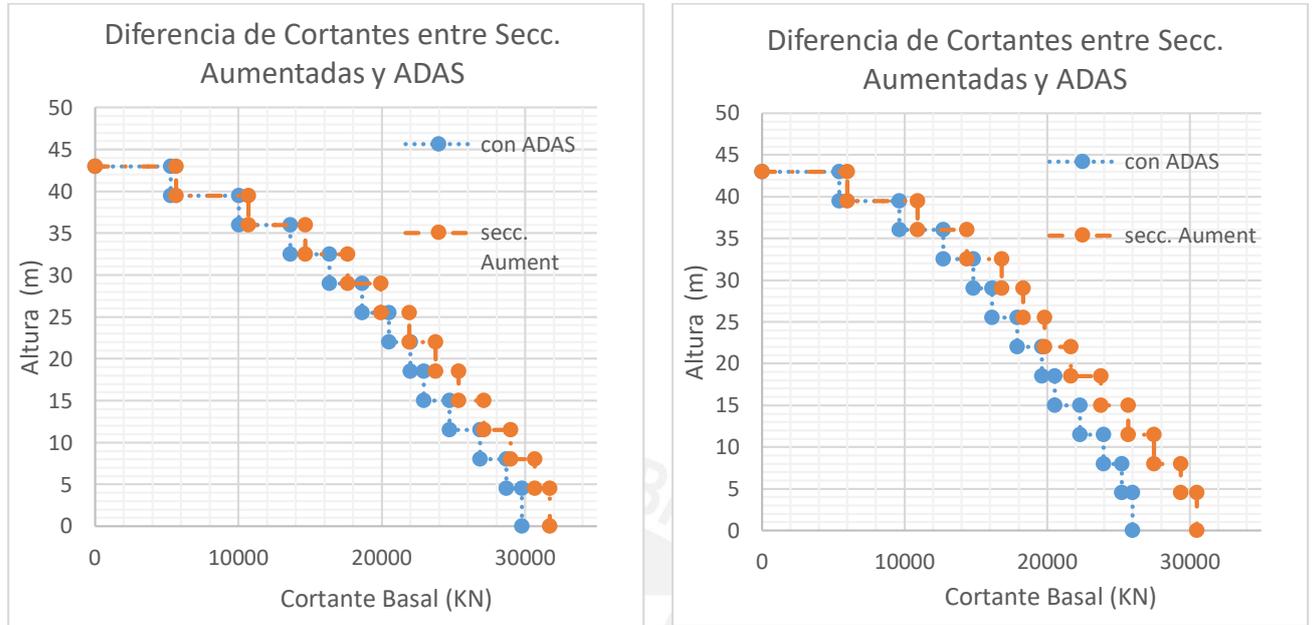
a)



b)

Figura 4. 31 Diferencia de Cortantes entre edificio Base y la edificación con aumento de secciones

La Figura 4.31 evidencia el crecimiento de la solicitación de cortante debido al aumento de las secciones de los elementos estructurales, dando porcentajes entre 20% y 40% en comparación a la estructura base. Finalmente comparamos la estructura de secciones aumentadas con la edificación ultima planteado junto a ADAS visto en la Figura 4.32



a)

b)

Figura 4. 32 Diferencia de Cortantes para edificio de secciones aumentadas y la edificación última propuesta con ADAS

Evidentemente se observa la disminución de cortante para la estructura de secciones aumentadas junto con la misma estructura implementada en ella los Disipadores ADAS;

Los porcentajes de disminución varían entre el 5% y 15% como se muestra en la tabla 4.25

Tabla 4. 25 Comparación entre cortantes de estructura final con disipadores ADAS junto a estructura con el aumento de secciones en elementos estructurales

Piso	Cortante en X-X		% de Reducción	Cortante en Y-Y		% de Reducción
	Secc. Aumentadas	con ADAS		Secc. Aumentadas	con ADAS	
CUBIERTA	442	427	3,35%	472	457	3,20%
AZOTEA	5649	5276	6,61%	5985	5446	9,00%
Piso11	10722	10033	6,43%	10919	9624	11,86%
Piso10	14664	13611	7,18%	14365	12701	11,58%
Piso9	17625	16357	7,19%	16803	14804	11,90%
Piso8	19931	18613	6,61%	18305	16141	11,82%
Piso7	21932	20495	6,55%	19823	17913	9,63%
Piso6	23757	21991	7,43%	21650	19631	9,32%
Piso5	25354	22918	9,61%	23755	20539	13,54%
Piso4	27104	24722	8,79%	25673	22291	13,17%
Piso3	28972	26859	7,29%	27499	23946	12,92%
Piso2	30656	28701	6,38%	29362	25238	14,05%
Piso1	31704	29756	6,15%	30506	25999	14,77%

Como dato final el amortiguamiento efectivo presente en la estructura con la implementación de los disipadores metálicos ADAS para los sentidos X-X y Y-Y está dado en la tabla 4.26

Tabla 4. 26 Amortiguamiento en estructura por disipadores ADAS

Dirección	Amortiguamiento efectivo
X-X	8,77%
Y-Y	9,57 %

4.5. ANÁLISIS NO LINEAL DE LOS DISIPADORES

4.5.1. Disipadores de Fluido Viscoso.

En este apartado se evalúa la cantidad de energía que disipan los disipadores a través de la ecuación 3.8 dada en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas.

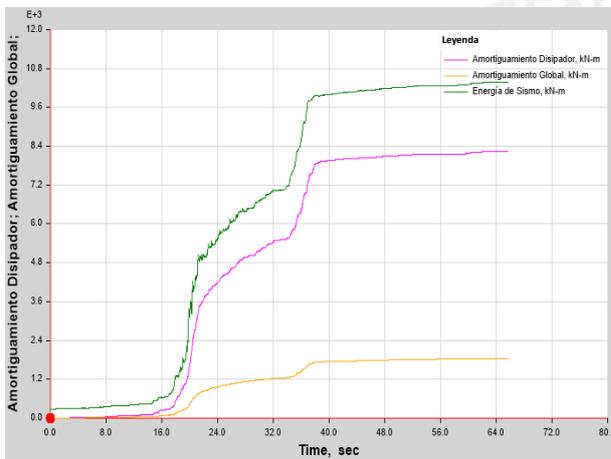


Figura 4. 33 Balance energético de 1966

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{9696}{12669} = 76,35\%$$

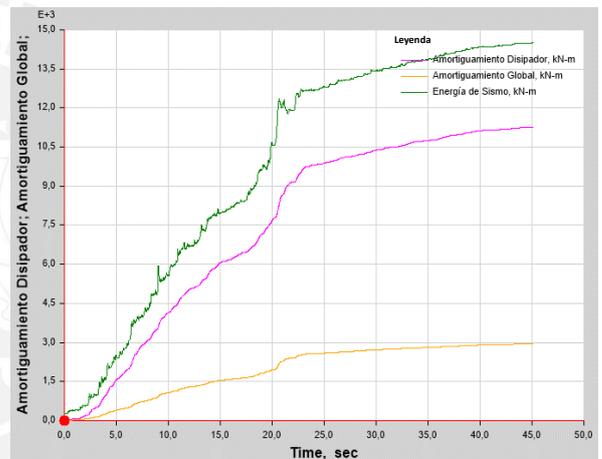


Figura 4. 34 Balance energético de 1970

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{7746}{10016} = 77,34\%$$

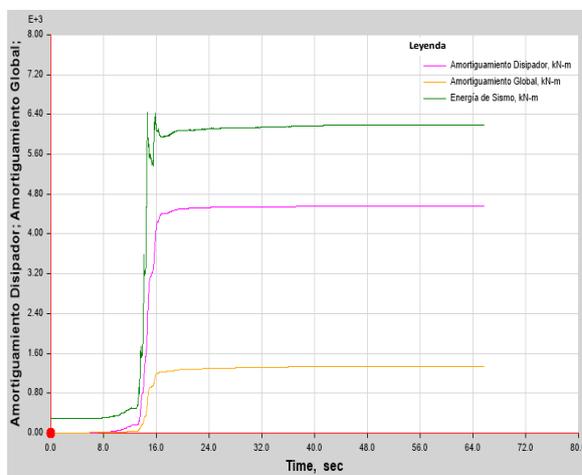


Figura 4. 35 Balance energético de 1991

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{4440}{6281} = 70,70\%$$

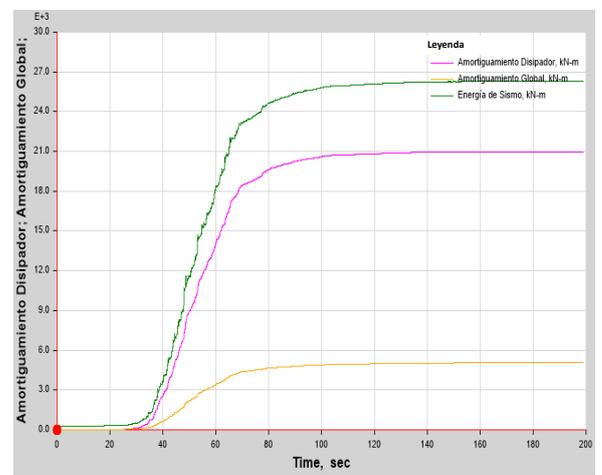


Figura 4. 36 Balance energético de 2001

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{20334}{25979} = 78,27\%$$

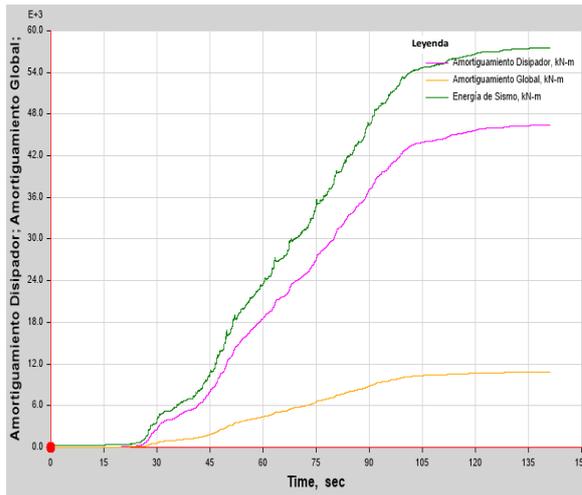


Figura 4. 37 Balance energético de 2014

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{3355}{4372} = 76,75\%$$

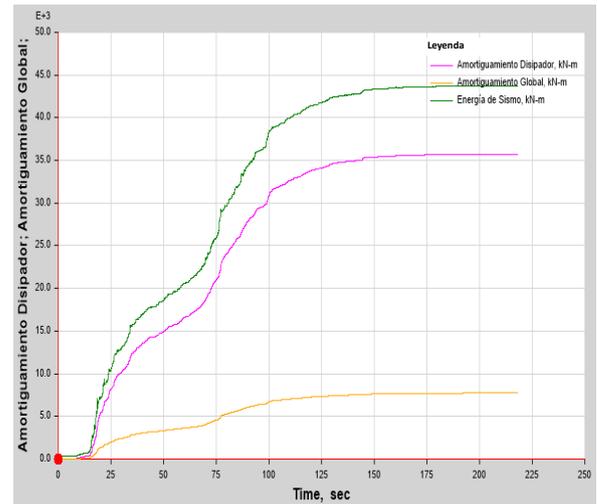


Figura 4. 38 Balance energético de 2007

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{33047}{41689} = 79,27\%$$

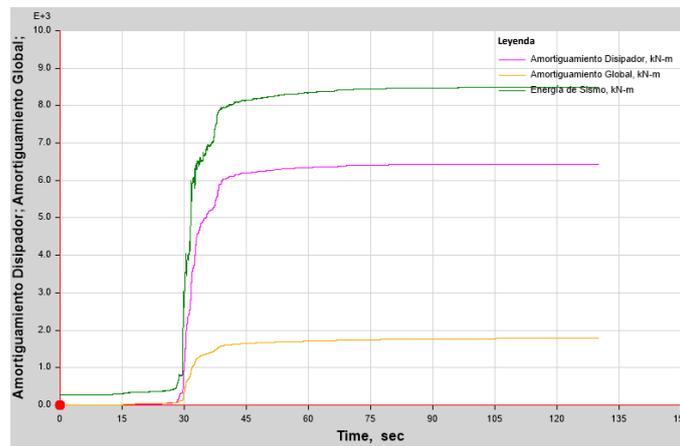


Figura 4. 39 Balance energético de 2015

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{6209}{8497} = 73,07\%$$

Las Figuras 4.33 hasta la 4.39 muestran el porcentaje de disipación que toman los disipadores de fluido viscoso durante las señales sísmicas propuestas. Para obtener un promedio de ellos a continuación se tabulan esos datos y se obtendrá lo siguiente:

Tabla 4. 27 Porcentajes de disipación de energía tomada por los disipadores

Señal Sísmica	% de Disipación
1970	76,28
1966	78,93
1991	81,58
2001	79,76
2007	73,97
2014	77,6
2014	78,87
PROMEDIO	78,14

La tabla 4.27 muestra el promedio de la energía tomada por los disipadores, tomando un valor promedio del 78,14%, es decir, durante un evento sísmico los disipadores de fluido

viscoso captaran las $\frac{3}{4}$ partes de la cantidad de energía liberada por un terremoto dentro de la estructura aproximadamente.

Así mismo se muestra a continuación la curva histerética del link K78 que toman los disipadores durante los eventos sísmicos, otorgando así la máxima fuerza axial y su máximo desplazamiento que resulta dentro de ellos.

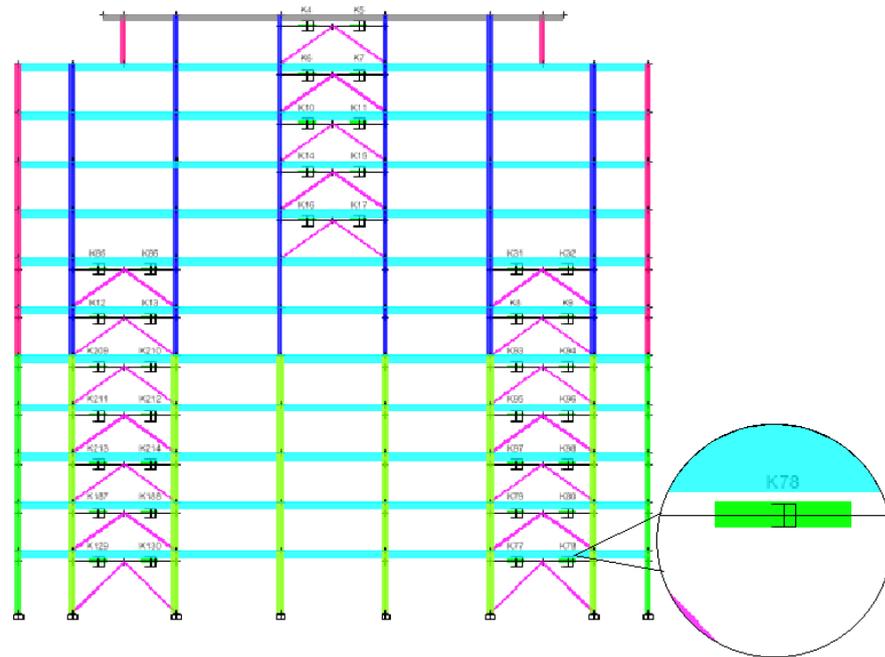


Figura 4. 40 Selección de Amortiguador K78



Figura 4. 41 Curva histerética disipador K78 para registro de 1966

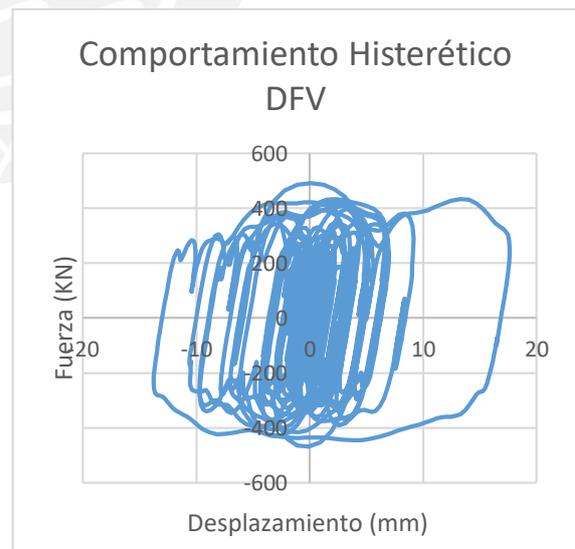


Figura 4. 42 Curva histerética disipador K78 para registro de 1970

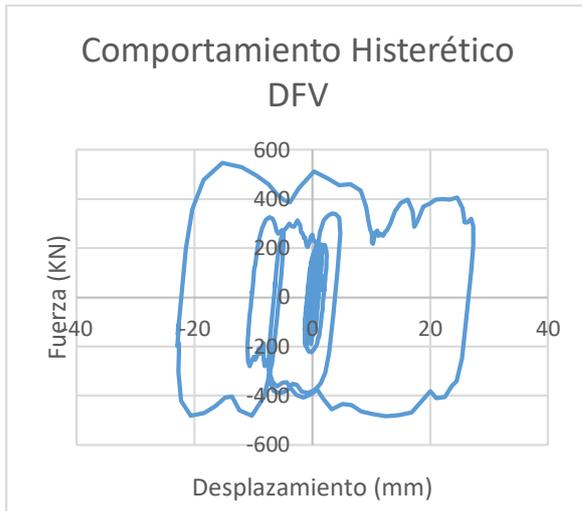


Figura 4. 43 Curva histerética disipador K78 para registro de 1991

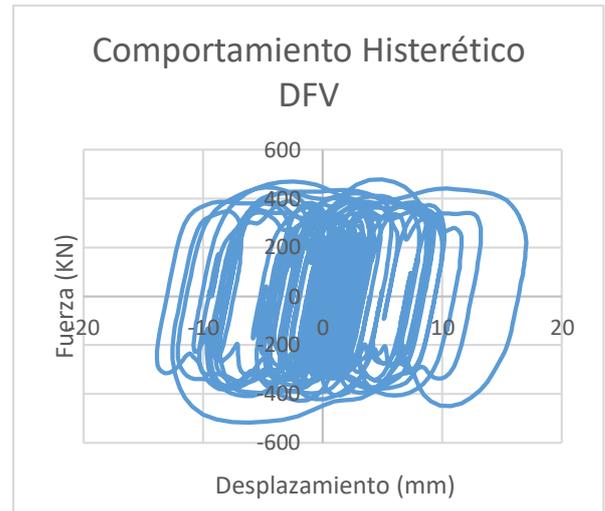


Figura 4. 44 Curva histerética disipador K78 para registro de 2001



Figura 4. 45 Curva histerética disipador K78 para registro de 2007



Figura 4. 46 Curva histerética disipador K78 para registro de 2014

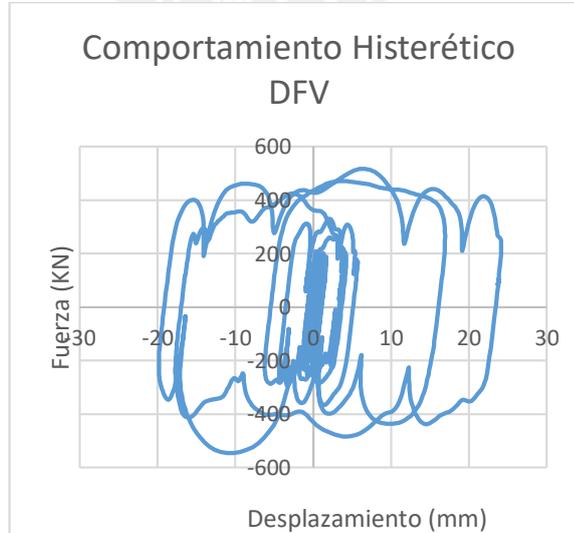


Figura 4. 47 Curva histerética disipador K78 para registro de 2015

Como es de observarse en las Figuras 4.41 a 4.47, el comportamiento de las curvas histeréticas del disipador frente a cada sismo es el esperado, es decir que se logra la forma elíptica, curva característica que presentan los disipadores de fluido viscoso. Por otro lado, si se llegara a dar el caso de la Figura 4.48, sería necesario cambiar la disposición de los disipadores o realizar una reducción del coeficiente “C” en el cálculo de los disipadores, ya que esto puede prever un comportamiento incorrecto en el trabajo de los disipadores, es decir, que no estarían aportando al incremento del amortiguamiento de la estructura (Díaz, 2014)

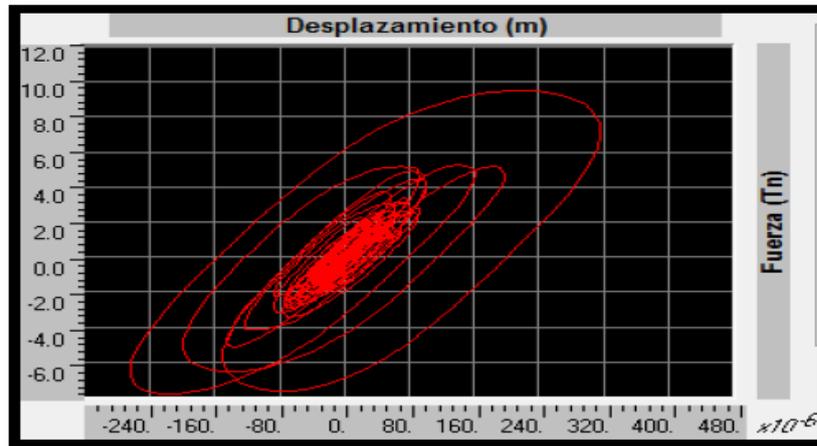


Figura 4. 48 Curva histerética incorrecta de un DFV (Díaz, 2014)

En la tabla 4.28 se muestran las fuerzas axiales máximas y desplazamientos máximos de las gráficas anteriores, cabe destacar que hay que considerar además las fuerzas axiales de los registros donde se cambian el sistema de coordenadas.

Tabla 4. 28 Fuerzas Axiales máximas y desplazamientos máximos

Señal Sísmica	Fuerza Axial (KN)	Desplazamiento (mm)
1966 A	491	16,90
1970 A	490	17,65
1991 A	546	27,34
2001 A	517	17,02
2007 A	526	19,51
2014 A	452	14,98
2015 A	545	24,16
PROMEDIO	495	20,84

Como es de apreciarse en la tabla 4.28 los máximos desplazamientos no superan los 30mm, concluyendo así que el disipador se comporta según lo diseñado, actuando dentro del desplazamiento último.

DUCTILIDAD DEMANDADA

La estructura original presenta un cortante basal 2 395 y 2 254 KN para los sentidos X-X y Y-Y respectivamente reducido por un factor R=8 según la normativa E.030, es decir,

donde se espera que la estructura presente daños importantes en sus componentes estructurales debido a la ductilidad demandada. Estudiando la estructura para un sismo de 2475 años, estas fuerzas alcanzan valores 23 872 y 22 621 KN en los sentidos X-X y Y-Y respectivamente. Al emplear DFV estas fuerzas fueron reducidas a un 39% aproximadamente de su fuerza total elástica, dando como valores de cortante de 14 337 y 13 819 KN para los sentidos X-X y Y-Y respectivamente, representando de esta manera una demanda de ductilidad del 50% aproximadamente. Esto se puede obtener mediante la diferencia entre los porcentajes de fuerzas tomadas por la estructura sin protección junto a la estructura con DFV.

$$\mu_{d(x-x)} = 90,00\% - 39,94\% = 50,06\%$$

$$\mu_{d(y-y)} = 90,04\% - 38,90\% = 51,14\%$$

Visto de manera gráfica y si consideramos un modelo de comportamiento elasto-plástico perfecto se tendría la Figura 4.49.

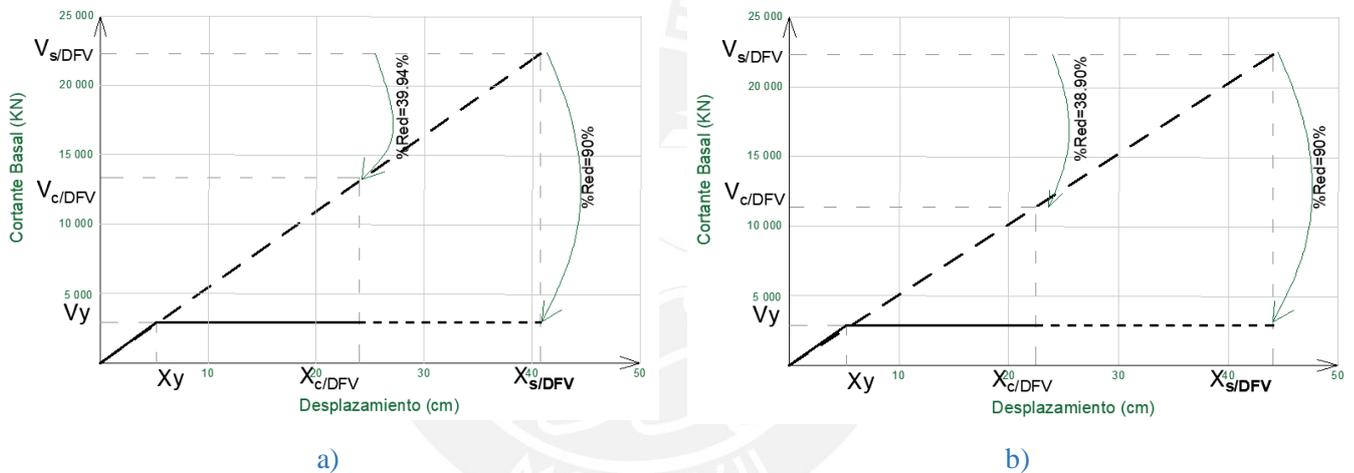


Figura 4. 49 Comparación de comportamiento elastoplástico perfecto de la estructura sin protección y con DFV en el sentido a) X-X y b) Y-Y

Como se observa en la Figura 4.49, la fuerza cortante estática para una estructura de comportamiento lineal “ $V_{s/DFV}$ ” ha sido reducida a una fuerza elástica con disipadores de fluido viscoso “ $V_{c/DFV}$ ”, este a su vez, es reducido a una fuerza de fluencia “ V_y ” dado por la norma E.030. Para mantener el equilibrio energético, la fuerza que no ya no puede ingresar a la estructura, se transforma en la Ductilidad Demandada, demostrando daños importantes en los elementos estructurales. Gracias a la implementación de los disipadores de fluido viscoso, la demanda exigida en la estructura del 90% inicialmente, se redujo a valores de 50,06% y 51,24% para los sentidos horizontales y transversales, valores que fueron calculados anteriormente. Dicho de otra manera, la demanda de ductilidad es mucho menor que la que presenta la estructura originalmente (casi el 50% de ductilidad), por ende, la estructura presentará menor daño en sus componentes estructurales.

4.5.2. Disipadores Histeréticos ADAS

A continuación, se presentan los balances energéticos de los disipadores ADAS y el porcentaje de disipación durante la señal sísmica.

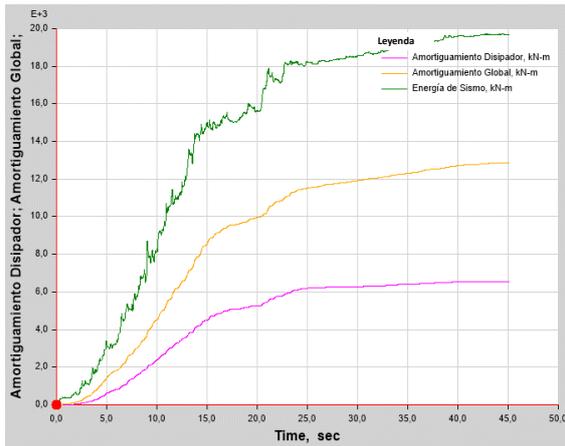


Figura 4. 50 Balance energético ADAS de 1970

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{6189}{18202} = 34,00\%$$

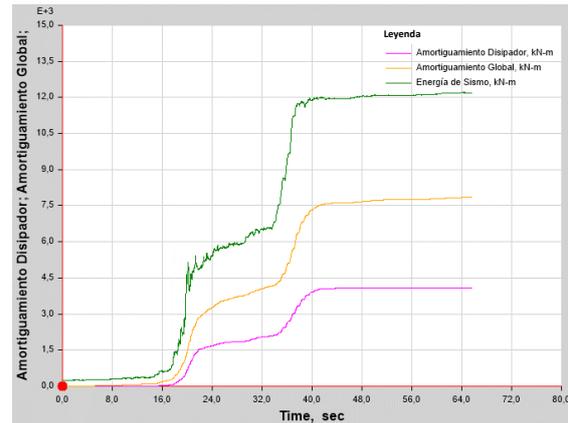


Figura 4. 51 Balance energético ADAS de 1966

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{3908,29}{11884} = 32,89\%$$

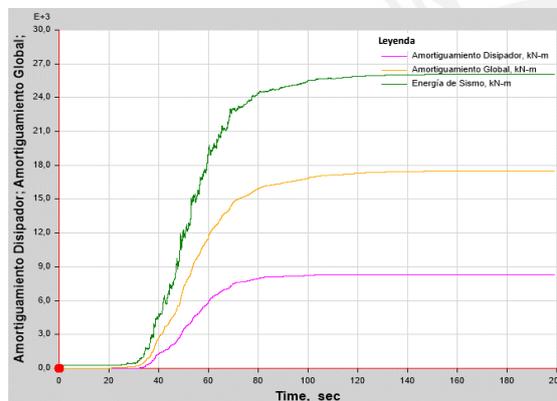


Figura 4. 52 Balance energético ADAS de 2001

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{2281}{7017} = 32,51\%$$

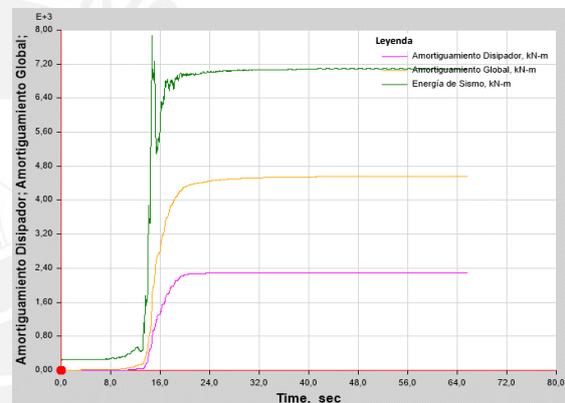


Figura 4. 53 Balance energético ADAS de 1991

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{8258}{25502} = 32,38\%$$

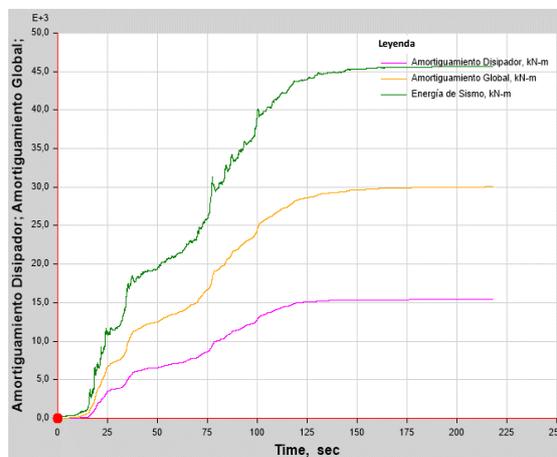


Figura 4. 54 Balance energético ADAS de 2007

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{15060}{43992} = 34,23\%$$

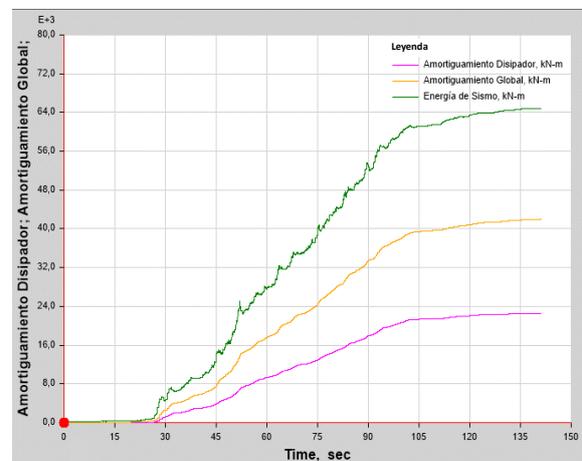


Figura 4. 55 Balance energético ADAS de 2014

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{17983}{52060} = 34,54\%$$

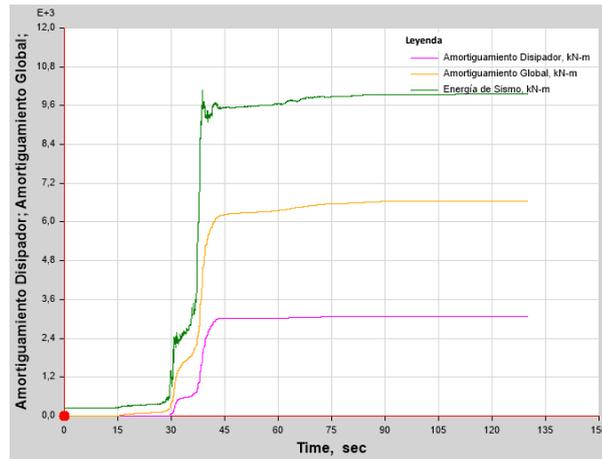


Figura 4. 56 Balance energético ADAS de 2015

$$\text{Porcentaje de disipación} = \frac{1919}{6228} = 30,81\%$$

Las Figuras 4.50 hasta la 4.56 muestran el porcentaje de disipación que toman los disipadores de histeréticos ADAS durante las señales sísmicas propuestas.

Tabla 4. 29 Porcentajes de disipación de energía tomada por los disipadores ADAS

Señal Sísmica	% de Disipación
1970	34,00
1966	32,89
1991	32,51
2001	32,38
2007	34,23
2014	34,54
2014	30,81
PROMEDIO	33,05

La tabla 4.29 muestra el promedio de la energía tomada por los disipadores, tomando un valor del 33,05 %. Es decir, durante un evento sísmico los disipadores histeréticos ADAS captarán la 1/3 parte aproximadamente de la cantidad de energía liberada por un terremoto dentro de la estructura.

Así mismo se muestra a continuación la curva histerética del link K38 que toma el disipador durante los eventos sísmicos, otorgando así la máxima fuerza cortante y su máximo desplazamiento que resulta en uno de ellos.

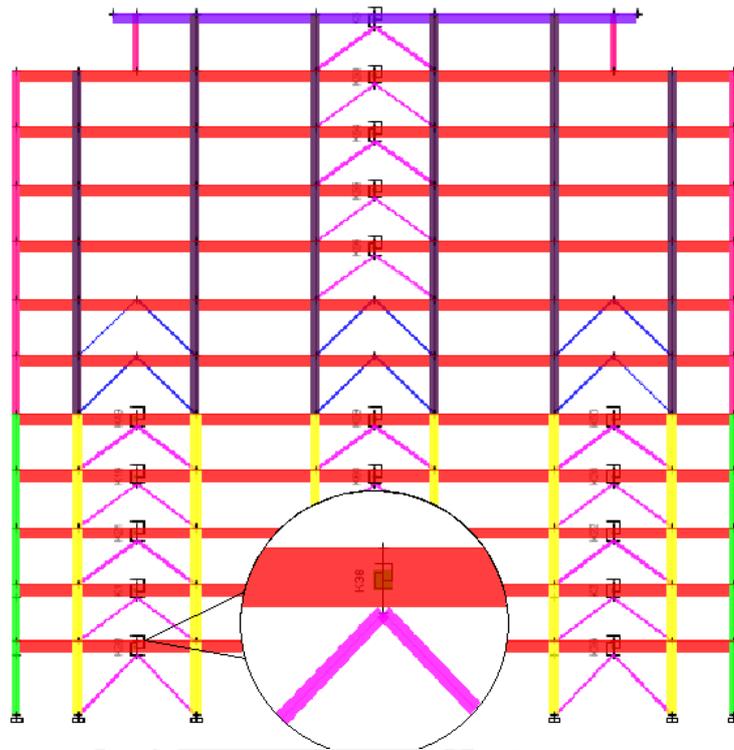


Figura 4. 57 Selección del Link K38

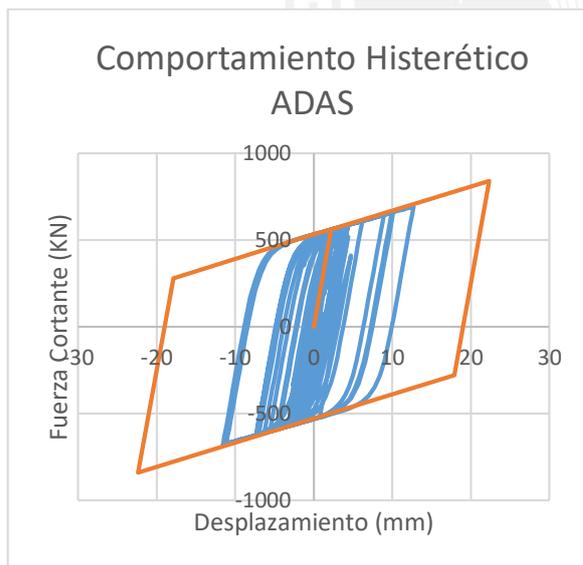


Figura 4. 58 Curva Histeréticos ADAS K38 de 1966

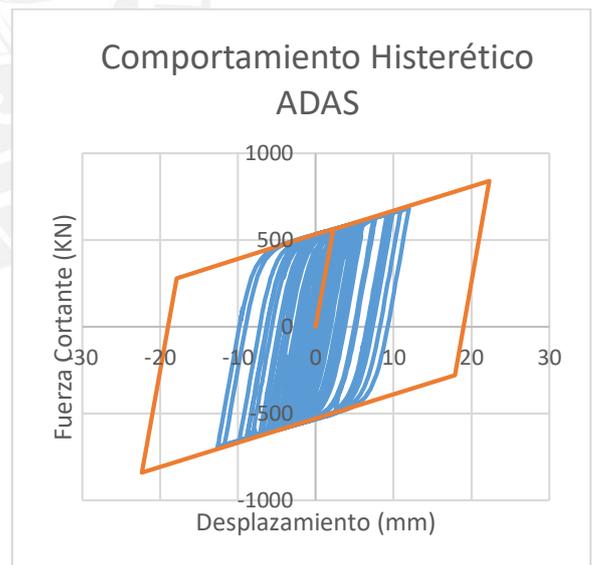


Figura 4. 59 Curva Histeréticos ADAS K38 de 1970

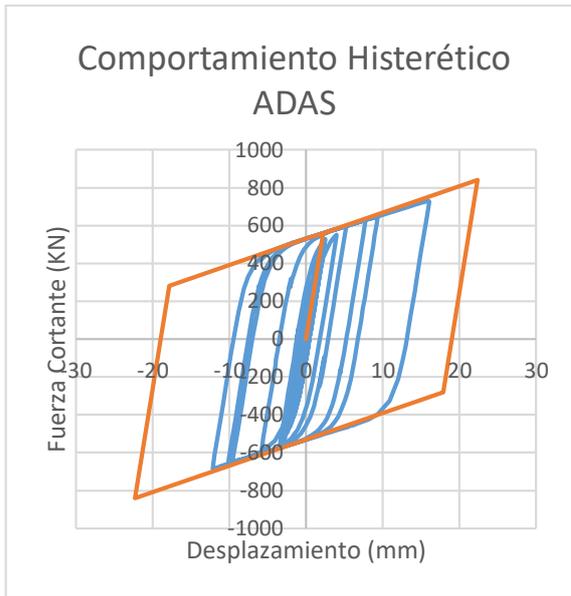


Figura 4. 60 Curva Histeréticos ADAS K38 de 1991

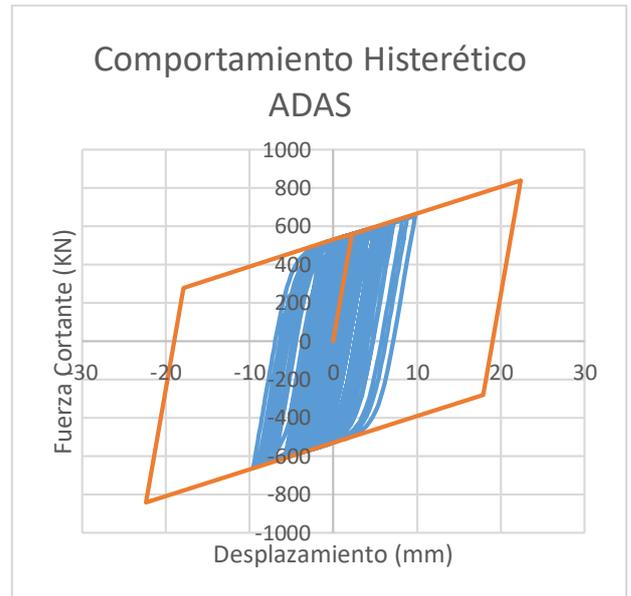


Figura 4. 61 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2001

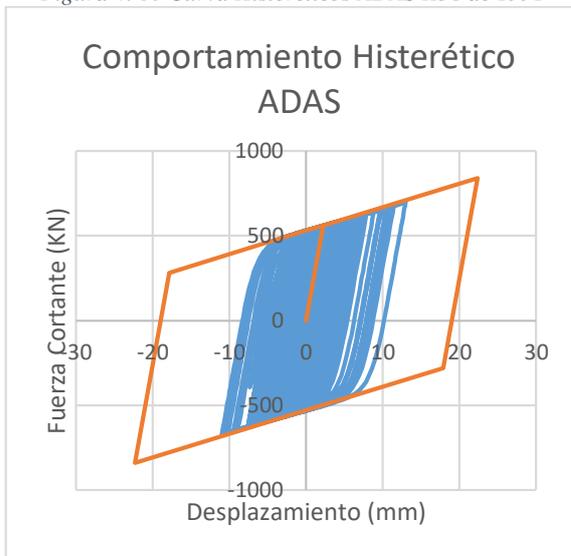


Figura 4. 62 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2007

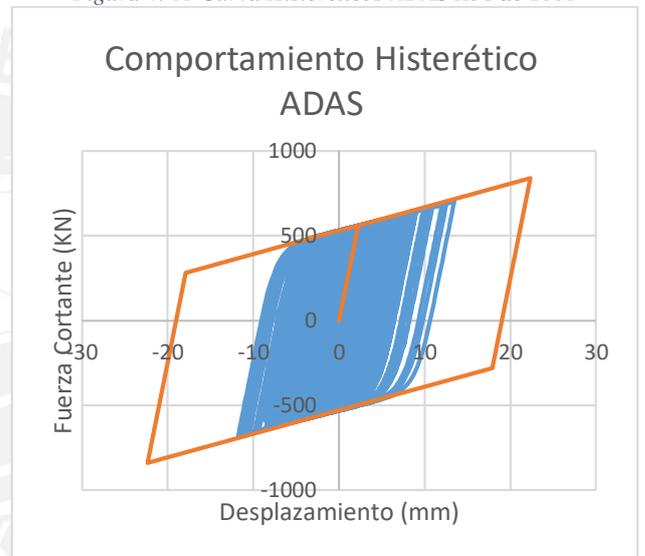


Figura 4. 63 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2014

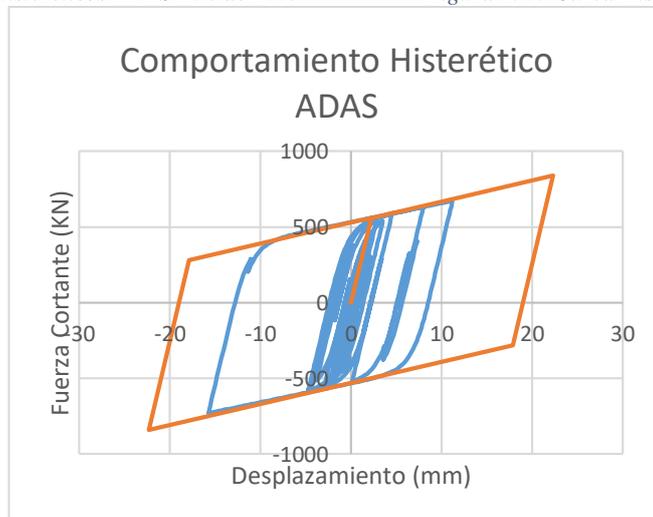


Figura 4. 64 Curva Histeréticos ADAS K38 de 2015

Como es de observarse en la Figura 4.58 hasta la Figura 4.64, el comportamiento de las curvas histeréticas del disipador frente a cada sismo es el esperado, es decir, que se logra la forma trapezoidal, curva característica que presentan los disipadores de histeréticos ADAS. Por otro lado, las curvas se mantienen dentro de lo establecido en el diseño (línea de color naranja) dando así un comportamiento estable e ideal dentro de la señal sísmica. Las fuerzas máximas y desplazamientos máximos presentados en el disipador tomado de ejemplo se muestran a continuación en la tabla 4.30.

Tabla 4. 30 Fuerzas Cortantes máximas y desplazamientos máximos

Señal Sísmica	Fuerza Cortante (KN)	Desplazamiento (mm)
1966	679,82	11,78
1970	691,17	12,69
1991	723,79	15,28
2001	654,37	9,75
2007	692,01	12,75
2014	712,71	14,40
2015	722,45	15,18

Como es de apreciarse en la tabla 4.30 los máximos desplazamientos no superan los 20mm, concluyendo así que el disipador se comporta según lo diseñado, ya que los disipadores empleados tienen un desplazamiento ultimo de 22mm.

DUCTILIDAD DEMANDADA

La estructura modificada sin protección presenta un cortante basal 3 481 y 3 272 KN para los sentidos X-X y Y-Y respectivamente reducido por un factor R=8 según la normativa E.030, es decir, donde se espera que la estructura presente daños importantes en sus componentes estructurales debido a la ductilidad demandada. Estudiando la estructura para un sismo de 2475 años, estas fuerzas alcanzan valores 31 704 y 30 506 KN en los sentidos horizontales y transversales. Al emplear disipadores ADAS, estas fuerzas fueron reducidas a un 8% y 15% aproximadamente de su fuerza total elástica, tomando valores de cortante de 29 756 y 25 999 KN para los sentidos X-X y Y-Y respectivamente, representando de esta manera una demanda de ductilidad del 80 y 74% aproximadamente. Esto se puede obtener mediante la diferencia entre los porcentajes de fuerzas tomadas por la estructura sin protección junto a la estructura con ADAS.

$$\mu_{d(x-x)} = 89,02\% - 6,14\% = 82,88\%$$

$$\mu_{d(y-y)} = 89,27\% - 14,77\% = 74,50\%$$

Visto de manera gráfica y si consideramos un modelo de comportamiento elasto-plástico perfecto se tendría la Figura 4.65.

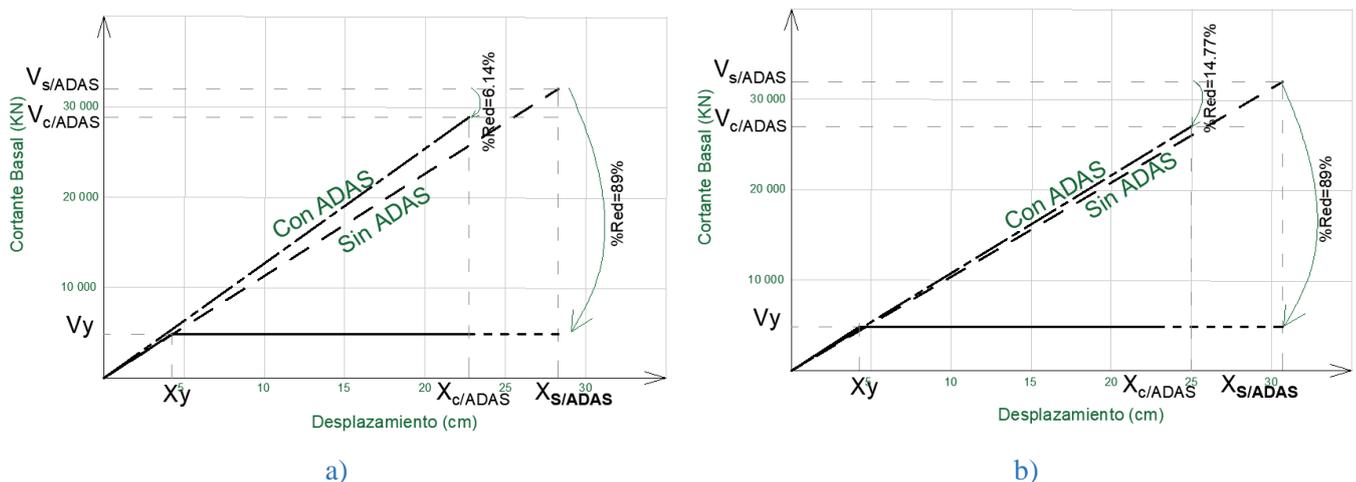


Figura 4. 65 Comparación de comportamiento elastoplástico perfecto de la estructura sin protección y con disipadores ADAS en los sentidos a) X-X y b) Y-Y

Como se observa en la Figura 4.65, la fuerza cortante estática para una estructura de comportamiento lineal sin ADAS “ $V_{s/ADAS}$ ” ha sido reducida a una fuerza elástica con disipadores de metálicos ADAS “ $V_{c/ADAS}$ ”. Esta a su vez es reducida a una fuerza de fluencia “ V_y ” de la estructura dada por la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente. Gracias a la implementación de los disipadores metálicos ADAS, la demanda exigida en la estructura que inicialmente era de 90%, se redujo a valores de 82,88% y 74,50% para las direcciones X-X y Y-Y respectivamente. Dicho de otra manera, la demanda de ductilidad es menor que la que presenta la estructura originalmente, reduciendo daños en los componentes estructurales de nuestra edificación.

4.6.EVALUACIÓN DE COSTOS.

La evaluación sobre la incidencia de los disipadores de fluido viscoso y los disipadores histeréticos metálicos ADAS se lleva a cabo considerando el costo total del proyecto, empleando el área total de la edificación (8280 m²) junto a las ratios manejados de obra utilizados en el sector inmobiliario (Costos Perú, 2019)

- Disipadores de Fluido Viscoso

Tabla 4. 31 Costo en obra para DFV en un sismo máximo considerado

TIPO	Cant.	Prec. Unitario (\$)	Parcial (\$)
DFV 500 (KN)	180	\$ 5 000,00	\$ 900 000,00
Conexiones	90	\$ 1 500,00	\$ 135 000,00
TOTAL			\$ 1 035 000,00
Costo / m ²			\$ 125,00

La incidencia sobre el costo del proyecto estará dada por:

Tabla 4. 32 Porcentaje de incidencia en obra para DFV en un sismo máximo considerado

Especialidad	Razón (\$/m ²)	Área (m ²)	Parcial (\$)
Estructuras	\$ 300,00	8280	\$ 2 484 000,00
Acabados	\$ 170,00	8280	\$ 1 407 600,00
IIS	\$ 25,00	8280	\$ 207 000,00
IIIE	\$ 30,00	8280	\$ 248 400,00
Amortiguamiento	\$ 125,00	8280	\$ 1 035 000,00
		P. P	\$ 5 382 000,00
		G.G (2%)	\$ 107 640,00
		TOTAL	\$ 5 489 640,00
		INCIDENCIA	19%

Como es de observarse en la tabla 3.32, se obtuvo un porcentaje de incidencia en obra del 19%, valor cercano a los porcentajes de costos de reparación (15 – 20 % (Liang et al., 2012)), mientras que el precio por metro cuadrado es de 125,00 \$/m². Hay que tomar en cuenta que estos valores son obtenidos en el control de la estructura para un sismo máximo considerado (periodo de retorno de 2500 años). Por otro lado, si se llegase a emplear el cálculo para un sismo raro (periodo de retorno de 500 años) y por la experiencia previa en el pre-diseño de este proyecto, estos valores se reducen casi a la mitad, es decir, se tendría un valor de incidencia del 9% y un costo de 60\$/m² aproximadamente, que son valores habituales obtenidos para sismos raros (Guevara & Torres, 2012).

Hay que considerar que la incidencia real de los amortiguadores de fluido viscoso corresponde a una estructura idealizada y tomando una deriva objetiva bastante ambiciosa, para un nivel de daño moderado ante un sismo con periodo de retorno de 2475 años.

- Disipadores de Histeréticos tipos ADAS

Tabla 4. 33 Costo en obra para ADAS en un sismo máximo considerado

TIPO	Cant.	Prec. Unitario (\$)	Parcial (\$)
ADAS - 1	26	\$ 6 731,00	\$ 175 006,00
ADAS - 2	74	\$ 4 726,00	\$ 349 724,00
ADAS - 3	10	\$ 920,00	\$ 9 200,00
Conexiones	110	\$ 1 500,00	\$ 165 000,00
		TOTAL	\$ 698 930,00
		Costo / m²	\$ 84,41

La tabla 4.33 muestra el costo de la aplicación de los disipadores metálicos para la estructura base, es decir, sin tomar en cuenta el aumento de las secciones de los elementos estructurales. Para ello se procede a cuantificar la cantidad de m³ adicionados para la nueva estructura, y así concluir con el valor por metro cuadrado del producto final de la aplicación de los disipadores histeréticos. Por lo tanto, se obtiene lo siguiente:

Tabla 4. 34 Costo total de adición de secciones estructurales

Elemento	m ³	Costo / m ³	Parcial (\$)
Columnas	709,516	150	\$ 106 427,40
Vigas	148,743	90	\$ 13 386,87
		TOTAL	\$ 119 814,27

Por consiguiente, para este caso de estudio, el costo total de la aplicación de los ADAS comprendería la utilización de ellos en los arriostres sumado a la adición de las secciones estructurales, lo que daría un total de:

$$ADAS + Estr = \$818 744,27$$

Y un costo total por m² de: **98,88 \$/m²**

Tabla 4. 35 Costo total de incidencia de los ADAS + Estructura

Especialidad	Razón (\$/m ²)	Área (m ²)	Parcial (\$)
Estructuras	\$ 300,00	8280	\$ 2 484 000,00
Acabados	\$ 170,00	8280	\$ 1 407 600,00
IISS	\$ 25,00	8280	\$ 207 000,00
IIEE	\$ 30,00	8280	\$ 248 400,00
Amortiguamiento	\$ 98,88	8280	\$ 818 744,27
		P. P	\$ 5 165 744,27
		G.G (2%)	\$ 103 314,89
		TOTAL	\$ 5 269 059,16
		INCIDENCIA	16%

Como se observa en la tabla 4.35, el costo total de incidencia de los disipadores metálicos tipo ADAS es del orden del 16%, valor límite inferior a la reparación de estructuras luego de un evento sísmico (15 – 20 %), considerando un valor de 98,88 \$/m². Al igual que los disipadores de Fluido Viscoso, los disipadores Histeréticos tipo ADAS cumplen con la deriva permitida de la norma E.030 de un escenario de sismo máximo considerado (MCE_R), pero a diferencia de los primeros, los disipadores metálicos sobrepasan la deriva máxima impuesta dentro de este proyecto.

Por otro lado, al evaluarse la demanda sísmica entre los cambios de rigidez que sufrió la estructura, se determinó que para todos los casos la cortante de diseño es la misma. Este efecto se debe a la flexibilidad de la estructura y al factor de reducción sísmica elegido. Durante un diseño tentativo en la estructura original se determinó 21,4 kg de acero/m², mientras que en la estructura final se tiene 17,82 kg de acero/m²; es decir, pese a que la última estructura es más rígida, la demanda de cortante es la misma, por lo tanto, la sollicitación de acero será menor en esta última debido al aumento de capacidad por volumen del concreto.

Así mismo, si se desea obtener una estructura de comportamiento similar se tendría que aumentar las secciones de los elementos estructurales considerablemente de la siguiente manera:

$$C50x70 \rightarrow C75x100$$

$$C40x65 \rightarrow C70x95$$

$$V30x50 \rightarrow V40x70$$

$$V30x60 \rightarrow V40x80$$

El cual representa un costo adicional como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. 36 Costo de estructura sumamente rígida

Elemento	m ³	Costo / m ³	Parcial (\$)
Columnas	1999,272	150	\$ 299 890,80
Vigas	448,668	90	\$ 40 380,12
TOTAL			\$ 340 270,92

El aumento de las secciones estructurales tiene un costo adicional como se observa en la tabla 4.36, evidenciándose un 50% aproximadamente menor al precio de aplicación de los disipadores metálicos tipo ADAS.

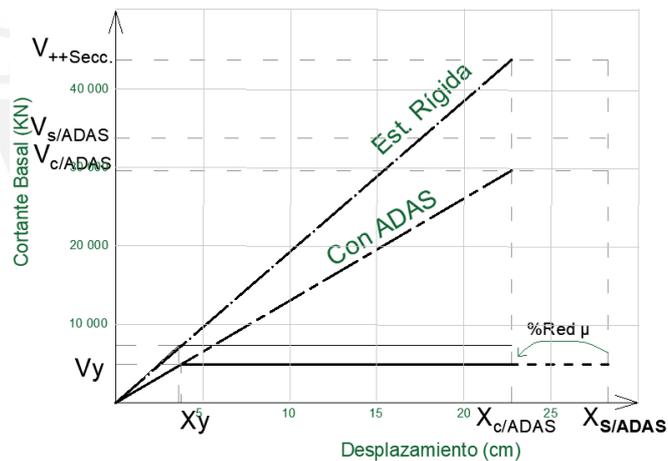


Figura 4. 66 Comportamiento Estructura Rígida y Estructura con ADAS

La diferencia entre la aplicación de los disipadores metálicos y el aumento de secciones de los elementos estructurales, radica en la interrupción de los negocios o la reparación de sus componentes estructurales. La figura 4.66 muestra que para ambos sistemas la demanda de ductilidad es similar, sin embargo, la diferencia radica en la cantidad de energía ingresante a la estructura y el esfuerzo que presentaran sus componentes estructurales. Los esfuerzos en la estructura rígida se concentrarán únicamente en los elementos de vigas y columnas, mientras que la estructura con disipadores ADAS, esa energía ha sido compartida entre los elementos vigas, columnas y disipadores.

5 DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

La utilización de disipadores de fluido viscoso frente a disipadores metálicos ADAS en configuración chevron, demuestra un mejor control de deriva en la estructura objeto de estudio. Si se observa esto de manera gráfica se tendría lo siguiente:

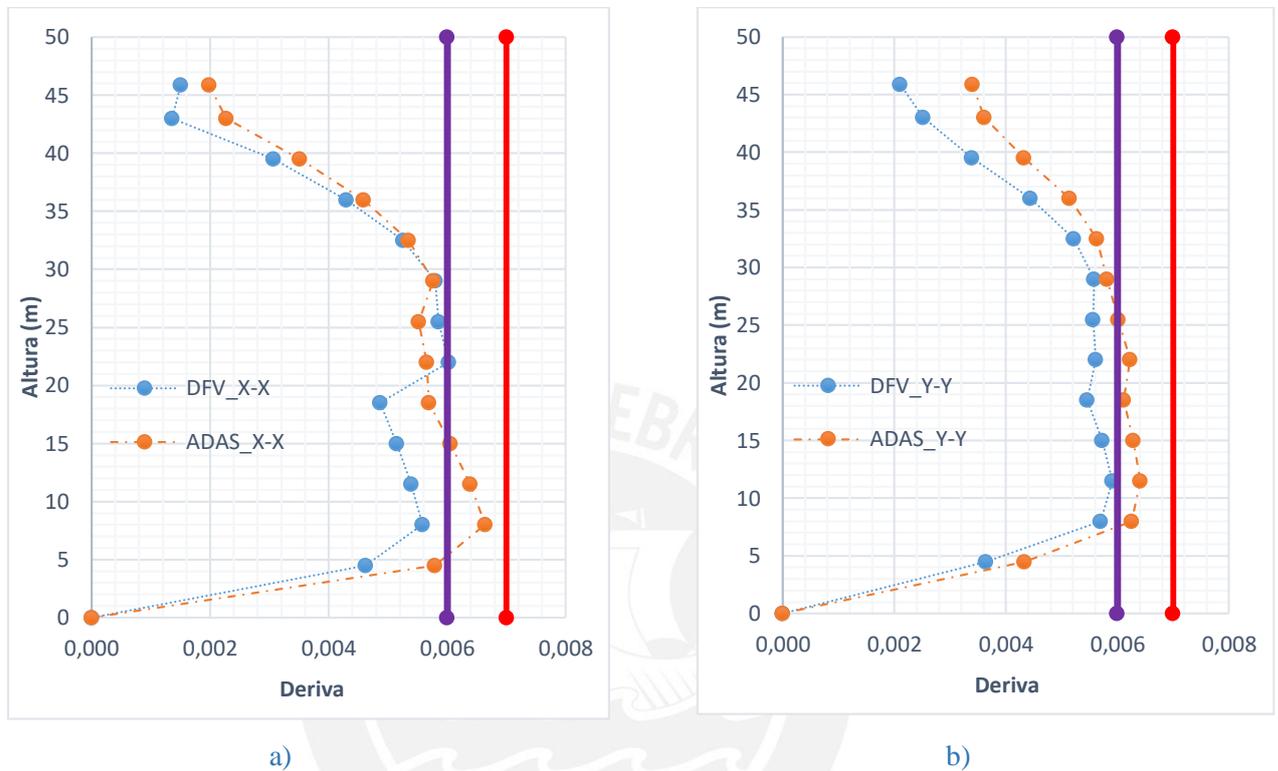


Figura 5.1 Comparación de Derivas entre DFV Vs ADAS en el a) sentido X-X y b) sentido Y-Y

La Figura 5.1 muestra la eficiencia de la aplicación de los disipadores de fluido viscoso en la estructura original, manteniendo su deriva en el límite propuesto de este proyecto (6%, línea de color morado). Por otro lado, en la estructura con disipadores metálicos tipo ADAS, se tuvo que aumentar las secciones estructurales y el número de arriostres. Permitiendo que esta se encuentre por encima de la deriva objetivo (línea de color morado), pero a su vez cumpla con las especificaciones de la Noma Técnica E.030 (deriva el 7%, línea de color rojo), en un escenario de sismo con periodo de retorno con 2475 años. Si bien es cierto, la exigencia normativa E.030 corresponde a análisis de sismos con periodos de retorno 475 años; esta norma no establece exigencias para estructuras con sistemas de protección sísmica, dejando abierta la posibilidad de aplicar estos criterios a sismos con periodos de retorno más largos basándose en criterios de distorsiones máximas permisibles según HAZUS.

Aplicando la misma analogía de las derivas mostrada en la Figura 5.1, a continuación, se muestra la Figura 5.2 donde se observan las cortantes por piso del sistema estructural.

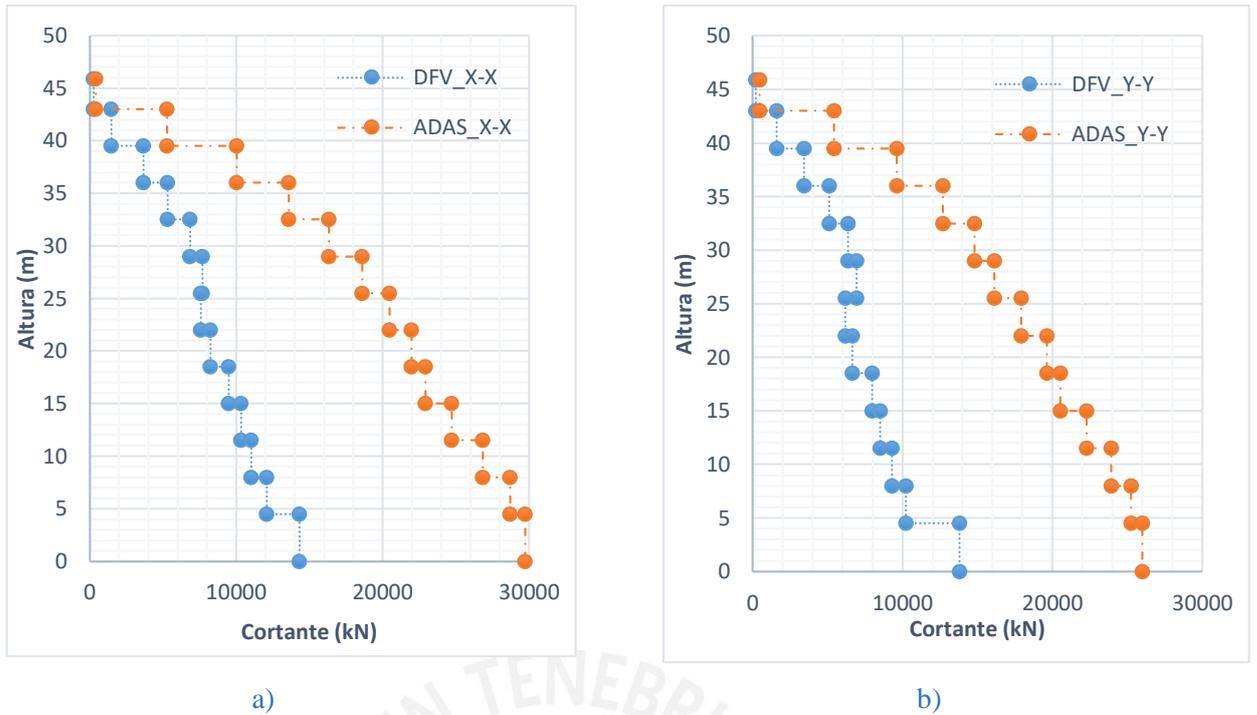


Figura 5. 2 Cortante por piso de DFV en estructura base frente a ADAS en estructura modificada en el sentido a) X-X y b) sentido Y-Y

Como se observa en la figura anterior, las fuerzas cortantes de la estructura modificada junto con ADAS son aproximadamente el doble de fuerza de la estructura original con DFV. Esto ocurre debido a la modificación de la rigidez, que se ha hecho a la estructura al aumentar sus secciones estructurales y al emplear los disipadores metálicos ADAS, mismos que contribuyen a un pequeño aumento de rigidez a la estructura y al amortiguamiento que otorga cada tipo de disipador.

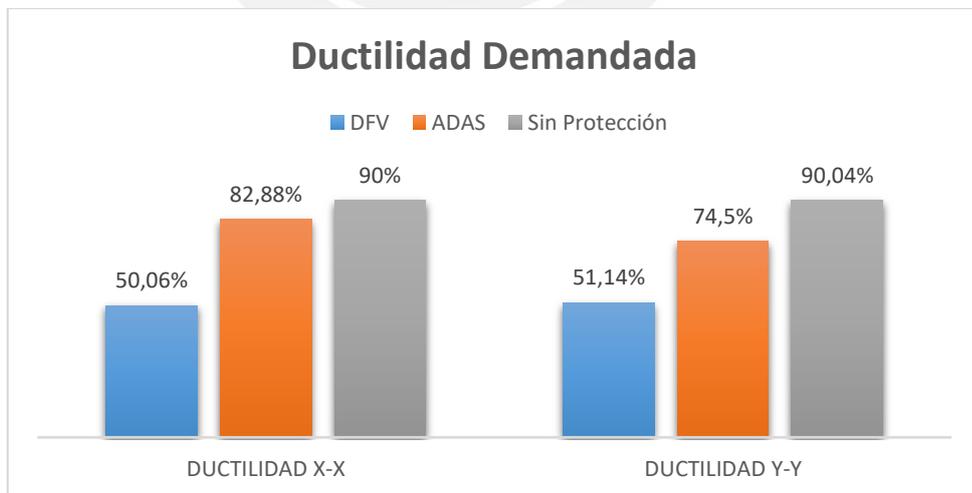


Figura 5. 3 Demanda de ductilidad en para DFV, ADAS y estructura sin Protección

Por lo descrito anteriormente, y por los criterios implicados en el diseño de estructuras, una gran demanda de fuerza elástica se convertirá en una gran ductilidad demandada para edificaciones de un diseño convencional. Como se muestra en la figura 5.3, al emplearse los disipadores de fluido viscoso, se obtuvo una ductilidad demandada del 50% aproximadamente para sentidos

X-X y Y-Y. Por otro lado, la estructura modificada con disipadores metálicos ADAS, se obtuvo una ductilidad demandada del 80-70 % en las direcciones X-X y Y-Y. Si inicialmente se diseña a la estructura para un $R=8$, donde esta presentará grandes deformaciones, la ductilidad demanda pasará a ser el 50% de la inicial, es decir para un $R=4$. Así mismo, en la protección con disipadores metálicos tipo ADAS, la ductilidad demandada será reducida del 80-70% apropiadamente de la inicial, es decir un $R=6$. Esto se produce debido al amortiguamiento adicional que se coloca a la estructura reduciendo así los esfuerzos cortantes en la base de la edificación.

La implicancia de la ductilidad demandada figura en el daño estructural que tendrá la edificación. Por lo tanto, una ductilidad demandada del 50% de la ductilidad inicial recibirá menor daño estructural que aquel que solicita el 80%, valores obtenidos a través de la aplicación de DFV y ADAS respectivamente. Bajo esta situación, el costo de interrupción de negocios o de reparación tanto de elementos estructurales o no estructurales podrían tener diferencias o ser similares (Liang et al., 2012). Por lo tanto, la toma de decisión en la utilización de cada tipo de disipador dependerá del proyectista en el nivel de daño que desease obtener.

Por otro lado, es importante mencionar la respuesta de la estructura frente a los cambios que se dieron durante el diseño de los disipadores metálico tipo ADAS, y poder determinar así sus limitaciones. Como se observó en el apartado 4.4, el aumento de espesor, número de placas o aumento de arriostres no es un cambio relevante en el comportamiento estructural empleando este tipo de disipadores.

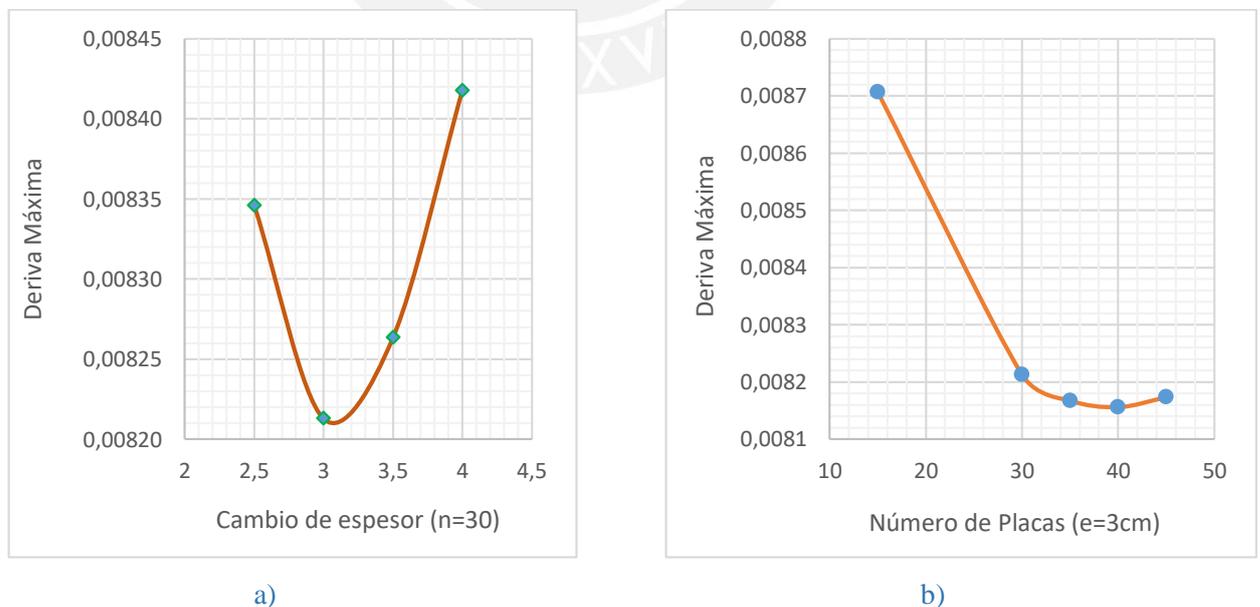


Figura 5. 4 Control de Deriva: a) Diferente espesor de Placas y $n=30$ b) Diferente número de Placas y $e=3cm$

A diferencia de los disipadores de fluido viscoso que al aumentar el coeficiente de amortiguamiento “C” o al disminuir el coeficiente de velocidad “ α ”, donde se mejora el

comportamiento estructural tanto en cortante como en derivas, los disipadores metálicos tipo ADAS debe determinarse un punto de equilibrio donde la estructura encuentre una respuesta dinámica óptima frente a los registros sísmicos. La Figura 5.4 a y b muestran el promedio de derivas máximas obtenidas a través de la variación del cambio de espesor y el aumento progresivo del número de placas, determinándose un espesor óptimo de 3cm y la aplicación de 30 placas en el disipador. En este punto es importante mencionar que para el caso de estudio se determinó un espesor de 2.5cm debido a que un $h/e < 11$ podría otorgar problemas de deformaciones y tensiones de Von-Misses que aumentan de carácter importante en la sección de la garganta (Esguerra, 2003).

- Disipadores metálicos ADAS durante el sismo de Diseño

Una estimación sobre la activación de los disipadores metálicos ADAS para un sismo de diseño, es realizando un análisis de Pushover, conservando un comportamiento elástico de los elementos estructurales y la no linealidad de los elementos Link que conforman el mecanismo de amortiguamiento adicional.

Durante este proceso se observan todos los elementos Link, y se verifica cuál de ellos ingresa a un comportamiento inelástico al momento de ser aplicado el Pushover. Comparándose así con la cortante de fluencia y determinar si la estructura presentaría un comportamiento no lineal. A continuación, se presenta a manera de ejemplo la ubicación del elemento y la curva de deformación respectiva al ser aplicado el Pushover dentro del disipador que ha entrado en fluencia en el sentido X-X.

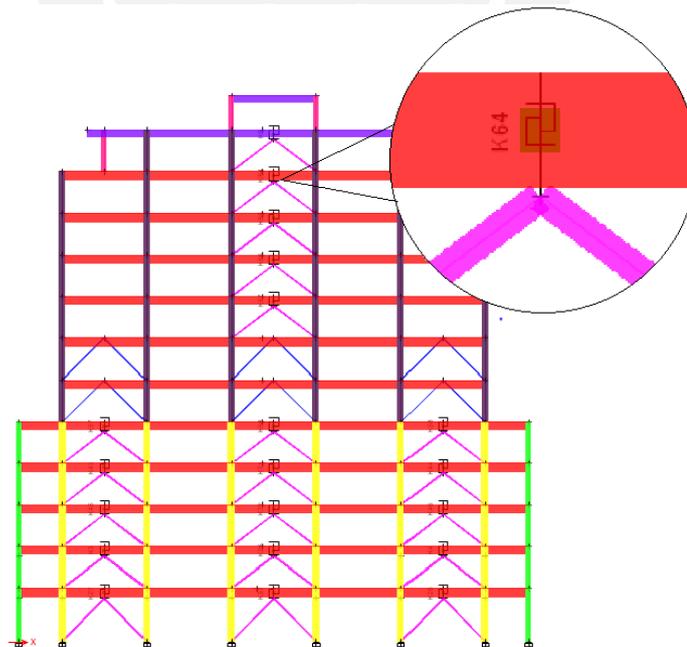


Figura 5. 5 Ubicación del 1er ADAS que entra en fluencia en la parte posterior de la Edificación



Figura 5. 6 Curva de deformación disipador K64 en el Pushover

Bajo las condiciones anteriores, la figura 5.6 indica que durante el paso 8, el disipador metálico ha llegado al límite de deformación elástica. Por lo tanto, en este punto se observa la cortante de diseño de la estructura y la cortante actuante en la estructura dentro del Pushover. Teniendo lo siguiente:

$$V_{diseño} = 3487 \text{ KN}$$

Considerando una sobre-resistencia de $\Omega = 2$ se tiene una cortante de fluencia de:

$$V_{y\Omega} = 6974 \text{ KN}$$

Mientras que la cortante del Pushover para ese punto estará dado según la figura 5.7:

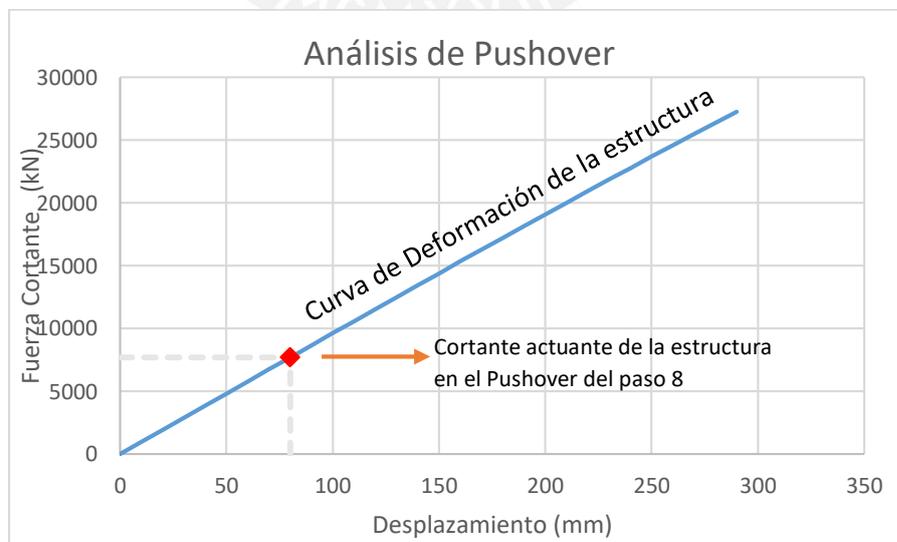


Figura 5. 7 Curva de Pushover para el sentido horizontal

Según la figura anterior se obtiene una cortante de:

$$V_{push} = 7685 \text{ KN}$$

Por lo tanto:

$$V_{push} > V_{y\Omega}$$

Bajo las condiciones anteriores, se puede concluir que la estructura empieza a incurrir en el rango plástico (presentándose pequeños daños en los elementos estructurales) ya que la cortante en el Pushover supera a la cortante de fluencia en la estructura, empezando así la activación de los disipadores metálicos tipo ADAS.

De manera similar para el caso Y-Y se tendría la siguiente información:

$$V_{diseño} = 3487 \text{ KN}$$

Considerando una sobre-resistencia de $\Omega = 2$ se tiene una cortante de fluencia de:

$$V_{y\Omega} = 6974 \text{ KN}$$

La cortante del Pushover en la estructura está dada por el comportamiento del disipador K8 ubicado en la azotea durante el paso 8. Lo que presenta una cortante actuante en la base de la estructura de:

$$V_{push} = 6744 \text{ KN}$$

Por lo tanto:

$$V_{push} < V_{y\Omega}$$

Como se muestra anteriormente, el disipador entra en fluencia antes que la estructura; es decir, que el disipador comenzará a disipar energía previa a los posibles daños que se presenten en la edificación.

A continuación, se muestra la variación de periodos de la estructura base sin protección, junto a la aplicación de los disipadores de fluido viscoso (DFV) vs metálicos tipo ADAS.

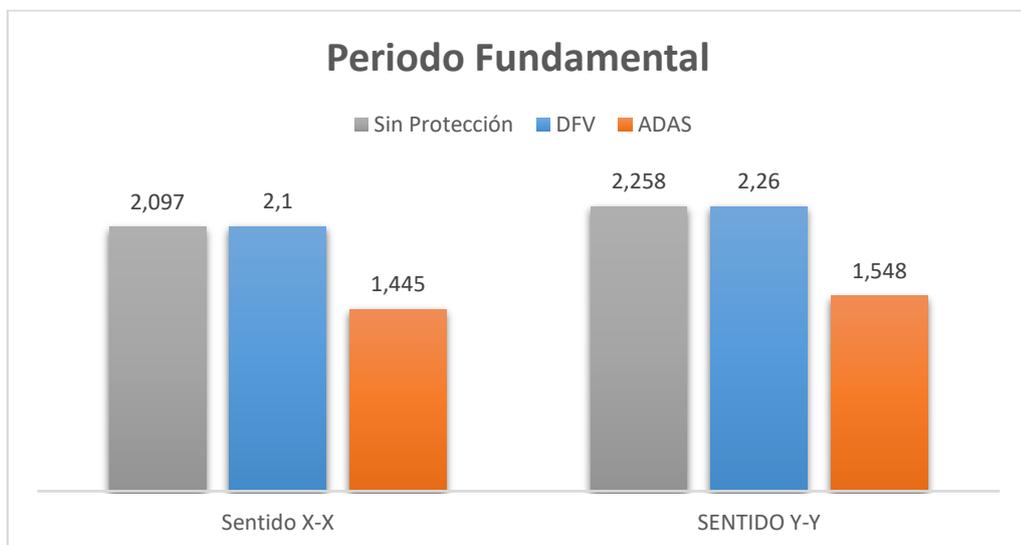


Figura 5. 8 Comparación de periodos de vibración

La figura 5.8 muestra la variación de periodos que ocurren dentro de la estructura al emplearse los disipadores de Fluido Viscoso y ADAS, verificándose que los primeros mantienen los periodos de vibración de la estructura original, mientras que los disipadores metálicos han modificado su rigidez; lo cual indica un cambio en las propiedades dinámicas de la edificación para cumplir con la deriva impuesta por la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente.

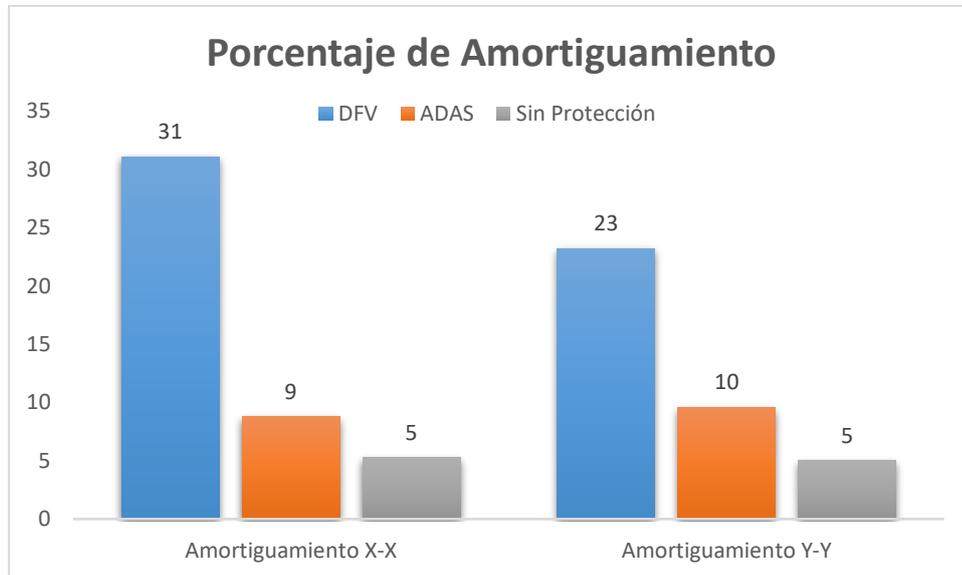


Figura 5. 9 Comparación entre porcentaje de Amortiguamiento

Una diferencia importante entre la aplicación de DFV y ADAS radica en la cantidad de amortiguamiento que otorga cada sistema, tomando valores de 31 y 23 % para las direcciones X-X y Y-Y del primero y 9 y 10% respectivamente para el segundo, como se observó en la figura 5.9. Una de las diferencias entre la cantidad de amortiguamiento que otorga cada sistema podría ser debido a la cantidad de dispositivos que se emplean en cada arriostre. Se sabe que en la configuración chevron de los DFV se emplean dos dispositivos por arriostre a diferencia de los ADAS que se emplea solamente uno. Además de esto, los DFV actúan de acuerdo a la velocidad de excitación que se presenta en la estructura, mientras que los ADAS se activan de acuerdo al desplazamiento relativo de entrepiso. Este efecto que podría resultar contraproducente para mantener una estructura sin daño en los elementos estructurales, ya que, a más desplazamiento de entrepiso, mayor es el daño estructural. Por otro lado, esta cantidad de amortiguamiento se evidencia en el porcentaje de reducción de deriva y cortante que sufre la estructura, así como también del factor β que se reflejará en la modificación del espectro de diseño que se utilizará para el diseño de la edificación.

Del total de energía que ingresa a la estructura, los amortiguadores de fluido viscoso disipan alrededor de las $\frac{3}{4}$ de energía, en comparación a los metálicos que disipan solamente la $\frac{1}{3}$ parte aproximadamente. Visto desde el punto de balance energético, la estructura con un menor

porcentaje de disipación de energía gracias a la implementación del sistema de amortiguamiento, será aquella que reciba menor daño estructural. Por lo tanto, los disipadores de fluido viscoso serían los dispositivos óptimos en cuestión de reducción de daño. Otra manera de llegar a la misma conclusión, es a través del porcentaje de sollicitación de demanda exigida en la estructura como ya se observó en la figura 4.62. donde se evidenció la eficacia de la implementación de los DFV.

Tabla 5. 1 Diferencia de Aplicación entre DFV y ADAS

	DFV	ADAS
Costo/m ²	\$ 125,00	\$ 98,88
Total (8280 m ²)	\$ 1 035 000,00	\$ 818 744,27
Diferencia	\$ 216 273,6	

Por otro lado, si se cuenta con un presupuesto limitado, la utilización de los disipadores metálicos podría resultar una forma atractiva de protección a la edificación, donde se tiene un valor de 98,88\$/m² a diferencia de los disipadores de fluido viscoso que presentan un costo de 125\$/m² como se observa en la tabla 5.1. Si consideramos el área de nuestra estructura, el valor de diferencia entre ambos sistemas es de \$ **216 273,6**. A pesar de que se usaron un número mayor de arriostres y se tuvo que aumentar secciones estructurales, la utilización de protección sísmica favorece a los disipadores metálicos tipo ADAS.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones:

- Se verificó el cumplimiento de derivas impuesto por la Norma Técnica E.030 durante la aplicación de disipadores de fluido viscoso y disipadores metálicos ADAS, en una estructura flexible dentro de un escenario de sismo con periodo de retorno de 2500 años.
- La estructura objeto de estudio pudo alcanzar la deriva objetivo que se planteó inicialmente (6 ‰) al emplearse disipadores de fluido viscoso. Efecto no ocurrido en la aplicación de disipadores metálicos, donde se tuvo que aumentar las secciones de los elementos estructurales y el número de arriostres, llegando a una deriva de 6.6 ‰, demostrando la eficacia de los DFV para un control estructural en edificaciones flexibles.
- El amortiguamiento y porcentaje de disipación de energía de los disipadores de fluido viscoso es mayor al que pueden otorgar los disipadores metálicos tipo ADAS. Valores que pueden ser observados en la tabla 5.1 del capítulo anterior.
- Para la estructura objeto de estudio que presenta un periodo largo, se obtuvo una reducción en su fuerza cortante basal del 39% aproximadamente en ambas direcciones con DFV, mientras que para la estructura con secciones aumentadas junto con ADAS, se obtuvieron porcentajes de reducción de fuerza basal en el orden de 6.14% y 14.77% para las direcciones X-X y Y-Y respectivamente.
- La proporción de la reducción de una fuerza elástica debido al amortiguamiento adicionado por dispositivos mecánicos, podría disminuir la ductilidad demandada en su comportamiento estructural. Al emplearse los disipadores de fluido viscoso, la ductilidad demandada que era inicialmente del 90%, se redujo a valores del 50% aproximadamente para ambas direcciones. Mientras que la utilización de disipadores metálicos tipo ADAS obtuvo porcentajes ductilidad demandada de 82,88% y 74,5% para los sentidos X-X y Y-Y respectivamente. La aplicación de ADAS da como resultado un mayor daño en los componentes estructurales y no estructurales a diferencia de los DFV.
- Para el diseño de los disipadores metálicos ADAS se usó la metodología recomendada por el Dr. Aguiar, realizándose un proceso iterativo hasta poder llegar a una respuesta óptima estructural. Bajo estas condiciones se observó que el aumento del número de

placas o el aumento gradual del espesor de las placas no mejora el desempeño estructural, a diferencia de los disipadores de fluido viscoso que al aumentar el coeficiente de amortiguamiento “C” o al disminuir el coeficiente de velocidad “ α ” se podría mejorar la respuesta estructural durante los análisis tiempo historia.

- Evaluando la activación de los ADAS durante un análisis de Pushover, donde se mantuvo las condiciones elásticas de los elementos estructurales, se determinó que la estructura comienza a entrar en fluencia para la activación de los disipadores metálicos en el sentido X-X. Debido a $V_{push} > V_{y\Omega}$ como se mostró en el capítulo anterior. Mientras que en el sentido Y-Y el disipador entra en fluencia antes que la estructura.
- Una estructura rígida podría presentar un comportamiento similar a una edificación con disipadores ADAS (en cuestión de desplazamientos y ductilidad demandada), como se observó en la figura 4.64, la diferencia entre ambas radica en la cantidad de energía ingresante a la estructura. En la primera todo el daño será concentrado en sus elementos estructurales, mientras que en la segunda este daño será compartido por la presencia de los ADAS.
- Para estructuras de presupuesto limitado, la utilización de disipadores metálicos ADAS resulta ser una alternativa atractiva para la protección de edificaciones. En este estudio se demostró un ahorro económico de \$ **216 273,60** entre la aplicación de los disipadores metálicos y los DFV. Aunque si bien es cierto, la toma de decisión en la utilización de cada tipo de disipador dependerá del proyectista en el nivel de daño que desease obtener

6.2.Recomendaciones

- Extender el análisis del comportamiento ADAS para distintos niveles de sismo considerando el comportamiento no lineal de los elementos estructurales debido al cambio de rigidez que sufre la estructura.
- Incentivar la aplicación de disipadores metálicos ADAS, ya que resultan una solución económica para la protección de estructuras a diferencia de los disipadores de fluido viscoso.
- Realizar análisis de sensibilidad considerando estructuras de corto y mediano periodo para establecer la eficacia y economía en la aplicación de disipadores metálicos tipo ADAS o TADAS.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R., Rodríguez, M., & Mora, D. (2016). *Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS* (1st Editio). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/303256522_Analisis_Sismico_de_Estructuras_con_Disipadores_de_Energia_ADAS_o_TADAS
- Alehashem, S. M. S., Keyhani, A., & Pourmohammad, H. (2008). Behavior and performance of structures equipped with ADAS & TADAS dampers (a comparison with conventional structures). *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- ASCE. *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures*. , (2017).
- ASCE. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. , (2017).
- Avilés, R. (2001). Dispositivos para el control de vibraciones. Universidad Austral de Chile.
- Bambarén, C., & Alatrística, M. del S. (2009). Estimación del impacto socioeconómico del terremoto en Pisco en el sector salud peruano. *Revista Medica Herediana*, Vol. 20, pp. 177–184. Retrieved from http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1018-130X2009000200006&script=sci_arttext&tlng=pt
- Bozzo, L., & Barbat, A. (2004). *Diseño sismorresistente de Edificios, Tecnicas convencionales y avanzadas*. (Editorial). Retrieved from <https://stehven.files.wordpress.com/2015/06/diseo3b1o-sismorresistente-de-edificios-escrito-por-luis-m-bozzo-rotondo-alex-h-barbat.pdf>
- Cano, H., & Zumaeta, E. I. (2012). Diseño estructural de una edificación con disipadores de energía y análisis comparativo sísmico entre el edificio convencional y el edificio con disipadores de energía para un sismo severo (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)). Retrieved from <http://repositorioacademico.upc.edu.pe/upc/handle/10757/301565>
- Chopra, A. (2014). *Dinamica de Estructuras* (4ta Edicio). Mexico: Pearson Eduacion.
- Colunga, A. (2017). Determinación De Parámetros De Diseño Sísmico Para Marcos Dúctiles De Concreto Reforzado Con Disipadores De Energía Histeréticos. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 14(1), 36–58. <https://doi.org/10.5335/rsae.v14i1.6496>
- Constantinou, M., Soong, T., & Dargush, G. (1998). *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit*. Retrieved from <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/663/98-MN01.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Costos Perú. (2019). *Costos_Suplemento Técnico*. Lima, Perú.
- Diaz, M. A. (2014). Evaluación del proyecto estructural y optimización del diseño con disipadores de energía viscosos taylor para una edificación esencial de 6 pisos (Universidad Privada Antenor Orrego - UPAO). Retrieved from <http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/637>

- Esguerra, C. I. (2003). *Análisis y diseño de estructuras con disipadores metálicos de cobre* (Pontificia Universidad Católica de Chile). Retrieved from https://books.google.com.pe/books/about/Análisis_y_diseño_de_estructuras_con_d.html?id=RDefGwAACAAJ&redir_esc=y
- Guevara, D. N., & Torres, P. O. (2012). *Diseño De Un Edificio Aporticado Con Amortiguadores De Fluido-Viscoso En Disposición Diagonal*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hanson, R., Aiken, I., Nims, D., Richter, P., & Bachman, R. (1993). State-of-the-art and state-of-the-practice in seismic energy dissipation. *Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control. 2, Passive Energy Dissipation, Active Control, and Hybrid Control Systems*, 449–471. Retrieved from <https://www.worldcat.org/title/proceedings-of-atc-17-1-seminar-on-seismic-isolation-passive-energy-dissipation-and-active-control-2-passive-energy-dissipation-active-control-and-hybrid-control-systems/oclc/886006777?referer=di&ht=edition>
- HAZUS99. *Multi-hazard Loss Estimation Methodology*. , (2003).
- Herrera, M. (2018). *Desempeño Sísmico En Edificaciones Con Aisladores Elastoméricos Y Amortiguadores De Fluido Viscoso*. Universidad de Piura.
- Herrera, R., & Carboney, J. (2005). Dificultades Para La Implementación De Dispositivos De Aislamiento Sísmico En La Base En Latinoamérica. *Ciencia y Tecnología En La Frontera*, 3, 18. Retrieved from https://www.academia.edu/3458749/DIFICULTADES_PARA_LA_IMPLEMENTACIÓN_DE_DISPOSITIVOS_DE_AISLAMIENTO_SÍSMICO_EN_LA_BASE_EN_LATINOAMÉRICA
- Hwang, J.-S. (2002). *Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*.
- IGP. (2000). *Mapa de sismicidad ocurrida en el Perú entre 1900 – 2000*. Retrieved from <https://portal.igp.gob.pe/sismos-reportados-anualmente>
- Khazaradze, G., & Klotz, J. (2003). Short- and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6). <https://doi.org/10.1029/2002JB001879>
- Kuroiwa, J. (2016). *Manual para la reducción de riesgos sísmicos de viviendas en el Perú*. Lima.
- Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping Technologies for Tall Buildings* (1st Editio). Retrieved from <https://www.bookdepository.com/Damping-Technologies-for-Tall-Buildings-Alberto-Lago/9780128159637>
- Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2019). Damping considerations in tall buildings. In *Damping Technologies for Tall Buildings* (pp. 39–106). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815963-7.00003-8>
- Lai, J.-W., Wang, S., J Schoettler, M., & Mahin, S. (2015). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Tall Buildings in California Case Study of a 35-Piso Steel Moment-Resisting Frame*

- Building in San Francisco*. California, EEUU.: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Liang, Z., Lee, G., Dargush, G., & Song, J. (2012). *Structural damping: Applications in seismic response modification* (F. Cheng, Ed.). <https://doi.org/10.1201/b11449>
- Mahmoodi, P., Robertson, L. E., Yontar, M., Moy, C., & Feld, L. (1987). *Performance of Viscoelastic Dampers in World Trade Center Towers* (pp. 632–644). pp. 632–644. Retrieved from <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0054051>
- Muñoz, E. E., Ruiz, D. M., Prieto, J. A., & Ramos, A. (2017). Estimación de la Confiabilidad Estructural de una Edificación Indispensable Mediante Análisis No Lineales Estáticos de Pushover. *Tekhné*, 1(9), 12. Retrieved from https://scholar.google.com.pe/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=analisis+lineal+estatico+%2B+estructura&btnG=
- Oliver, J., Sykes, L., & Isacks, B. (1969). Seismology and the new global tectonics. *Tectonophysics*, 7(5–6), 527–541. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(69\)90024-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(69)90024-9)
- Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2006). Sistemas De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones. *Revista EIA*, (6), 105–120. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372006000200010&script=sci_arttext&tlng=pt
- Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2009). Metallic Hysteretic Dampers As A Seismic Response Control Technique In Colombian Buildings. *Revista EIA*, (11), 51–63. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1794-12372009000100005
- Palazzo, G., Francisco, J., & Crisafulli, F. (2018). Evaluación De La Eficiencia De Disipadores Por Fluencia Usados Para La Rehabilitación De Pórticos. *Simposio "El Hormigón Estructural y El Transcurso Del Tiempo"*. Argentina.
- Perry, C. L., Fierro, E. A., Sedarat, H., & Scholl, R. E. (1993). Seismic Upgrade in San Francisco Using Energy Dissipation Devices. *Earthquake Spectra*, 9(3), 559–579. <https://doi.org/10.1193/1.1585730>
- Ramberg, W., & Osgood, W. R. (1943). *Description of stress-strain curves by three parameters*. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930081614>
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2016). In *Norma Técnica E.030*.
- Sarmiento, R., & Villarreal, G. (2008). *Edificaciones con Disipadores de Energía* (1st ed.). Retrieved from https://www.academia.edu/5328500/EDIFICACIONES_CON_DISIPADORES_DE_ENERGI
- SEAOC. *Seismic Design Manual*. , (1995).
- Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243–259. <https://doi.org/10.1016/S0141->

- Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., & McNamara, R. J. (2008). Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments. *Journal of Structural Engineering*, *134*(1), 3–21.
- Takewaki, I., Moustafa, A., & Fujita, K. (2013). Earthquake Resilience of High-Rise Buildings: Case Study of the 2011 Tohoku (Japan) Earthquake. In *Improving the Earthquake Resilience of Buildings* (pp. 7–42). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4144-0_2
- Taylor, D. (2003). *Mega Brace Seismic Dampers For The Torre Mayor Project At Mexico City*. 11. Retrieved from [http://www.taylordevices.eu/pdfs/Mega Brace Seismic Dampers-Taylor.pdf](http://www.taylordevices.eu/pdfs/Mega%20Brace%20Seismic%20Dampers-Taylor.pdf)
- Tena-Colunga, A. (2003). Disipación pasiva de energía en México: un estado del arte. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 38. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/259487438_Disipacion_pasiva_de_energia_en_Mexico_un_estado_del_arte
- Tena-Colunga, A., & Hernández, H. (2016). Definición de parámetros globales de diseño sísmico de marcos dúctiles de acero con disipadores de energía histeréticos. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, *16*(1), 19–47.
- Tena-Colunga, A., & Nangullasmú, H. (2013). Diseño sísmico de marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos. Definición de parámetros de diseño. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, *13*(1), 275–299. <https://doi.org/10.5335/rsae.v14i1.6496>
- Tse, K. T., Kwok, K. C. S., & Tamura, Y. (2012). Performance and cost evaluation of a smart tuned mass damper for suppressing wind-induced lateral-torsional motion of tall structures. *Journal of Structural Engineering*, *138*(4), 514–525. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000486](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000486)
- Vargas, E., Gómez, C., & Tena-Colunga, A. (1994). Reestructuración Sísmica De Un Edificio En La Ciudad De México Con Sistemas Disipadores De Energía ADAS. *9th International Seminar on Earthquake Prognostics*, 11. Costa Rica.
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental concepts of earthquake engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Whittaker, A. (1989). *Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements*. California, EEUU.
- Zhou, Y., Lu, X., Weng, D., & Zhang, R. (2012). A practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers. *Engineering Structures*, *39*, 187–198. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.02.014>