

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE UNA ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGÍA, UBICADOS EN DIVERSAS POSICIONES Y CON DISTINTAS CONFIGURACIONES.

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Colón Gutiérrez, Carlos Enrique

Para optar al Título de

Ingeniero Civil.

Caracas, 2015.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE UNA ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGÍA, UBICADOS EN DIVERSAS POSICIONES Y CON DISTINTAS CONFIGURACIONES.

Tutor académico: Prof. Ricardo Bonilla

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Colón Gutiérrez, Carlos Enrique.

Para optar al Título de

Ingeniero Civil

Caracas, 2015.

DEDICATORIA.

A mi madre Vilma Gutiérrez, a quien debo todo lo que soy y lo que seré.

A mi hermana Cindy Colón, mano derecha y apoyo absoluto.

A mis tíos Jesús Colón y Esperanza Colón, quienes constituyen el tipo de persona que quiero ser.

A Odalis Montilla, la mejor parte de mi vida.

AGRADECIMIENTOS.

A mi gloriosa Universidad Central de Venezuela, eterna vencedora de sombras.

A los profesores y empleados de la U.C.V., auténticos héroes anónimos. Los necesitamos.

Al profesor Ricardo Bonilla, por su apoyo invaluable en la realización de este trabajo.

A la profesora María Eugenia Korody, por su incesante labor.

A los Ingenieros Fonny Ng y Leonardo Rodríguez, por la ayuda brindada.

A Dios Todopoderoso, por hacerme Ucevista.

ACTA

El día **03 de noviembre de 2015** se reunió el jurado formado por los profesores:

Carolina Tovar

German Lozano

Tutor: Ricardo Bonilla

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: **"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE UNA ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGIA, UBICADOS EN DIVERSAS POSICIONES Y CON DISTINTAS CONFIGURACIONES."**.

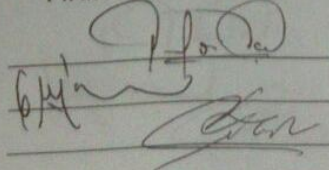
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que el bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Colón Gutierrez, Carlos Enrique.	19	Diecinueve

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO



Colon G. Carlos E.

carloscolong@gmail.com

Tutor Académico: Prof. Ricardo Bonilla

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2014, 98 págs.

**Evaluar el comportamiento de una estructura con disipadores de energía,
ubicados en diversas posiciones y configuraciones; y sometida a sismo
intenso.**

Autor: Br. Carlos Enrique Colón Gutiérrez

Tutor: Ing. Ricardo Bonilla

RESUMEN.

En Venezuela es poco empleado en el diseño de las edificaciones, elementos aisladores o disipadores de energía, cuya importancia radica en disminuir los efectos negativos que ejerce un sismo al atacar una estructura. El presente Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo evaluar el comportamiento de una familia de estructuras con disipadores de energía, ubicados en diversas posiciones y configuraciones; y sometidas a sismo intenso, estudio que se realizara modelando la mencionada familia de estructuras mediante un programa de computo especializado, cotejando los resultados de los efectos del sismo y haciendo un análisis comparativo entre cada configuración distinta planteada. Los resultados pueden representar un avance en la necesidad de aplicar tecnologías y de ampliar los estudios en torno a este tópico debido al alto riesgo sísmico existente en Venezuela.

Dispositivos, Reducción, Energía, Estructuras, Control, Sismo, Histéresis.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.	VI
CAPÍTULO I.	1
Introducción.....	1
El problema de la investigación.....	2
OBJETIVOS.....	4
Objetivo General:	4
Objetivos Específicos:	4
Justificación.	5
Antecedentes.....	5
Aportes.....	8
Alcances y limitaciones.	9
CAPÍTULO II.	11
MARCO TEÓRICO.	11
Control Estructural.....	11

Sistemas sismorresistentes.	12
Sistemas de control.	14
Sistemas de control pasivo.	15
Dispositivos histeréticos.	16
Dispositivos visco-elásticos.	21
Disipación de Energía.	30
Herramientas de modelado de estructuras. Simulación Sísmica.	32
CAPÍTULO III.	34
MARCO METODOLÓGICO.	34
Las estructuras.	35
Conceptos varios.	39
Las cargas.	41
Los sismos.	45
Los modelos.	50
Primera etapa.	50
Segunda etapa.	52
Tercera etapa.	53
Cuarta etapa.	55

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	60
Primera etapa. Pórticos de tres niveles.	61
Análisis de resultados. Primera etapa.....	63
Segunda etapa. Pórticos de seis niveles.	65
Análisis de resultados. Segunda etapa.	68
Tercera etapa. Pórticos de nueve niveles.	69
Análisis de resultados. Tercera etapa.	71
Cuarta etapa.....	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	80
BIBLIOGRAFÍA.	82

LISTA DE FIGURAS.

	Página.
Fig. 1. Mapa sísmico de Venezuela.....	1
Fig. 2. Población por estados.....	1
Fig. 3. Esquema de un sismo.....	12
Fig. 4. Aislador de base.....	15
Fig. 5. Disipador viscoelástico.....	15
Fig. 6. Disipador ADAS.....	16
Fig. 7. Disipador TADAS.....	16
Fig. 8. Dispositivo Honeycomb.....	17
Fig. 9. Amortiguador de junta.....	17
Fig. 10. Dispositivo PENGUIN-PVD.....	18
Fig. 11. Amortiguador de extrusión de plomo.....	19
Fig. 12 Disipador PALL.....	19
Fig. 13. Dispositivo SUMITOMO.....	20
Fig.14. Dispositivo DORKA.....	21
Fig.15. Amortiguador de alto rendimiento.....	22
Fig.16. Disposición TAYLOR.....	23
Fig.17. Dispositivo 3M.....	24
Fig.18. Amortiguador SAVE.....	25

Fig.19. Amortiguador V-SAVE.....	25
Fig.20. Dispositivo S-TMD.....	26
Fig. 21. Dispositivo SSD.....	27
Fig. 22. Amortiguador de masa IHI.....	28
Fig. 23. Familia de estructuras.....	36
Fig. 24. Perfiles Conduven.....	37
Fig. 25. Cargas variables.....	43
Fig. 26. Losa corrugada.....	44
Fig. 27. Cargas distribuidas.....	44
Fig. 28. Ejemplos de acelerogramas.....	46
Fig. 29. Efectos terremoto de Northridge.....	47.
Fig. 30. Componentes acelerogramas empleados.....	50
Fig. 31. Distribución disipadores por nivel. Estructura tres niveles.....	52
Fig. 32. Distribución disipadores por nivel. Estructura tres niveles.....	53
Fig. 33. Disposiciones pórticos y disipadores de primera, segunda y tercera etapa.....	55
Fig. 34 Pórtico de tres niveles con variación de posición de disipadores.....	56
Fig. 35. Variación ascendente. Unidades KN-s/m.....	56
Fig. 36. Variación descendente. Unidades KN-s/m.....	57

Fig. 37. Distribución simétrica 1. Unidades KN-s/m.....	57
Fig. 38. Distribución simétrica 2. Unidades KN-s/m.....	58
Fig. 39. Distribución simétrica 2. Unidades KN-s/m.....	58
Fig. 40. Pórticos 6 x 6. Paralelo simple, paralelo doble, diagonal simple, diagonal doble.....	59
Fig. 41. Deriva vs. rigidez. Estructuras de tres niveles.....	62
Fig. 42. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura de tres niveles. Primera etapa.....	62
Fig. 43. Rendimiento dispositivos. Estructura de tres niveles. Primera etapa..	63
Fig. 44. Derivas máximas vs. rigidez. Estructuras de seis niveles.....	66
Fig. 45. Porcentaje de reducción de derivas. Estructuras de seis niveles.....	67
Fig. 46. Rendimiento de dispositivos. Estructuras de seis niveles.....	67
Fig. 47. Derivas máximas vs. rigidez. Estructuras de nueve niveles.....	69
Fig. 48. Porcentaje de reducción de derivas. Estructuras de nueve niveles...	70
Fig. 49. Rendimiento de dispositivos. Estructuras de nueve niveles.....	71
Fig. 50. Derivas primera etapa vs. derivas diagonal 3 niveles. Cuarta etapa..	72
Fig. 51. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa. Estructura seis niveles.....	74
Fig. 52. Derivas pórtico 6x6 regular vs. pórticos con disposición de	

dispositivos. Cuarta etapa.....76

Fig. 53. Porcentaje reducción de derivas máximas pórticos 6 x 6.

Disposiciones en paralelo y diagonal.....77

Fig. 54. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa.

Estructura nueve niveles.....78

LISTA DE TABLAS.

	Página.
Tabla No. 1. Calibres empleados.....	37
Tabla No.2. Variación dispositivos y rigideces. Pórtico de tres niveles.....	51
Tabla No.3. Variación dispositivos y rigideces. Pórtico de seis niveles.....	52
Tabla No.4. Variación dispositivos y rigideces. Pórtico de nueve niveles.....	54
Tabla No.5. Derivas máximas en cm. Primera etapa.....	61
Tabla No.6. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura tres niveles. Primera etapa.....	62
Tabla No.7. Rendimiento dispositivos. Estructura de tres niveles. Primera etapa.....	63
Tabla No. 8. Derivas máximas en cm. Segunda etapa.....	65
Tabla No. 9. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura seis niveles. Segunda etapa.....	66
Tabla No. 10. Rendimiento de dispositivos. Estructura seis niveles. Segunda etapa.....	67
Tabla No. 11. Derivas máximas. Estructura nueve niveles. Tercera etapa....	69
Tabla No. 12. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura nueve niveles. Tercera etapa.....	70
Tabla No. 13. Rendimiento de dispositivos. Estructura nueve niveles.	

Tercera etapa.....	70
Tabla No. 14. Derivas primera etapa vs. derivas diagonal 3 niveles.	
Cuarta etapa.....	72
Tabla No. 15. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa.....	73
Tabla No. 16. Derivas máximas pórticos 6 x 6. Disposiciones en paralelo y diagonal.....	75
Tabla No. 17. Porcentaje reducción de derivas máximas pórticos 6 x 6. Disposiciones en paralelo y diagonal.....	77
Tabla No. 18. Derivas máximas pórticos de nueve niveles.	
Variación coeficiente de amortiguación. Cuarta etapa.....	78

CAPÍTULO I.

Introducción.

La ocupación demográfica en Venezuela a lo largo de su historia ha tenido ocupación en la zona de mayor actividad sísmica de su geografía. La zona norte costera, junto con la zona andina venezolana, representan los sectores de la geografía nacional en las que hacen vida aproximadamente el 80% de su población, y casi la totalidad de su actividad política y económica. De acuerdo a la fig. 1, podemos observar claramente las zonas 4, 5 y 6

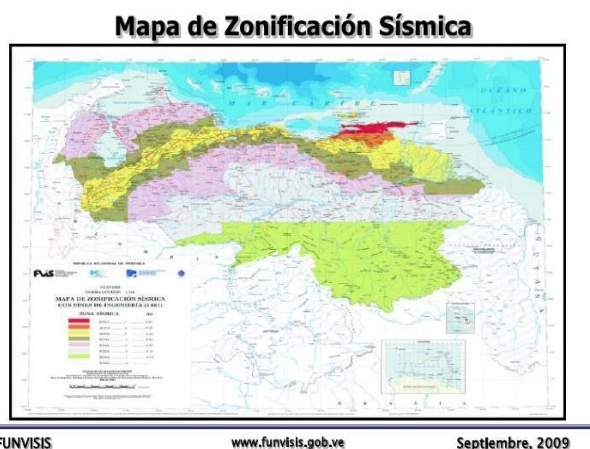


Fig. 1. Mapa sísmico de Venezuela. Fuente: Funvisis

VENEZUELA
CUADRO 2.2. POBLACIÓN TOTAL (VALORES ABSOLUTOS Y RELATIVOS) SEGÚN ENTIDAD FEDERAL CENSOS 2001 – 2011

ENTIDAD FEDERAL	2001		2011	
	TOTAL	%	2011	%
TOTAL	23.054.210	100,0	27.227.930	100,0
DISTRITO CAPITAL	1.836.286	7,9	1.943.901	7,1
ESTADO				
AMAZONAS	70.464	0,5	146.480	0,5
ANZOÁTEGUI	1.222.225	5,3	1.469.747	5,4
APURE	377.756	1,7	459.025	1,7
ARAGUA	1.449.616	6,2	1.630.308	6,0
BARINAS	624.508	2,7	816.264	3,0
BOLÍVAR	1.214.846	5,4	1.413.115	5,2
CARABOBO	1.932.168	8,3	2.245.744	8,3
COJEDES	253.105	1,1	323.165	1,2
DELTA AMACURO	97.987	0,5	165.525	0,6
FALCÓN	763.188	3,3	902.847	3,3
GUÁRICO	627.086	2,7	747.739	2,7
LARA	1.556.415	6,7	1.774.867	6,5
MÉRIDA	715.268	3,1	828.592	3,0
MIRANDA	2.330.872	10	2.675.165	9,9
MONAGAS	712.626	3,1	905.443	3,3
NUEVA ESPARTA	373.851	1,6	491.610	1,8
PORTUGUESA	725.740	3,1	876.496	3,2
SUCRE	786.483	3,4	896.291	3,3
TÁCHIRA	992.669	4,3	1.168.908	4,3
TRUJILLO	608.563	2,6	686.367	2,5
YARACUY	499.049	2,1	600.852	2,2
ZULIA	2.983.679	13,1	3.704.404	13,7
VARGAS	298.109	1,3	352.920	1,3
DEPENDENCIAS FEDERALES	1.651	0	2.155	0,0

FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA

Fig.2. Población por estados. Fuente: Instituto Nacional de Estadística.

según la zonificación sísmica venezolana, que se encuentran en la zona andina y norte costera, zonas en las que también se encuentran las mayores concentraciones urbanas, las ciudades más importantes y pobladas, y la totalidad de los puertos marítimos, que constituyen la puerta comercial de Venezuela hacia el mundo. Como se ilustra en la Fig. 2, tenemos la información ofrecida por el Instituto Nacional de Estadística, de acuerdo al Censo 2011, donde se muestra la

población por estados. En el documento explicativo del Censo 2011, se encuentra lo siguiente:

“La distribución espacial de la población en el territorio venezolano, observada en el período 2001-2011, indica que las entidades federales con mayor población son: Zulia, Miranda, Carabobo, Distrito Capital, Lara, Aragua, Anzoátegui, Bolívar y Táchira, las cuales mantienen las posiciones de primacía del país, al igual que concentran, entre todas ellas, cerca de las dos terceras partes de la población total residente en el país.”

De las entidades nombradas anteriormente, únicamente el estado Bolívar se encuentra en una zona sísmica de baja actividad, lo que hace imperiosa la necesidad de realizar exhaustivos estudios y masificar el acceso a la tecnología sismorresistente con el fin de salvaguardar vidas humanas, y de forma secundaria, economizar una cantidad inmensa de potenciales recursos perdidos a la hora de un evento sísmico de mediana o alta intensidad.

El problema de la investigación.

En Venezuela es poco empleado en el diseño de las edificaciones, elementos aisladores o disipadores de energía, esto se debe al poco acceso que tienen muchos diseñadores estructurales respecto al tema, y por la falta de alternativas viables a ser empleadas en el país, aunado a la nula oferta en el mercado venezolano. Los elementos disipadores son importados y de un alto costo, lo cual aleja las posibilidades económicas sobre el uso de estos elementos, por lo cual resulta necesario realizar estudios que permitan optimizar el

aprovechamiento de los mismos y difundir su existencia, características y beneficios.

A nivel mundial se ha empleado el uso de barras de pandeo restringido con resultados positivos (Cano y Zumaeta, 2012), (Reyes y Rubiano, 2002) abriendo el camino para ser considerados en el medio local, siempre y cuando sean adaptados a las características que rigen las normas de diseño venezolanas.

El empleo de estructuras rígidas es algo que poco a poco ha venido siendo desplazado por estructuras dúctiles, presentándose alternativas para la construcción que controlan el daño estratégicamente y permiten localizar y limitar el daño ocurrido durante un sismo, posibilitando el reemplazo de piezas específicas y diseñadas para tal fin.

Existe una gran variedad de elementos disipadores de energía en el mercado mundial acordes a cada estilo de edificación, pero su comercialización no ha logrado atravesar la sólida barrera que caracteriza al limitado mercado venezolano, lo que se podría corregir optimizando el acceso a la tecnología constructiva mundial y promoviendo la investigación a desarrollar en el país. Por lo tanto se requieren estudiar y desarrollar alternativas eficientes y económicas para ser empleadas por los arquitectos y los diseñadores estructurales locales.

En tal sentido, este Trabajo Especial de Grado persigue contribuir a derribar la barrera informativa, mediante la demostración de la importancia, eficacia y necesidad del uso de sistemas disipadores de energía en el diseño de estructuras sismorresistentes.

OBJETIVOS.

Objetivo General:

Evaluar el efecto de la aplicación de dispositivos disipadores de energía en una estructura, con base a su modelamiento empleando el programa ETABS, con distintas ubicaciones y configuraciones de dichos dispositivos.

Objetivos Específicos:

- Analizar los esfuerzos sufridos por una estructura regular, sometida a fuerzas sísmicas
- Analizar el efecto en una estructura con dispositivo disipador de energía al someterla a fuerzas sísmicas.
- Modelar estructuras mediante software ETABS.
- Determinar el efecto del cambio de posición de los dispositivos disipadores de energía.
- Realizar estudio paramétrico, variando coeficientes de amortiguamiento y rigidez del soporte del dispositivo.
- Simular el efecto de las diversas posiciones de los dispositivos disipadores de energía en la estructura sometida a sismo.
- Comparar las estructuras con dispositivos, y estructura regular.
- Comparar los efectos producidos en la estructura bajo las distintas ubicaciones de los dispositivos disipadores de energía.

Justificación.

En Venezuela, la normativa sismorresistente (Norma Covenin 1756:2001) permite diversas clases de análisis estructural para el diseño de las edificaciones. En los modelos matemáticos que contempla se permite realizar una serie de procesos, entre los cuales se cuenta con el análisis elástico lineal afectado por coeficientes que modelan la disipación de energía a la hora de que un evento sísmico afecte el sistema estructural empleado. Debido a la limitación de información, estudios y aplicación de las técnicas de disipación de energía en estructuras en Venezuela, la importancia de este Trabajo Especial de Grado radica en ayudar a ampliar los horizontes y derribar barreras en cuanto a las formas en las que tradicionalmente se aplican los métodos constructivos y recursos tecnológicos en el país. Con el avance de las tecnologías a nivel mundial, se busca actualizar las propias, y –adicionalmente- debido a que las mayores concentraciones urbanas en Venezuela se encuentran en zonas de alto riesgo sísmico, se busca salvaguardar las vidas humanas y ahorrar recursos económicos importantes reduciendo los potenciales daños ocasionados por un sismo de magnitud importante.

Antecedentes.

El diseño sismorresistente en edificaciones utilizando dispositivos disipadores de energía, es una tecnología relativamente reciente. A lo largo de la historia contemporánea mundial, el criterio principal de diseño sismorresistente ha sido el de salvaguardar vidas previniendo el colapso de las edificaciones a la hora de un evento sísmico. Posteriormente, parte de la tecnología se enfocó en aumentar la ductilidad sin reducir la resistencia de la edificación, mediante el estudio de nuevos

materiales de construcción. A medida que las tecnologías y los estudios fueron avanzando y se fueron estableciendo y afinando las normativas respectivas, el nuevo paso fue darle importancia también a reducir el impacto económico producido por el daño que causan los eventos sísmicos a las estructuras, aislando el daño que sufre la estructura a la hora de un sismo, mediante el uso de dispositivos que, a la par de aislar los daños y ser fácilmente reemplazables, reduzcan el efecto destructor del sismo disipando el efecto de la inercia en la edificación.

En el año 2004, Nagui William Bishay-Girges (PhD) de la Universidad de Canterbury, en Nueva Zelanda, desarrolló una tesis cuya traducción al castellano se titula "*Protección sísmica de estructuras usando sistemas de control pasivo*", que se enfocó en estudiar analítica y experimentalmente la efectividad de sistemas de control pasivo. Se sometió un modelo estructural a una serie de sismos simulados en una plataforma sísmica, los cuales fueron ejecutados y estudiados en una estructura con disipadores y la misma sin ellos. Los sismos simulados fueron una serie con incrementos graduales de intensidad, replicando las dos configuraciones más comúnmente usadas. La tesis también incluyó descripción detallada del modelo estructural y de los sistemas de dispositivos, y los datos obtenidos durante la simulación.

En el año 2007, el M.S Carlos Gerbaudo y PhD. José Inaudi, ambos de la Universidad de Córdoba en Argentina, desarrollaron la tesis titulada "*Disipador metálico para una conexión seca articulada de viga y columna*", cuyo trabajo presenta los estudios analíticos y numéricos realizados para el diseño de un dispositivo metálico de disipación de energía para conexiones viga-columna. Dispositivo concebido para ser utilizado en estructuras prefabricadas de concreto armado y estructuras de acero de grandes luces. Disipador compatible con el diseño tradicional de uniones secas articuladas de viga y columna y cuyo objetivo

es aumentar la capacidad de disipación de energía por medio de la deformación plástica de elementos metálicos.

En el año 2012, los Bachilleres Himler Cano e Iván Zumaeta, de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, en Lima, Perú, desarrollaron un trabajo de grado titulado *“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”*, en el cual se analizaron y describieron analíticamente los distintos tipos de disipadores de energía sísmica, los distintos sistemas de control, y se modelaron matemáticamente sus características y parámetros, para aplicarlos a la normativa peruana pertinente.

En el ámbito local, los bachilleres Blas Palmieri y Angelo Serrano, de la Universidad Central de Venezuela, elaboraron en el año 2014 un trabajo especial de grado titulado *“Propuesta de utilización de disipadores de energía en la construcción de estructuras de concreto armado en Venezuela”*, trabajo que se enfocó en sistemas de control pasivo, mediante disipadores de energía para estructuras no convencionales, aplicados a la norma COVENIN 1756:2001. Los disipadores estudiados, fueron los presentados en el Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica llevado a cabo en el año 2012 en Lisboa-Portugal, obteniendo como resultados grandes reducciones de desplazamientos, derivas, velocidades y fuerzas en los elementos estructurales.

Aportes.

El presente Trabajo Especial de Grado constituye una etapa más en la larga e incipiente empresa de promover y divulgar el uso de las tecnologías de disipación de energía, mediante su estudio y aplicación a las normas venezolanas, factor altamente necesario y valioso debido a la inmensa cantidad de edificaciones existentes en zonas de alta actividad sísmica.

La vulnerabilidad que presenta la sociedad en Venezuela ante desastres naturales, junto con la escasa asignación de recursos económicos y tecnológicos que otorga el estado a la preparación del ciudadano sobre cómo reaccionar a la hora de un desastre natural, agregan importancia en el desarrollo de la presente línea de investigación.

En la gran cantidad de edificaciones con cierto nivel de antigüedad existentes en Venezuela, la línea de investigación que desarrolla este Trabajo Especial de Grado, aporta una eliminación de los daños estructurales y de albañilería que ocurren en un sismo de leve a moderado, y una reducción y limitación de los daños ocurridos en un sismo de moderada a alta intensidad, reduciendo así los costos de reparación y minimizando los riesgos de inhabitabilidad en una estructura luego de un evento sísmico.

Para las nuevas estructuras, la aplicación de sistemas de control con dispositivos disipadores de energía, presenta un adelanto tecnológico que permite una preparación adecuada para enfrentar los efectos de un sismo, reduciendo las derivas producidas y los daños consecuentes en la edificación.

Para la universidad, este trabajo es un aporte más a las investigaciones realizadas sobre disipación de energía en estructuras, campo naciente y con

mucho potencial, el cual está actualmente desarrollado en países como Nueva Zelanda, Japón, Estados Unidos, México, Perú, Colombia, entre otros.

Alcances y limitaciones.

El presente Trabajo Especial de Grado, tiene como objetivo una variación paramétrica de los dispositivos de disipación de energía en estructuras. En vista de la gran cantidad y tipos de dispositivos, se tomará en cuenta la variación del coeficiente de amortiguamiento, y de la posición en la que están ubicadas en la estructura. Para cada configuración paramétrica establecida, se realizara una simulación sísmica y se graficarán los resultados. Esto en vista de que un mismo coeficiente de amortiguamiento lo puede tener más de un tipo de dispositivo.

El análisis que plantea el presente trabajo, es el de la variación de posiciones y parámetros de amortiguamiento. Las características de cada tipo de dispositivo serán explicadas en el marco teórico, sin embargo no se tomaran en cuenta en el estudio ni en las simulaciones.

En relación con las normas de diseño de estructuras que incluyan sistemas disipadores de energía, existen varios tipos de análisis. Estos métodos pueden ser muy complejos, en especial si se incorpora la no linealidad de los elementos que componen el sistema. En este trabajo el diseño se realizara mediante análisis lineal y para modelar los dispositivos de disipación de energía, se limitará a un análisis en el tiempo con acelerogramas, considerando los disipadores como el único elemento de análisis no lineal, y sin incorporar articulaciones plásticas en los elementos estructurales.

Los análisis se realizarán mediante software ETABS, modelando la estructura según las consideraciones establecidas, las cuales se delimitan en el marco metodológico del presente trabajo.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO.

Control Estructural.

El concepto de control estructural en estructuras civiles tiene sus raíces en el trabajo empírico de John Milne, (Liverpool, Inglaterra. 1850-1913) profesor de ingeniería en el Colegio Imperial de Ingeniería en Tokio, Japón, quien hace más de cien años construyó una pequeña casa en madera y la colocó sobre cojinetes para demostrar que la estructura podría ser aislada del movimiento sísmico.

Durante la primera mitad del siglo XX tuvo lugar el desarrollo de la teoría de sistemas lineales y su aplicación al campo de las vibraciones y en particular a la dinámica estructural. La motivación principal de este desarrollo era el motor de combustión interno, usado tanto en automóviles como en aviones, que producía altos niveles de fuerzas dinámicas. Durante la Segunda Guerra Mundial, conceptos tales como aislamiento, absorción, y amortiguamiento de vibraciones, fueron desarrollados y aplicados efectivamente en estructuras aeronáuticas. Después de la Segunda Guerra Mundial, la carrera armamentista y la conquista del espacio fomentaron el desarrollo de la teoría y aplicación del control estructural, y problemas relacionados con estructuras flexibles espaciales. Esta tecnología rápidamente fue adaptada a la ingeniería civil en aplicaciones de protección de puentes y edificios a cargas extremas de sismos y vientos.

El primer estudio conceptual sobre control estructural en ingeniería civil fue realizado por Yao en 1972, en una publicación titulada *“Concepto de Control Estructural”* en la Asociación Americana de Ingenieros Civiles, y desde entonces,

un gran número de investigadores ha desarrollado sistemas de control estructural para el control de la respuesta a esfuerzos sísmicos y eólicos, y se ha verificado el comportamiento de estos sistemas. En agosto de 1994 se realizó en Los Ángeles, EEUU, el primer *Congreso Mundial sobre Control Estructural*, en el que participantes de 15 países presentaron 225 artículos técnicos sobre control estructural, conformándose ese mismo año la *Asociación Internacional para Control Estructural (IASC)*. En los últimos años, el interés en el control estructural ha aumentado notablemente a nivel mundial y se está realizando un gran número de investigaciones con diversos intereses y metodologías con una meta común: la protección de la infraestructura civil y las personas que la usan.

En estructuras civiles, las vibraciones excesivas producidas por sismos fuertes producen daños graves en elementos estructurales y no estructurales, y pérdida de vidas humanas. Controlar la respuesta estructural ante cargas dinámicas, es y ha sido una necesidad para la seguridad de los usuarios y de la edificación. Actualmente, existen alternativas para disminuir la vulnerabilidad estructural, aunque desafortunadamente algunas son poco utilizadas en nuestro país debido al desconocimiento que se tiene sobre la técnica o por los altos costos que genera su implementación.

Sistemas sismorresistentes.

Durante un evento sísmico, las ondas producidas por la liberación de energía, ocasionadas por los movimientos de la corteza terrestre, viajan grandes distancias a altas velocidades. Desde el

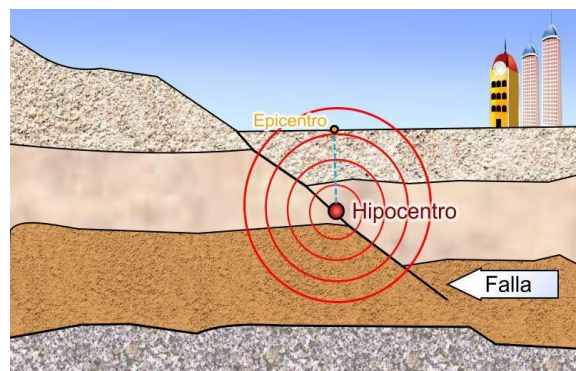


Fig. 3. Esquema de un sismo. Fuente: antisismos.blogspot.com

punto donde ocurre la liberación de energía, llamado *hipocentro*, y ubicado a las profundidades de la corteza terrestre, las ondas sísmicas ocasionadas por los deslizamientos propios de la actividad geológica, viajan expandiéndose, alcanzando el *epicentro*, (ver Fig. 3) como se conoce al punto de la superficie terrestre ubicado perpendicularmente sobre el hipocentro. Una vez las ondas alcanzan dicho punto, continúan expandiéndose radialmente alejándose del epicentro y disipándose gradualmente su intensidad a medida que aumenta la distancia desde el epicentro.

Cuando las ondas que viajan sobre la superficie se topan con una edificación, el movimiento afecta también la estructura, y si la inercia, la geometría y la disposición de las masas dentro de la misma, no son las adecuadas, los daños producidos por el movimiento pueden revestir tal gravedad, que lleve la estructura al colapso.

Una estructura sismorresistente es aquella que cuenta con una configuración y disposición de sus elementos tal que, alcanza una rigidez tal que le permite a la edificación permanecer en pie (evitar el colapso) durante el evento sísmico y en un periodo de tiempo posterior, tal que se permita el desalojo de la estructura. Las normativas sismorresistentes venezolanas (norma COVENIN 1756-2001) establecen en su sección 1.1:

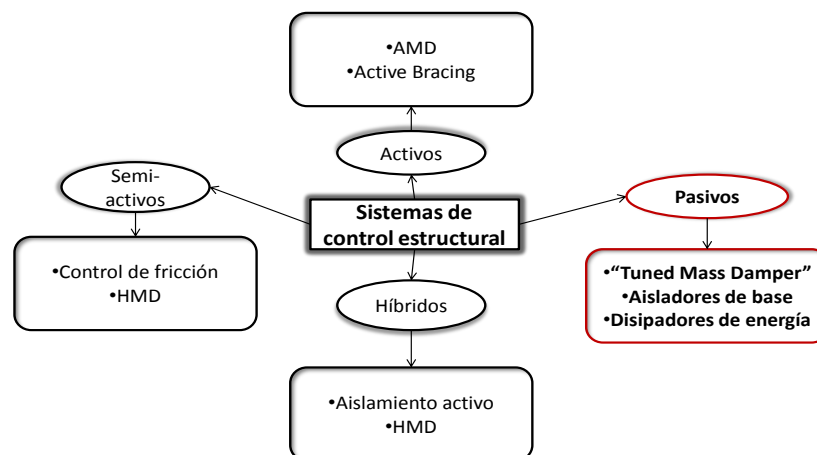
“Las disposiciones de esta Norma, tienen el objetivo de proteger vidas, y aminorar los daños esperados en las edificaciones. Asimismo, mantener operativas las edificaciones esenciales. Para estas últimas, se realizarán estudios adicionales que aseguren su funcionabilidad en caso de sismos extremos.”

Con el fin de ampliar los alcances de la sismorresistencia, protegiendo también la condición de la estructura durante y después del sismo, se han desarrollado varias tecnologías para reducir y limitar el efecto de los daños producidos por el evento

sísmico. Unas de las más representativas y difundidas, son los sistemas de control estructural.

Sistemas de control.

Las vibraciones y los esfuerzos que sufre una estructura producidos por un evento sísmico pueden ser controladas mediante sistemas de control estructural. Estos sistemas son métodos que designan dispositivos adicionales a la estructura regular para disminuir las solicitaciones (fuerzas internas) de una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas, a la vez de limitar los daños, mejorando la respuesta dinámica de la estructura. Los sistemas de control estructural se clasifican en: activos, pasivos e híbridos. Esta clasificación obedece a la necesidad o no, de energía externa necesaria para el funcionamiento del sistema. En el presente trabajo especial de grado, se describirán los *sistemas de control pasivo* ya que el resto de los sistemas de control (híbrido, semi-activos y activos) presentan sistemas electrónicos e informáticos que no son considerables en la presente investigación.



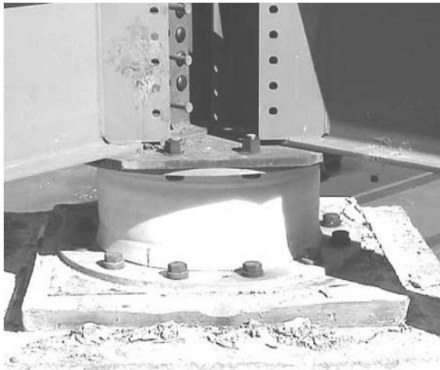


Fig. 4. Aislador de base. Fuente: antisismos.blogspot.com

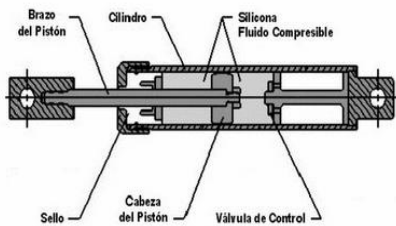


Fig. 5. Disipador viscoelástico. Fuente: antisismos.blogspot.com

Sistemas de control pasivo.

Son dispositivos adaptados a la estructura que tienen la función de absorber un gran porcentaje de las fuerzas dinámicas y disiparlas apoyándose en la capacidad de deformarse en el rango inelástico, lo que hace que la fuerza que tomen los elementos que conforman el sistema estructural sea mínima. No necesitan de ningún tipo de activador o fuente de potencia para su funcionamiento. Estos dispositivos generan fuerzas contrarias a la impartida por el sismo. Estos sistemas incluyen aisladores de base, amortiguadores visco-elásticos, disipadores histeréticos de energía y amortiguamiento por fricción.

Los aisladores de base son dispositivos colocados entre la cimentación y la estructura que permiten aumentar el periodo fundamental de vibración haciendo que las aceleraciones espectrales disminuyan lo que se ve reflejado en una reducción de la fuerza. Están conformados por un elastómero de caucho natural o neopreno reforzado con finas láminas de acero como se observa en la figura 4.

Los amortiguadores visco-elásticos dependen fundamentalmente de la velocidad. Están constituidos por un fluido compresible ubicado entre dos placas de acero. Estos dispositivos disipan la energía por medio de deformaciones

aplicadas por un pistón sobre del fluido viscoso que pasa a través de un orificio (figura 5).

Dispositivos histeréticos.

El disipador histerético de energía (histéresis: capacidad de un material de aumentar su ductilidad con la aplicación de una fuerza) consiste en acoplar a la estructura, por medio de diagonales, un dispositivo metálico capaz de deformarse en el rango inelástico para absorber energía y disiparla. Existen en la actualidad disipadores histeréticos que se ajustan a la estructura de tal forma que puedan trabajar a flexión, cortante, torsión y a carga axial. Los materiales más usados en la fabricación de estos dispositivos son el acero blando y el plomo. Entre los dispositivos histeréticos, existen, como los más difundidos:

- Disipador ADAS (*Added Damping And Stiffness*. Traducción: Amortiguamiento y rigidez agregados). Este sistema consiste en un conjunto de placas paralelas de forma ahusada de modo que permita amortiguamiento al desplazamiento y la torsión entre los planos paralelos que componen sus bases (Ver fig 6.)



Fig. 6. Disipador ADAS. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Disipador TADAS (*Triangular Plates Added Damping And Stiffness*. Traducción: Amortiguamiento y rigidez agregados de placas triangulares). Conjunto de placas triangulares dispuestas de forma paralela, con un comportamiento similar al dispositivo ADAS

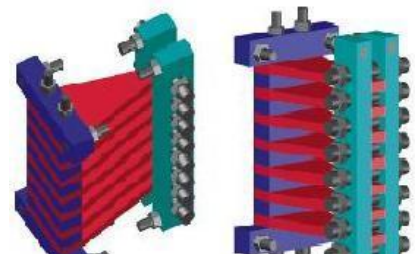


Fig. 7. Disipador TADAS. Fuente: antisismos.blogspot.com

(Ver fig 7.)

- Dispositivo “Honeycomb”. La disposición geométrica de este dispositivo -en forma de panal de abeja- hace que tenga propiedades de alta resistencia y buena capacidad de disipación de energía, propiciando una deformación plástica por todo el dispositivo. La forma en que disipa la energía este amortiguador es a través de su plastificación, conduciendo la deformación entre miembros estructurales (Ver fig 8.)



Fig. 8. Dispositivo Honeycomb.
Fuente:
antisismos.blogspot.com

- Amortiguador de junta. Este sistema de amortiguación se creó para conectar dos o más estructuras adyacentes. Los edificios adyacentes, al igual que las edificaciones de gran longitud, para evitar efectos nocivos a la hora de sufrir un evento sísmico, deben estar separadas, o emplearse una junta estructural que garantice los movimientos independientes de cada edificación, debido a que en el momento de un sismo, dos estructuras que estén relativamente cerca producen movimientos laterales, esta tecnología permite reducir los desplazamientos relativos entre las estructuras (Ver disposición en fig 9.)

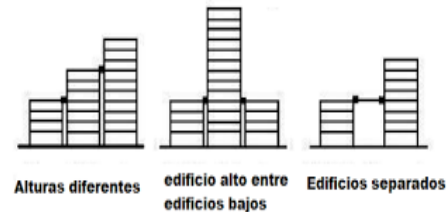


Fig.9. Amortiguador de junta. Fuente:
antisismos.blogspot.com

- Amortiguación de vibración PENGUIN – PVD. Este sistema de amortiguación está constituido por un amortiguador con un núcleo de plomo el cual tiene una resistencia de corte y se encuentra diseñado solamente

para pequeñas vibraciones (Ver Amortiguador de extrusión de plomo). Puede ser utilizado como complemento en estructuras altas o que sean muy flexibles. Estos elementos se distribuyen por toda la edificación. Gracias al núcleo de plomo, pueden ser sometidos a muchos ciclos por lo que es capaz de disipar grandes cantidades de energía plástica, pero

siempre manteniendo sus propiedades mecánicas. La deposición física en fase vapor (PVD, por sus siglas en inglés) es un proceso de recubrimiento termofísico en el que los materiales de revestimiento se vaporizan en una cámara de vacío que contiene gas reactivo y se depositan en la pieza a tratar. Existen varios métodos de PVD entre los que se incluyen la evaporación en arco y la dispersión por magnetrón, con los que se depositan una variedad de elementos o compuestos. Las propiedades del PVD no se verán afectadas ya que el plomo tiene la capacidad de volver a su estado inicial, permaneciendo sus características constantes con el paso del tiempo. (Ver disposición fig. 10.)

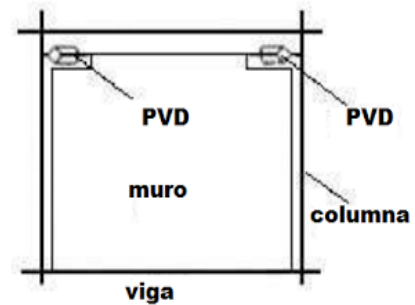


Fig. 10. Dispositivo PENGUIN-PVD.
Fuente: antisismos.blogspot.com

- Amortiguador de extrusión de plomo. Este dispositivo se encuentra fabricado en forma de cilindro el cual en su interior tiene una central de plomo. Funciona en base a la extrusión que se genera en su interior a causa del plomo que será forzado a fluir y a través de procesos cíclicos. Estos dispositivos generalmente se ubican a nivel basal de una estructura. Existen dos tipos de estos dispositivos el primero es un tubo contraído y el otro es de tipo vástago pandeado. El proceso de recuperación de sus propiedades es bastante rápido después de haber sido expuestos a un

sismo. El comportamiento histerético de este amortiguador es de forma regular y estable (Ver fig 11.)

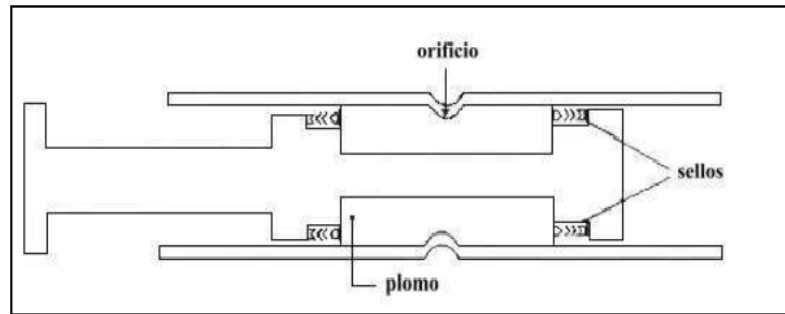


Fig. 11. Amortiguador de extrusión de plomo. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Disipadores PALL. Este dispositivo es el más utilizado comúnmente a nivel mundial. Consiste en un proceso de arriostramientos en diagonal, cuyo punto de intersección, se encuentra acoplado por elementos de eslabones tanto en vertical como en horizontal. Este amortiguador trabaja en base a la fricción disipando la energía sísmica. La energía disipada y el amortiguamiento en un sistema friccional son proporcionales al deslizamiento de los elementos friccionales. Esto quiere decir que si mayor es la fuerza de entrada mejor desempeño de amortiguamiento (Ver fig 12.)

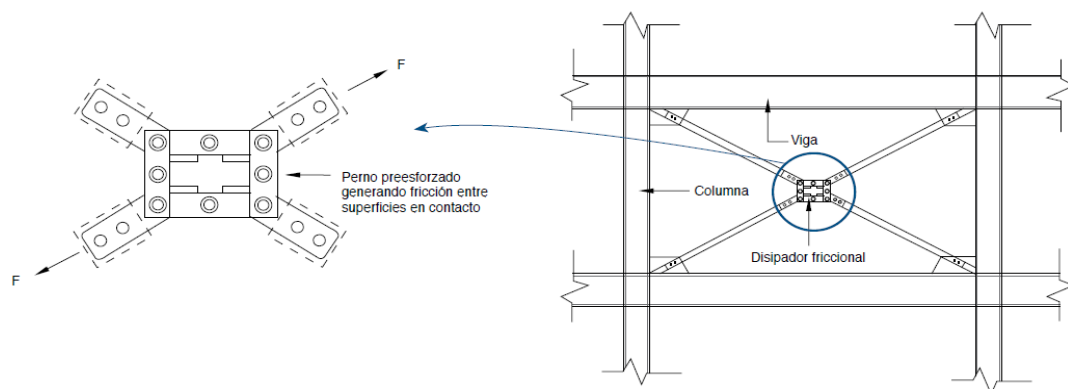


Fig. 12. Disipador PALL. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Dispositivo SUMITOMO. Dispositivo desarrollado, diseñado y elaborado por la empresa japonesa *Sumitomo metal Industries Ltd.* Según Lagos, V. (2012), este dispositivo “consiste en una serie de cuñas que actúan unas en contra de las otras bajo una carga, las que al actuar sobre un resorte crea fuerzas en los cojinetes, estos cojinetes deslizan directamente por sobre la superficie de acero interior del dispositivo.” Aprovechando los movimientos relativos entre la viga y el arriostramiento, disipando la energía proveniente de las vibraciones y reduciendo el movimiento de respuesta de la edificación. Los cojinetes de fricción son una aleación de grafito y cobre, los que combinándose producen una lubricación seca al sistema, asegurando buena fricción y reduciendo el ruido durante los desplazamientos. El dispositivo tiene la característica de que para fuerzas menores no disipan energía ya que el movimiento es nulo (Ver fig 13.)

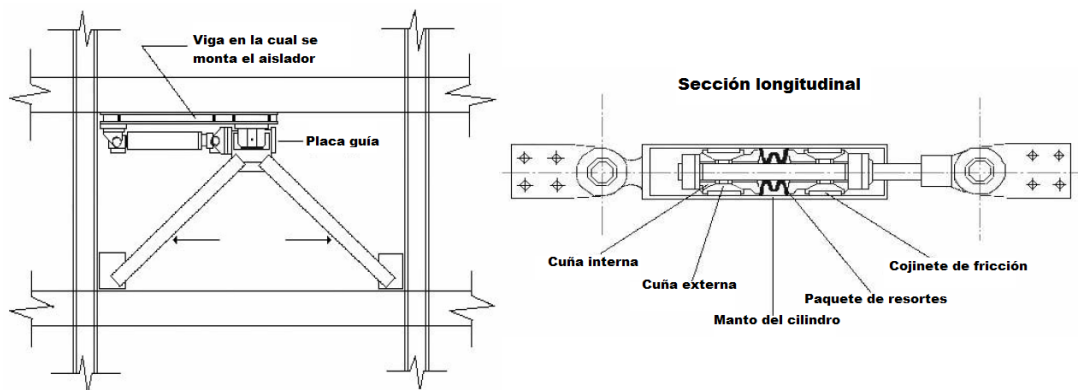


Fig. 13. Dispositivo SUMITOMO. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Dispositivos DORKA. Este dispositivo se creó con el fin de evitar las fallas típicas que se producían en los dispositivos friccionales como:
 - ✓ Imposibilidad de revisión en sitio.
 - ✓ Unidireccionalidad de movimiento del dispositivo.

- ✓ Poca disipación de energía, lo que requería gran número de dispositivos en la estructura.
- ✓ Podían ser peligrosos al excitar frecuencias altas.

Por estas razones se desarrolló un dispositivo con las capacidades de proveer completamente un amortiguamiento de fricción durante un evento sísmico. Este dispositivo se compone esencialmente por una serie de anillos planos de acero inoxidable, los cuales se pueden deslizar alternadamente mediante discos guías. Cuando el núcleo central es desplazado, se desarrolla en la superficie disipación mediante fricción y los anillos se encuentran retenidos por un manto exterior. (Ver fig. 14.)

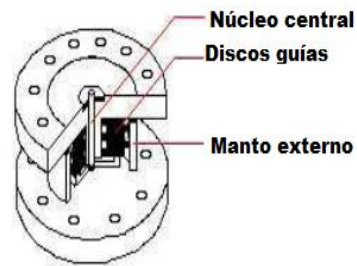


Fig.14. Dispositivo DORKA. Fuente: antisismos.blogspot.com

Dispositivos visco-elásticos.

Los amortiguadores viscosos utilizan la resistencia viscosa, la cual varía en función de la velocidad. Los amortiguadores visco-elásticos aprovechan la deformación de corte de materiales, basados en polímeros altamente disipativos. Estos sistemas pueden funcionar para niveles de vibración muy pequeños en comparación con los mecanismos histeréticos. El efecto de amortiguamiento por unidad de volumen del dispositivo es limitado, lo que implica la construcción de dispositivos de gran tamaño para soportar las deformaciones en las estructuras. El funcionamiento de los mecanismos de amortiguamiento viscoso es también

afectado por factores como la temperatura y la velocidad de vibración. Durante el diseño de los amortiguadores se debe estudiar y ensayar la capacidad de deformación y amortiguamiento de los mismos, bajo las condiciones de temperatura locales. Debido a que la temperatura de los materiales visco-elásticos se eleva bajo repetidos ciclos de carga, los efectos de amortiguamiento descienden, es por ello que puede ser necesaria la utilización de placas de acero con gran capacidad térmica u otras medidas de resistencia al calor o aislamiento en el dispositivo. Los mecanismos de amortiguamiento viscoso requieren mantenimiento, tal como el cambio periódico del aceite que usa el dispositivo, y evaluación técnica para minimizar el deterioro y el decrecimiento de su efectividad sismorresistente.

Los dispositivos visco-elásticos más comunes se presentan a continuación.

- Amortiguador de aceite de alto rendimiento.

Este sistema está basado en la resistencia del fluido viscoso atrapado en cámaras de presión frente a la acción de un pistón. La instalación puede ser en diagonales estructurales dispuestas en V o en V invertida (ver fig. 15), en cualquiera de las dos formas que se instale el dispositivo tendrá una gran capacidad de absorción de energía, reduciendo las deformaciones. La conexión es por arriostramiento mediante anillos de horquilla fijándolo en el extremo de la barra y en el cilindro.

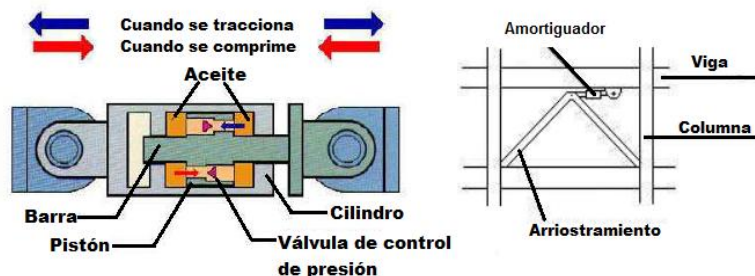


Fig.15. Amortiguador de alto rendimiento. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Disposiciones “Taylor” para amortiguadores viscosos.

El dispositivo de amortiguación, tiene el mismo funcionamiento del dispositivo anterior, dispuesto mediante las siguientes posiciones (ver fig. 16).

- a) En diagonales simples
- b) En arriostramiento “V invertido”
- c) Como parte de aislamiento de base

Esta disposición es altamente efectiva en protección sismorresistente, siempre que la edificación sea de baja altura. También es aplicable a puentes y viaductos.

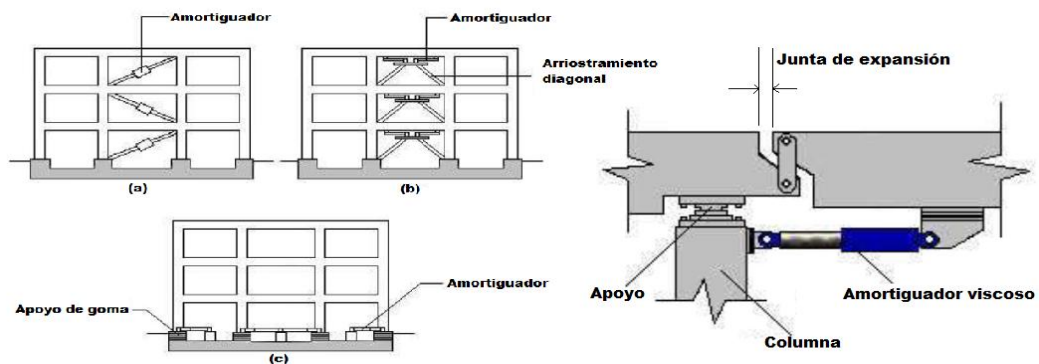


Fig.16. Disposición TAYLOR. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Amortiguador visco-elástico 3M.

Consiste en la aplicación de franjas de material visco-elástico ubicadas estratégicamente en el solape entre las diagonales y el arriostramiento. Este dispositivo se compone de polímeros sumamente resistentes y altamente disipativos que utilizan el desplazamiento relativo entre la diagonal y el arriostramiento para disipar la energía proveniente de la

acción sísmica o cualquier otra vibración que afecte la estructura (ver fig. 17.)

Según Raúl Avilés, en su trabajo *Dispositivos para el control de vibraciones* (2001), el comportamiento de dicho dispositivo se resume en:

“Los amortiguadores visco-elásticos exhiben curvas de histéresis elípticas, típicas de materiales con propiedades que dependen de la velocidad. Tales curvas son de forma regular y muestran un comportamiento estable. Estos amortiguadores no tienen un nivel de fuerza de activación, como por ejemplo lo tienen los dispositivos de fricción. De esta manera disipan energía para todos los niveles de excitación sísmica.”

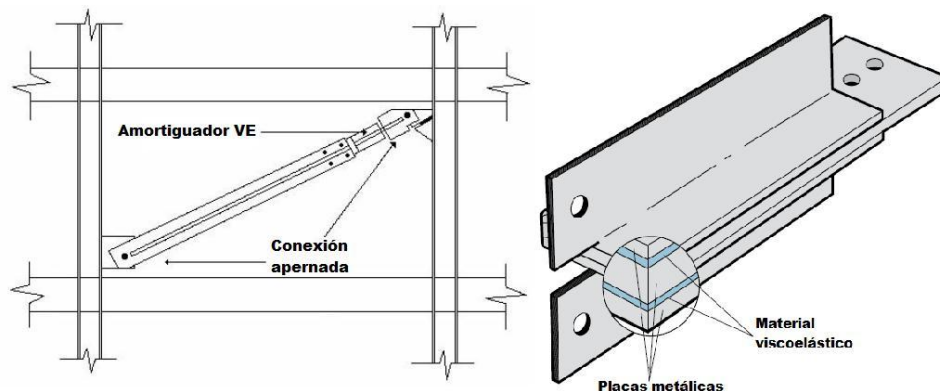


Fig.17. Dispositivo 3M. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Amortiguador SAVE

Este dispositivo está compuesto por capas paralelas de acero y de un material visco-elástico -asfalto- (ver fig.18). Este asfalto utilizado en amortiguadores tiene propiedades mecánicas de un material polímero termoplástico. La ubicación de este amortiguador es en el interior de muros,

utilizando los desplazamientos para absorber las vibraciones de un sismo. El mejor desempeño lo obtienen disipando energías provenientes de vientos y sismos de mediana intensidad.

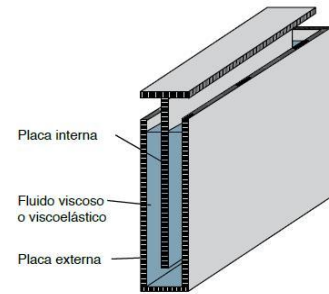


Fig.18. Amortiguador SAVE.
Fuente:
antisismos.blogspot.com

- Amortiguador V-SAVE

Este dispositivo reduce las vibraciones verticales en los entrepisos y vigas principales. A través de las deformaciones absorbe energía y reduciendo las vibraciones verticales. Generalmente la ubicación de este dispositivo es por debajo de la viga y su fijación es con pernos. En función a las cargas, generan movimientos en la placa de acero produciendo la deformación del material viscoso (ver fig. 19).

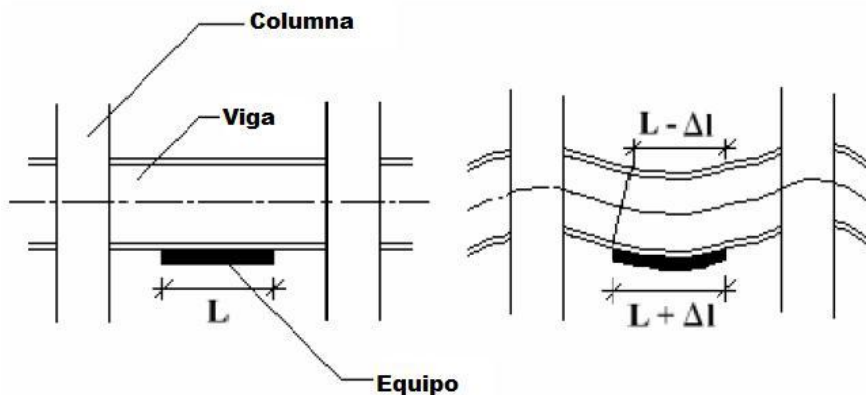


Fig.19. Amortiguador V-SAVE. Fuente: antisismos.blogspot.com

Dispositivos con sistemas de efecto-masa. “Tuned mass damper”.

El principio de los dispositivos de este sistema es que funcionan bajo el método de masa sintonizada, que consiste en ubicar un elemento de gran masa en los niveles superiores de una estructura, permitiendo que la frecuencia natural de vibración se aproxime a la frecuencia fundamental de la estructura, logrando que el comportamiento del sistema con dos grados de libertad, que se desplace en un plano horizontal sea contrarrestado por el movimiento opuesto de la masa colgante. La ventaja de este sistema es que los amortiguadores de masa sintonizada se pueden instalar sin modificar el esquema resistente de la estructura.

Entre los dispositivos con sistema efecto-masa, se encuentran los siguientes.

- Dispositivos S-TMD

Sistema compuesto por una masa auxiliar soportada por apoyos de goma, los cuales soportan esfuerzos de compresión y tracción, simultáneamente, estos tienen la capacidad de deformación en un plano horizontal.

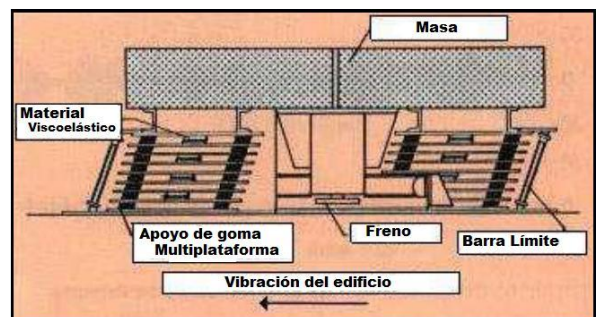


Fig.20. Dispositivo S-TMD. Fuente: antisismos.blogspot.com

Mediante el sistema resonante de la masa, se controlan las vibraciones de una edificación, equiparando la frecuencia del amortiguador con la frecuencia de la estructura, en caso de que la deformación supere los límites, se instalará un sistema de frenos neumáticos. La optimización de este sistema,

radica en la sintonización del periodo de la edificación con el del dispositivo, lo que generaría una gran reducción de las fuerzas internas y las derivas. (Ver fig. 20).

- Dispositivo SSD

Consiste en un tanque con varias divisiones horizontales cuyo contenido es agua, pretendiendo reducir las vibraciones del edificio, disipando la energía mediante el paso del fluido de un compartimiento al siguiente, balanceando la masa (ver fig. 21). La instalación de este dispositivo es en la parte superior de la estructura, necesita un espacio amplio e instalaciones complementarias de plomería en general. La instalación es fácil y económicamente baja, en comparación con otros dispositivos.

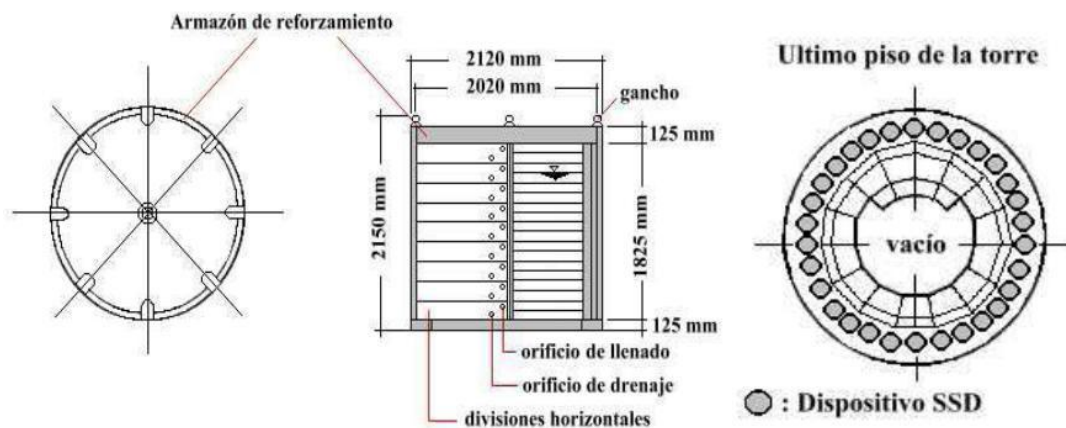


Fig. 21. Dispositivo SSD. Fuente: antisismos.blogspot.com

- Amortiguador de masa pasivo IHI.

Del tipo péndulo multiplataforma, consiste en suspender una gran masa basculante por medio de cuatro columnas y vigas, generando así un péndulo (ver fig. 22). La parte inferior del péndulo se ancla a la estructura mediante resortes, controlando así su vibración. La principal característica de este amortiguador es que posee la capacidad de cambiar la frecuencia natural de una estructura. Este tipo de amortiguadores son sumamente eficientes y altamente empleados en edificaciones de gran altura y esbeltez.



Fig. 22. Amortiguador de masa IHI.
Fuente: antisismos.blogspot.com

La elección de un sistema pasivo de disipación de energía depende de muchos factores, técnicos, económicos, geográficos y climáticos.

- Costos de los dispositivos. En este renglón se deben considerar los gastos generales de obtención, suministro, transporte, importaciones, instalación, mantenimiento, estudio, ensayos y adecuación del sistema al entorno en el que se planea levantar la estructura, y su variación entre cada tipo de dispositivo.
- Costo del proyecto. Este renglón toma en cuenta la rentabilidad de la utilización de dispositivos de disipación de energía, en función a la totalidad del proyecto.
- Costos de los esfuerzos locales de la estructura requeridos para la instalación de disipadores. En algunos casos el costo de los dispositivos puede ser menor al de los elementos de sujeción del dispositivo a la estructura.

- Costos de posibles espacios que dejan de utilizarse para instalar los dispositivos.
- Disponibilidad de mano de obra calificada para la instalación de los dispositivos, y para su posterior mantenimiento/refacción.
- Consideración de la importancia de la estructura, y evaluar que los potenciales daños evitables mediante la implantación de los dispositivos de disipación, justifiquen su empleo en la estructura.
- Evaluación y ensayo del desempeño de los dispositivos en el entorno en el que se levantara la edificación. Factores como la temperatura inciden notablemente en el desempeño de los dispositivos.

Los sistemas de disipación de energía, proporcionan ventajas invaluable a la seguridad sismorresistente de una edificación, entre las cuales se puede considerar:

- Reducción notable de los daños estructurales durante un sismo de gran intensidad.
- Reducción de los costos de refacción luego de un sismo.
- Aumento de la sensación de seguridad por parte de los habitantes que hacen vida en la estructura.
- Posible reducción de costos de estructuras, debido a que el empleo de dispositivos permitiría reducción de dimensiones de elementos estructurales.
- Protección a los bienes muebles dentro de las edificaciones, además de las instalaciones, debido a la reducción de los efectos del sismo.

Disipación de Energía.

Los mencionados disipadores de energía mejoran el desempeño de la estructura mediante la adición de amortiguamiento y en algunos casos por otorgar rigidez al sistema, que provoca una reducción en las demandas de desplazamiento y en las fuerzas internas de respuesta del edificio. Estos dispositivos son una opción competitiva cuando se trata de mejorar el desempeño de la estructura en niveles de protección de vida e incluso de ocupación inmediata, pero su aplicación puede ser limitada para el caso de la prevención del colapso. (Torres, 2009)

Cuando un sismo de considerable magnitud excita una estructura, el grado de daño que adquiere dependerá de la manera que ésta absorba los niveles de energía cinética a los cuales estuvo sometida. Como los códigos de diseño actuales lo reconocen, sería demasiado costoso absorber esta energía dentro de la capacidad elástica de los materiales. La mayoría de los reglamentos recomiendan aprovechar la ductilidad que son capaces de desarrollar las estructuras. Los edificios diseñados de esta manera dependen para su supervivencia durante un sismo severo, de la ductilidad que puedan desarrollar los elementos estructurales que lo conforman. La razón fundamental que lo motiva es que al entrar la estructura al intervalo de comportamiento inelástico, la respuesta se reduce ya que existe disipación de energía. Cabe decir que el equilibrio energético que se presenta en un sistema estructural durante un sismo puede expresarse de la siguiente manera:

$$EK+ES+EH+ED=EI$$

Ec. 1

Donde **EI** es la energía total inducida por el sismo; **EK** y **ES** son las

energías cinética y de deformación elástica; y **ED** y **EH** son las energías disipadas por el amortiguamiento viscoso de la estructura y por la deformación de la estructura en el rango inelástico, respectivamente. La suma de las energías cinéticas y de deformación elástica: $EK+ES$ representa la energía que se presenta durante la vibración elástica, mientras que $EH+ED$ representa la energía disipada por el sistema. De estas formas de energía, las dos primeras sólo representan un bajo porcentaje de la energía recibida por el sismo (la que liberan los sismos y absorben las estructuras). La energía disipada por amortiguamiento ocurre mediante el movimiento relativo de las partes que componen los edificios, pudiendo ser éstas estructurales o no; y también representa un bajo porcentaje de la energía recibida. La energía disipada en la estructura mediante el comportamiento en el rango inelástico de sus miembros es sin duda la más importante en magnitud, pues es la que ocurre cuando los elementos estructurales llegan al rango inelástico de su comportamiento desarrollando articulaciones plásticas.

Cuando en un elemento se forman articulaciones plásticas existen deformaciones permanentes en su sección transversal, lo que puede traducirse en un daño. En el caso de elementos de concreto, estas articulaciones pueden ir desde pequeñas grietas hasta desprendimiento del recubrimiento y deformación del acero de refuerzo.

La secuencia en que se desarrollan las articulaciones plásticas no es del todo controlable. Ésta depende de factores tales como: distribución de la carga en el momento en que ocurre el sismo, regularidad de las dimensiones de los componentes estructurales y su forma de conexión, secuencia del proceso constructivo y en gran parte del detallado de los elementos estructurales. Resulta difícil valorar en los casos reales de los edificios hasta qué punto se puede confiar en la ductilidad de la estructura sin poner en peligro las vidas humanas,

sobre todo si se trata de estructuras ya existentes, las cuales han sido diseñadas con reglamentos antiguos y dañadas significativamente por sismos ocurridos.

Para disipar energía sísmica de forma ideal, es necesario no depender directamente de la ductilidad de los elementos estructurales, sino del amortiguamiento interno y dejar el comportamiento inelástico de las estructuras como una reserva de resistencia. Sin embargo, el amortiguamiento de los sistemas estructurales generalmente está limitado a un intervalo comprendido entre el 2 y el 5% del amortiguamiento crítico. El amortiguamiento depende de las características de los materiales utilizados, la forma de la estructura, la naturaleza del subsuelo y las características de la vibración. Entre mayor sea el porcentaje de amortiguamiento interno de la estructura, menores serán las ordenadas espectrales de las aceleraciones. Como consecuencia las fuerzas de inercia originadas por los sismos serán menores. Los dispositivos disipadores de energía permiten incrementar el amortiguamiento interno de las estructuras para hacerlas menos vulnerables a los sismos, con lo cual se disminuyen los desplazamiento laterales, los esfuerzos internos en la estructura, las descargas a la cimentación y los momentos de volteo originados por las fuerzas sísmicas.

Herramientas de modelado de estructuras. Simulación Sísmica.

La realización del presente Trabajo Especial de Grado se realiza mediante la ayuda de tecnologías aplicadas y de uso del computador, herramientas que permiten acortar los tiempos de cálculos de diversos métodos existentes para evaluar los efectos y las fuerzas que ejerce un sismo en una estructura específica. De manera particular, se empleara el programa de cómputo *E.T.A.B.S. (Extended*

Three Dimensional Analysis of Building Systems. Análisis Tridimensional Extendido de Edificaciones.)

En relación a las características del programa, (Morrison Ingenieros, 2008) refiere:

“ETABS es un programa de análisis y diseño con un propósito especial, sofisticado y fácil de usar, desarrollado específicamente para sistemas de edificaciones. ETABS posee una poderosa e intuitiva interfaz gráfica con procedimientos de modelaje, análisis y diseño sin igual, todos integrados usando una base de datos común. Aunque fácil y sencillo para estructuras simples, ETABS también puede manejar los más grandes y complejos modelos de edificios, incluyendo un amplio rango de comportamientos no lineales, haciéndolo la herramienta predilecta para ingenieros estructurales en la industria de la construcción.”

Como se entiende de lo anterior, el programa ETABS, permite –entre otras cosas-, hacer los cálculos pertinentes de las coordenadas de centro de masas, centro de rigidez y centro de torsión de una estructura, parámetros necesarios al momento de analizar el efecto que ejercería un sismo en la misma. De igual manera, los desplazamientos y las derivas de cada punto y la deformación de los miembros de la estructura. Adicionalmente, tiene la ventaja de permitir importar la geometría de la estructura desde el programa AUTOCAD, y exportar el resultado de los cálculos a programas como Excel, SAP2000, SAFE, con la finalidad de complementar y cotejar correctamente los datos obtenidos.

CAPÍTULO III.

MARCO METODOLÓGICO.

La realización del presente trabajo especial de grado, se lleva a cabo mediante la evaluación de tres familias de pórticos, de distintas alturas, y entrepisos iguales. La primera familia de pórticos, posee tres niveles, con altura de entrepiso de tres metros (3.00 m.), lo que arroja una altura total de nueve metros (9.00 m.). La segunda familia, posee seis niveles, con la misma altura de entrepiso que la anterior (3.00 m.) para una altura total de dieciocho metros (18.00 m.). La tercera familia, consta de nueve niveles, con la misma altura de entrepiso, lo que arroja una altura total de veintisiete metros (27.00 m.). Cada pórtico posee una luz de cinco metros (5.00 m.) y cuatro ejes verticales, lo que genera un ancho de pórtico de quince metros (15.00 m.) medidos del primer al último eje. Las medidas descritas, nos permiten esperar desplazamientos y deformaciones apreciables, que permitan ampliar la eficacia de los dispositivos disipadores de energía. (Ver fig. 23)

Los pórticos con dispositivos, cuentan con la presencia de diagonales ubicadas en el cuerpo central, entre los ejes 2 y 3 (Ver fig. 23). Dichas diagonales son asumidas con el mismo material, pero con secciones considerablemente menores que el resto de la estructura, con el fin de reducir la capacidad estructural de las diagonales para acumular la totalidad de los esfuerzos sobre el dispositivo disipador. En dichas diagonales se plantea la colocación de los sistemas de disipación de energía (dispositivos disipadores histeréticos y de plomo), a los cuales se les colocan tres coeficientes distintos de amortiguación (600, 5400 y 9000 KN-s/m), y se realiza el ensayo para cada uno de los mencionados casos.

La rigidez de cada familia de estructuras se varía mediante la elaboración de las mismas, con cada uno de los calibres comerciales que ofrece UNICON, en su catalogo “Propiedades estáticas de perfiles tubulares Conduven ECO sección cuadrada”, perfiles que facilitan el estudio, y cuyo rango de calibres garantiza la estabilidad de la estructura, de acuerdo con las tres alturas consideradas y las cargas establecidas, a mencionar posteriormente.

Una vez ensayadas todas las modalidades, se comparan las derivas de cada configuración (altura y rigidez) de pórticos regulares, con las derivas de la misma configuración, pero con la adición del dispositivo, lo que ilustra el efecto de la aplicación y la variación del coeficiente del mismo.

Las estructuras.

Las estructuras a emplear (ver fig. 23) se plantean compuestas de perfiles cuadrados Conduven, de acero A-36 (acero estructural al carbono corriente), el cual posee las siguientes propiedades mecánicas:

- Tensión cedente $F_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$
- Tensión máxima $F_u = 4080 \text{ Kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad $E = 2\,100\,000 \text{ Kg/cm}^2$
- Peso unitario $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

Las secciones de los elementos que conforman la estructura, se especifican en la fig. 24.

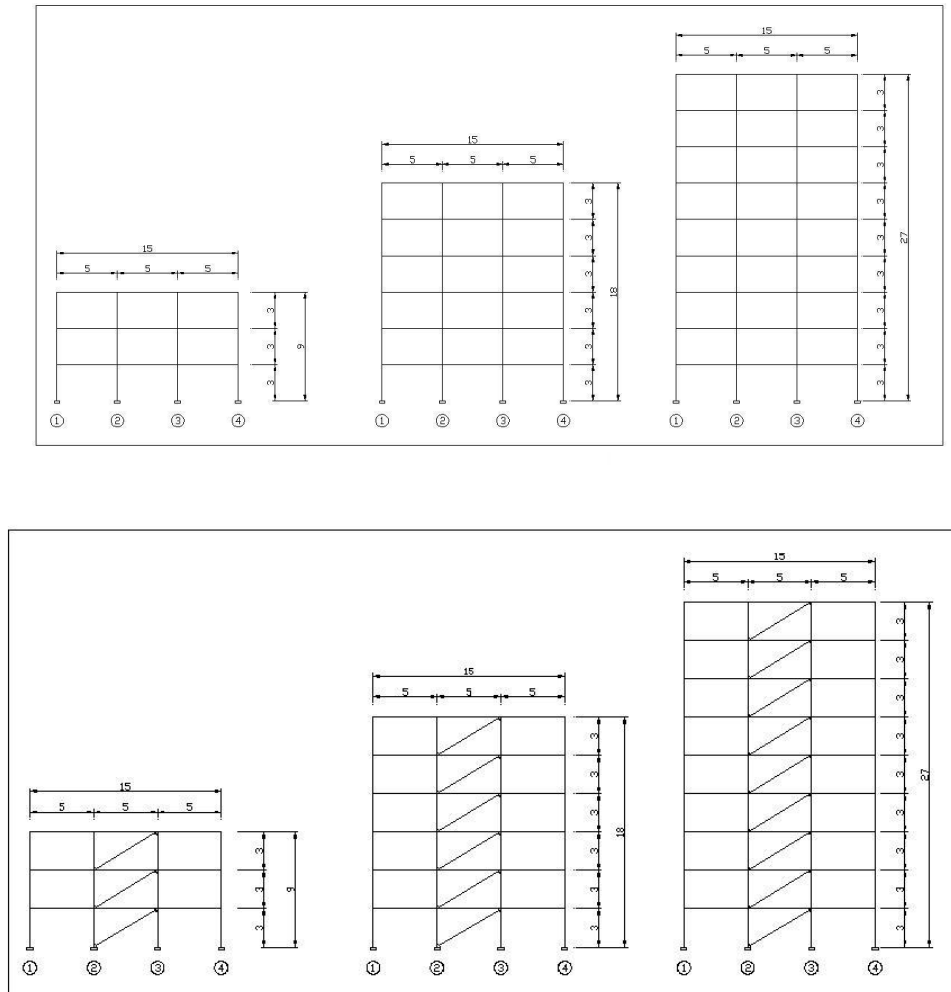


Fig. 23. Familia de estructuras.

CAPITULO I

Consideraciones generales para el diseño

TABLA 1.4.2 Propiedades estáticas de perfiles tubulares Conduven ECO
Sección Cuadrada

Designación Comercial	Espesor Nominal	Área Diseño	Esbeltez Ala	Esbeltez Alma	Propiedades Estáticas					
H x B mm DN	e mm	A cm ²	b/t	h/t	I _x = I _y cm ⁴	S _x = S _y cm ³	r _x = r _y cm	Z _x = Z _y cm ³	J cm ⁴	C cm ³
60 x 60	2,25	4,70	23,67	23,67	25,80	8,60	2,34	10,09	40,35	13,97
70 x 70	2,25	5,53	26,45	28,45	41,91	11,97	2,75	13,96	65,19	19,24
90 x 90	2,50	7,97	33,71	33,71	100,81	22,40	3,56	25,99	156,10	35,66
100 x 100	3,00	10,58	30,84	30,84	164,39	32,88	3,94	38,25	255,15	52,58
110 x 110	3,40	13,17	29,79	29,79	247,03	44,91	4,33	52,30	383,78	71,97
120 x 120	4,00	16,83	27,26	27,26	373,45	62,24	4,71	72,68	581,63	100,24
135 x 135	4,30	20,41	28,76	28,76	575,20	85,22	5,31	99,34	894,50	136,82
155 x 155	4,50	24,64	32,04	32,04	922,00	118,97	6,12	138,24	1,429,61	189,87
175 x 175	5,50	33,86	29,21	29,21	1,605,49	183,48	6,89	213,79	2,495,61	294,33
200 x 200	5,50	38,98	34,10	34,10	2,436,56	243,66	7,91	282,63	3,771,90	387,62
200 x 200	7,00	48,93	25,72	25,72	3,004,25	300,43	7,84	351,48	4,686,96	485,55
220 x 220	7,00	54,14	28,79	28,79	4,053,03	388,46	8,65	429,51	6,302,67	591,53
220 x 220	9,00	68,45	21,28	21,28	5,012,79	455,71	8,56	536,80	7,866,32	745,70
260 x 260	9,00	81,84	26,06	26,06	8,500,05	653,85	10,19	764,63	13,255,84	1,055,80
260 x 260	11,00	98,61	20,42	20,42	10,052,33	773,26	10,10	912,34	15,795,86	1,269,03

DN: Designación comercial del producto en milímetros.
Todas las propiedades estáticas y relaciones de esbeltez han sido calculadas para el espesor de diseño según recomendaciones de las especificaciones ANSI/AISC 360-05.

Fig. 24. Perfiles Conduven. Fuente: Manual de diseño de estructuras de acero. UNICON.

De la tabla L4.2, se empleara un rango de calibres que permita generar una variación de rigideces satisfactorias según el número de niveles de cada estructura, y variaciones de derivas apreciables. De tal manera, la tabla N°. 1 nos muestra los calibres empleados en las columnas de cada familia de análisis:

Estudio	Calibres columnas (mm). Medida lado x espesor.					
3 Niveles.	110 x 3	120 x 4	155 x 4.5	175 x 5.5	200 x 5.5	200 x 7
6 Niveles.	120 x 4	155 x 4.5	175 x 5.5	200 x 5.5	200 x 7	220 x 9
9 Niveles.	175 x 5.5	200 x 5.5	200 x 7	220 x 9	260 x 9	260 x 11

Tabla No. 1. Calibres empleados.

La tabla anterior, muestra los calibres empleados en las variaciones de rigideces de las columnas de las estructuras (columnas sin variar sección con la altura). Para las vigas se modelan perfiles Conduven rectangulares, sin variación y

con medidas 260 x 90 x 5.5 mm para cualquier nivel. Las diagonales a emplear, se modelan como tubo circular de 80 mm de diámetro externo y 3 mm de espesor. Dichas diagonales, se modelan con una rigidez muy pequeña en comparación a la del resto de la estructura, con el fin de acumular todos los esfuerzos en el disipador. Dicho de otra manera, las diagonales no deben ejercer soporte estructural, sino proporcionar la rigidez axial necesaria para el funcionamiento del dispositivo. La disposición de las diagonales, simula una disposición Taylor para amortiguadores viscosos, lo que aumenta el rango de efectividad en una estructura de baja o media altura.

La rigidez efectiva que se plantea para el soporte del dispositivo, se modela como la de una sección de las siguientes características:

- Área= 4000 mm².
- Módulo de elasticidad= 2100000 kgf/cm².
- Longitud de la diagonal= 5.831 m.

$$R = \frac{A * E}{L} = \frac{4000 \text{ mm}^2 * \frac{1 \text{ cm}^2}{100 \text{ mm}^2} * 2100000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}{583.1 \text{ cm}} = 144057.62 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

Para la introducción en el software, se hace la conversión a las unidades KN/m:

$$\mathbf{R = 141320.5 \text{ KN/m}}$$

Con el fin de limitar los esfuerzos de la diagonal, a estos elementos se les modela una rótula en los extremos (no ejercen momento ni torsión a la estructura), lo que garantiza que dichos elementos trabajen exclusivamente a tracción.

Las fundaciones del modelo, se establecen como empotramientos, es decir, se restringen todos los grados de libertad de cada vínculo.

Las estructuras se modelan con el fin de hacer análisis comparativos entre:

- Estructuras sin dispositivos (pórticos regulares).
- Estructuras con dispositivos de 600 KN-s/m.
- Estructuras con dispositivos de 5400 KN-s/m.
- Estructuras con dispositivos de 9000 KN-s/m.

En el presente Trabajo Especial de Grado, solo se toman en cuenta los esfuerzos que actúan en el mismo plano de la estructura (esfuerzos verticales por cargas, peso propio, y esfuerzos laterales producidos por sismos), de modo que no se estudian los esfuerzos torsionales producidos.

Conceptos varios.

Haciendo un extracto de la norma Covenin-Mindur 2002-88, se presentan algunos conceptos importantes para la ilustración del presente trabajo.

- **ACCIONES:** Fenómenos que producen cambios en el estado de tensiones y deformaciones en los elementos de una edificación. Las acciones se clasifican en permanentes, variables, accidentales, y extraordinarias.
- **ACCIONES ACCIDENTALES:** Son acciones que en la vida útil de la edificación tienen una pequeña probabilidad de ocurrencia solo durante lapsos breves de tiempo, como las acciones debidas al sismo, al viento, etc.
- **ACCIONES PERMANENTES:** Son las que actúan continuamente sobre la edificación y cuya magnitud puede considerarse invariable en el tiempo, como las cargas debidas al peso propio de los componentes estructurales y no estructurales: pavimentos, rellenos, paredes, tabiques, frisos,

instalaciones fijas, etc. Igualmente, los empujes estáticos de líquidos y tierras que tengan un carácter permanente, las deformaciones y los desplazamientos impuestos por el efecto de pretensión, los debidos a movimientos diferenciales permanentes de los apoyos, las acciones reológicas y de temperatura permanentes, etc.

- **ACCIONES VARIABLES:** Son aquellas que actúan sobre la edificación con una magnitud variable en el tiempo y que se deben a su ocupación y uso habitual, como las cargas de personas, objetos, vehículos, ascensores, maquinarias, grúas móviles, sus efectos de impacto, así como las acciones variables de temperatura y reológicas, y los empujes de líquidos y tierras que tengan un carácter variable.
- **ACERO ESTRUCTURAL:** En las estructuras metálicas, aplícase a todo miembro o elemento que se designa así en los documentos del contrato y/o es necesario para la resistencia y la estabilidad de la estructura.
- **ANÁLISIS:** Determinación, según modelos matemáticos, de las respuestas correspondientes a las acciones previstas.
- **CARGA DE SERVICIO:** Carga que probabilísticamente se espera ocurra durante la vida útil de la edificación debida a su ocupación y uso habitual.
- **CARGA MAYORADA:** Carga de servicio multiplicada por los factores de mayoración indicados en las normas COVENIN-MINDUR correspondientes al material utilizado.
- **CEDENCIA:** Es la primera tensión aplicada a un material para la cual ocurre un incremento en las deformaciones sin un aumento de las tensiones. También se llama tensión cedente ("yielding", "yield point", "yield stress", "yield strength"). Véase resistencia cedente.
- **ENTREPISO:** Conjunto de miembros y elementos que separa un piso de otro en una edificación.

- **ESTRUCTURA:** Conjunto de miembros y elementos cuya función es resistir y transmitir las acciones al suelo a través de las fundaciones.
- **FACTORES DE MAYORACIÓN:** Factores empleados para incrementar las solicitaciones a fin de diseñar en el estado límite de agotamiento resistente.
- **HISTÉRESIS:** Durante un ciclo de descarga, recuperación incompleta de las deformaciones debido al consumo de energía. Este fenómeno físico puede observarse en un gráfico tensiones–deformaciones correspondiente a una fuerza aplicada que varía gradualmente en magnitud y sentido durante varios ciclos.
- **RESISTENCIA CEDENTE:** La tensión para la cual un material exhibe una desviación límite de la proporcionalidad entre tensiones y deformaciones, expresándose esta desviación en términos de deformaciones. Siempre que se especifica la resistencia cedente, es necesario citar el método de ensayo utilizado así como el porcentaje de desviación o la deformación total ("yield strength").
- **RESISTENCIA DE AGOTAMIENTO:** Resistencia máxima posible de una sección ("ultimate strength"). Usualmente no es la carga máxima de una estructura.

Las cargas.

Para la realización del presente trabajo especial de grado, se plantea una estructura muy flexible, que permita la correcta apreciación de las diferencias que aporta la existencia o no, de dispositivos disipadores de energía. Dicha estructura se plantea como un pórtico, sin paredes, cuyas cargas se consideran de la siguiente manera:

1) Cargas permanentes:

- **Peso propio:** El peso propio de la estructura, es el que representa el conjunto de vigas y columnas elaboradas con acero estructural ASTM A-36, cuyo peso unitario es de 7800 Kg/m^3 , cuya carga total, es calculada automáticamente por el programa ETABS.
- **Sobrecarga permanente:** Se considera una sobrecarga permanente, planteando la que genera una losa corrugada Sigaldeck 734 de 1.5" con topping de concreto de $t=10 \text{ cm}$. (ver fig. 26), el cual genera un peso de 179 kgf/m^2 , que para efectos de cálculos, se emplea 180 kgf/m^2 .
- **Sobrecarga permanente de techo:** Se plantea techo sin acceso, para el cual se emplea una carga lineal sobre la viga de 330 kgf/m

2) Cargas variables:

- **Carga variable de piso:** Se considera una carga variable de piso de 500 kgf/m^2 , valor que establece la norma Covenin-Mindur 2002-88 en su tabla 5.1 para un uso de "lugares de concentración pública" para "áreas públicas" (Ver fig. 25).
- **Carga variable de techo:** Se considera una carga variable de techo de 100 kgf/m^2 , que corresponde a la que sugiere la norma para techos sin acceso.

Las cargas planteadas en unidad de área, se descomponen hallando la que corresponde a la carga tributaria, suponiendo que cada nivel poseería un área de 36 m^2 , arrojando así las cargas lineales que se aplican directamente sobre la viga. Para los efectos del objeto de estudio (variación de las derivas con respecto a la variación de rigideces y coeficientes de dispositivos), las flechas generadas por los esfuerzos a los sistemas resistentes a fuerzas verticales (vigas y losas), no inciden de manera alguna en los mencionados estudios). De tal manera que las cargas lineales tributarias a aplicar sobre las vigas son:

- Sobrecarga permanente de piso: 510 kgf/m
- Carga variable de piso: 750 kgf/m
- Sobrecarga permanente de techo: 330 kgf/m
- Carga variable de techo: 150 kgf/m

COVENIN-MINDUR 2002 - 88

33

TABLA 5.1 MÍNIMAS CARGAS DISTRIBUIDAS VARIABLES SOBRE ENTREPISOS kgf/m²

USOS DE LA EDIFICACION	AMBIENTES														TECHOS
	A. AREAS PUBLICAS pasillos corredores, vestíbulo, sala de estar	B. AREAS PRIVADAS oficinas, salas, quiniolas, cocinas, lavaderos, servicios y mantenimiento (1)	C. AREAS CON ASIENTOS FIJOS	D. AREAS CON ASIENTOS MOVILES, SALONES DE FIESTA	E. AZOTEAS O TERRAZAS (2) y (3)	F. BALCONES con L > 120 (3) y (4)	G. BIBLIOTECAS, ARCHIVOS Y SIMILARES	H. ESCALERAS Y ESCALERAS DE ESCAPE (3)	I. ESCENARIOS PLATAFORMAS Y ZONAS DE EXPOSICIONES	J. ESTACIONAMIENTOS	K. HABITACIONES, PASILLO INTERNO, CAMERINOS, VESTIARIOS, ESTUDIOS DE RADIO Y TV, CELDAS	L. AREAS CON CARGAS LIVIANAS DE MAQUINAS	M. AREAS CON CARGAS MEDIANAS DE MAQUINAS	N. DEPOSITOS EN GENERAL	
1. VIVIENDAS UNIFAMILIARES Y MULTIFAMILIARES	300			500	100	300		300		(6)	175				40 kgf/m ² (10) Techos con pendiente -1.5% : 100 kgf/m ² 1.5% : 50 kgf/m ²
HOTELES, MOTEL, CLUBES	300	300	400	500	100	300	(5)	500	500	(6)	175	600	1200	(8y9)	
2. EDIFICACIONES EDUCACIONALES	400	300	400	500	100	300	(5)	500	500	(6)	175	600		(8)	
ESCUELAS, LICEOS, UNIVERSIDADES, INSTITUTOS TECNICOS Y SIMILARES															
3. LUGARES DE CONCENTRACION PUBLICA	500	300	400	500	100	300	(5)	500	750	(6)	175	600		(8y9)	
TEATROS, CINES, RESTAURANTES, LUGARES DE CULTO, MUSEOS, BIBLIOTECAS, ESTUDIOS, TRIBUNAS, GIMNASIO, ETC.															
4. EDIFICACIONES INSTITUCIONALES	300	250	400	500	100	300	(5)	500	500	(6)	175	600	1200	(8y9)	
MEDICO ASISTENCIALES, CUARTELES, CARCELES, CONVENTOS Y MONASTERIOS, MINISTERIOS															
5. EDIFICACIONES COMERCIALES	300	250	400	500	100	300	(5)	500	500	(6)	175	600		(8y9)	
ALMACENES COMERCIALES, TIENDAS, SUPERMERCADOS, LOCALES, OFICINAS Y BANCOS															
6. EDIFICACIONES PARA TRANSPORTE Y DEPOSITOS	500	300	400	500	100	300	(5)	500		(6)	175	600		(8y9)	
ESTACIONAMIENTOS, DEPOSITOS DE MERCANCIA LIVIANA, FRIGORIFICOS, MORGUE															
7. EDIFICACIONES INDUSTRIALES	500	300	400	500	100	300	(5)	500	750	(6)	175	600	1200	(8)	
TALLERES, IMPRENTAS, ESTUDIOS DE RADIO, CINE Y TV															
8. CONSTRUCCIONES VARIAS	500	300	400	500	100	300	(5)	500		(6)	175	600		(8)	
HELIPUERTOS (11), PUENTES PEATONALES, TERMINALES DE PASAJEROS															

Fig. 25. Cargas variables. Fuente: Norma COVENIN-MINDUR 2002-88

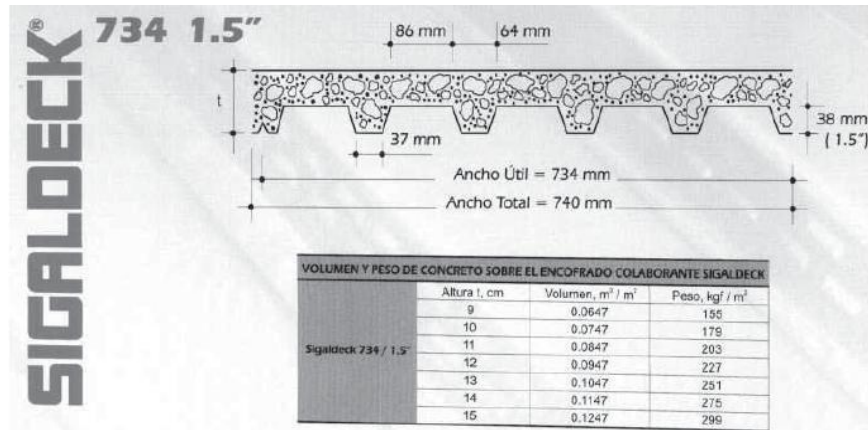


Fig. 26. Losa corrugada. Fuente: Catálogo Sigaldeck.

Dichas cargas se aplican al modelo (ver fig. 27), de forma lineal sobre las vigas modeladas, según se ve en la siguiente lista resumen:

- Sobrecarga permanente de piso (Scp) = 510 kgf/m
- Carga variable de piso (Cvp) = 750 kgf/m
- Sobrecarga permanente de techo (Scpt) = 330 kgf/m
- Carga variable de techo (Cvt) = 150 kgf/m

Fig. 27. Cargas distribuidas.

Combinaciones de cargas:

Las combinaciones de cargas que se establecieron para el ensayo de las estructuras fueron las siguientes:

- $U1 = 1.4 * (Cp + Scp + Scpt)$
- $U2 = 1.2 * (Cp + Scpt) + 1.6 * (Cvp) + 0.5 * (Cvt)$
- $U3 = 1.2 * (Cp + Scp + Scpt + Cvt) + 0.5 * (Cvp) + S^{(*)}$
- $U4 = 1.2 * (Cvt + Scp + Cp + Scp + Scpt) + S^{(*)}$
- $U5 = 0.9 * (Cp + Cvt + Scp + Scpt) + S^{(*)}$
- Envolvente= Función que agrupa las combinaciones U3, U4 y U5 para establecer la más desfavorable.

(*): La componente sísmica, que en la Norma 1753-2006 apartado 9.3 se establece tomar la incidencia positiva y negativa, en el caso del trabajo con acelerogramas (función respuesta contra tiempo) se configura como función positiva, ya que al tomar las dos componentes (positiva y negativa) se contrarrestan dichas respuestas.

Las componentes sísmicas se plantean con tres acelerogramas, arrojando tres modalidades de cada combinación (U3, U4 y U5), según se explica en el siguiente apartado.

Los sismos.

Una vez cargada la estructura, se deben modelar los efectos que produce un sismo en la misma. Las componentes sísmicas se introducen en las combinaciones del programa mediante un acelerograma.

Un acelerograma es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un terremoto.

Los valores de la aceleración se obtienen mediante unos instrumentos llamados acelerógrafos, que registran la aceleración del suelo según tres direcciones perpendiculares; dos horizontales y una vertical. Debido a que la variación de la aceleración es muy irregular en el tiempo, es necesario que la toma de datos se realice en intervalos muy pequeños de tiempo, utilizándose generalmente valores de 0.01 o 0.02 s.

Los acelerogramas se caracterizan por ser altamente irregulares y oscilatorios, con pequeñas amplitudes iniciales que crecen rápidamente hasta alcanzar los valores máximos y decrecer igualmente rápido hasta que se detiene el movimiento.

En la figura 28 se muestran tres ejemplos de acelerogramas obtenidos en tres sitios diferentes durante un mismo terremoto. Como se aprecia a simple vista, las diferencias entre ellos son notables, lo que pone de manifiesto la importancia que tiene en la configuración del acelerograma, el punto de medición de las aceleraciones, y por tanto, el tipo de terreno existente entre el epicentro y el punto de observación.

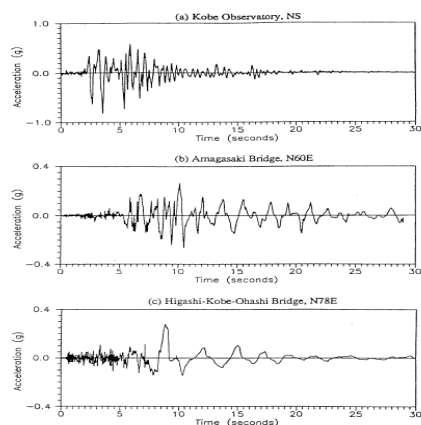


Fig. 28. Ejemplos de acelerogramas.
Fuente: seismic06g.files.wordpress.com

Para el presente trabajo, se emplearan tres acelerogramas medidos durante el sismo Northridge.

El 17 de enero de 1994, a las 4:31 a.m., un sismo de magnitud de 6.7 azotó el valle de San Fernando en la región de Los Ángeles, dejando un saldo de más de 60 fallecidos, 9000 lesionados, y causando diversos daños. Autopistas destruidas, explosiones de gas, complejos de apartamentos colapsados, y la mayor parte de la ciudad sin energía eléctrica. Miles de edificios fueron destruidos, y otros tantos declarados inhabitables y demolidos posteriormente (ver fig. 29).



Fig. 29. Efectos terremoto de Northridge, enero 1994.
Fuente: www.theatlantic.com

Los acelerogramas a emplear en el presente trabajo, se tomaron en la zona de Los Ángeles, al momento de ocurrir el terremoto.

El acelerograma Sylmar, que presenta las siguientes especificaciones:

- Enero 17, 1994 04:31 am.
- Estación No 24514 (34.326N, 118.444W). Estacionamiento del hospital del condado de Sylmar.
- Hipocentro 34.215N, 118.538W.
- Longitud de la medición: 59.980 s.
- 3000 puntos de aceleración registrados, espaciados en intervalos de 0.20 s.
- Mayor aceleración: 5.926 m/seg² en el instante 4.080 s.
- Mayor velocidad: -0.76 m/s en el instante 6.480 s.
- Mayor desplazamiento: -15.217 cm en el instante 6.760 s.
- Velocidad inicial: -0.02103 m/s.
- Desplazamiento inicial: -0.466 cm.

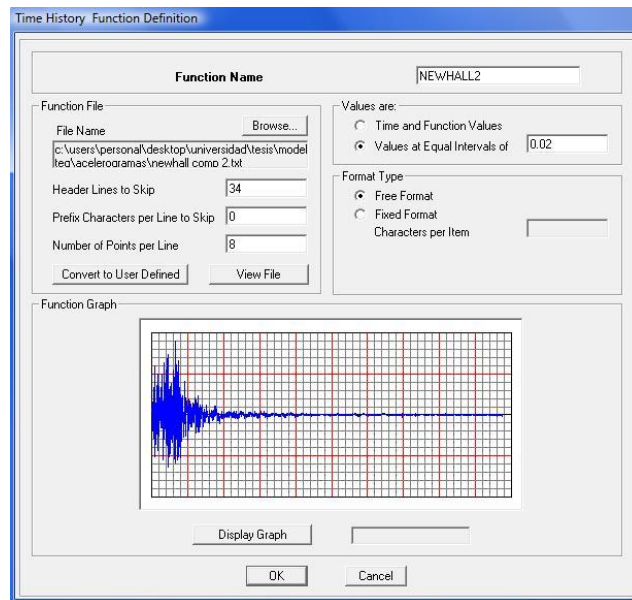
El acelerograma Santa Mónica:

- Enero 17, 1994 04:31 am.
- Estación No 24538 (34.011N, 118.490W). Ayuntamiento ciudad de Santa Mónica.
- Hipocentro 34.215N, 118.538W.
- Longitud de la medición: 59.980 s.
- 3000 puntos de aceleración registrados, espaciados en intervalos de 0.20 s.
- Mayor aceleración: -2.270 m/seg² en el instante 9.820 s.
- Mayor velocidad: 0.14 m/s en el instante 6.480 s.
- Mayor desplazamiento: 3.782 cm en el instante 9.840 s.
- Velocidad inicial: -0.00343 m/s.
- Desplazamiento inicial: -0.343 cm.

El acelerograma Newhall:

- Enero 17, 1994 04:31 am.
- Estación No 24279 (34.387N, 118.530W). Estación de bomberos Newhall.
- Hipocentro 34.215N, 118.538W.
- Longitud de la medición: 59.980 s.
- 3000 puntos de aceleración registrados, espaciados en intervalos de 0.20 s.
- Mayor aceleración: -5.716 m/seg^2 en el instante 5.340 s.
- Mayor velocidad: -0.748 m/s en el instante 5.380 s.
- Mayor desplazamiento: 17.595 cm en el instante 7.780 s.
- Velocidad inicial: -0.00235 m/s .
- Desplazamiento inicial: -0.735 cm .

La fig. 30 ilustra la configuración de las componentes más severas de cada acelerograma, empleadas en el ensayo.



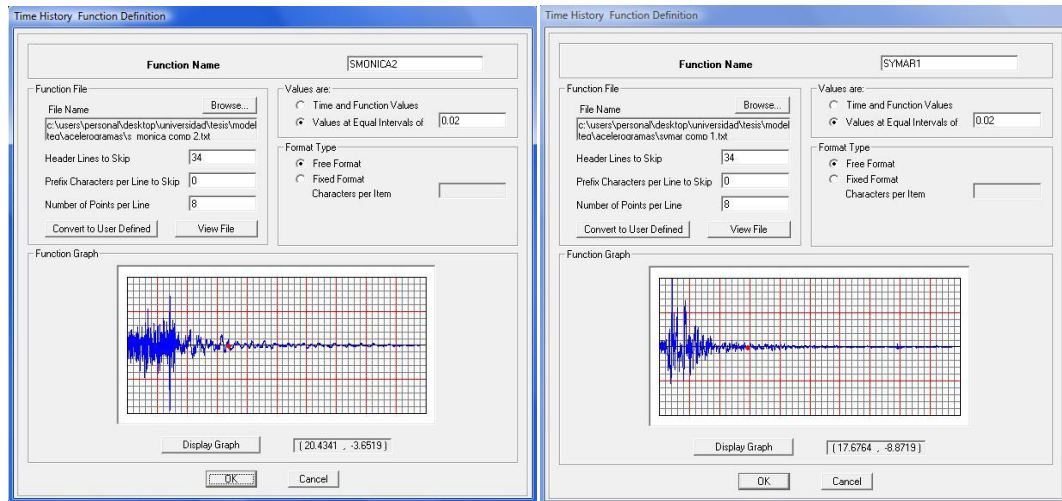


Fig. 30. Componentes acelerogramas empleados.

Los modelos.

Una vez definidos todos los parámetros (geometría, secciones, cargas, combinaciones y sismos), se procede a analizar las familias de estructuras en cuatro etapas consecutivas.

Primera etapa.

La primera etapa consiste en hacer el análisis con el software ETABS de la estructura de tres niveles, para lo cual se realizan veinticuatro análisis variando los parámetros coeficiente de amortiguación y rigidez de la estructura de la siguiente manera:

Calibre.	Variación Dispositivos			
110 x 3 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
120 x 4 mm	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
155 x 4.5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
175 x 5.5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
200 X 5.5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
200 X 7 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m

Tabla No.2. Variación dispositivos y rigideces. Pórtico de tres niveles.

De cada uno de los análisis anteriores, se extrae la deriva máxima generada, valor que se pretende analizar, ya que a medida que se ve reducida la deriva, directamente se ven reducidos los esfuerzos en los nodos de la estructura, disminución que reduce la tendencia al daño/colapso de la estructura.

Según la norma 1756-2001 “Edificaciones sismorresistentes”, el concepto de deriva:

“Deriva. Diferencia de los desplazamientos laterales totales entre dos niveles o pisos consecutivos.”

El software ETABS realiza, en virtud de que la altura de la edificación lo admite (menos de diez niveles o 30 metros), un análisis lineal de la estructura, siendo los dispositivos disipadores, los únicos elementos de la misma que son sometidos a análisis no lineal.

Los parámetros no lineales que requieren los análisis de los elementos disipadores son los siguientes:

- Rigidez soporte: 141320.5 KN/m
- Coeficiente amortiguación: variable (según tabla No. 2)

- Exponente no lineal: 0.5. (Nota: De acuerdo a la norma 1756-2001, este valor se encuentra entre 0.4 y 0.6, por lo que se emplea el valor medio)

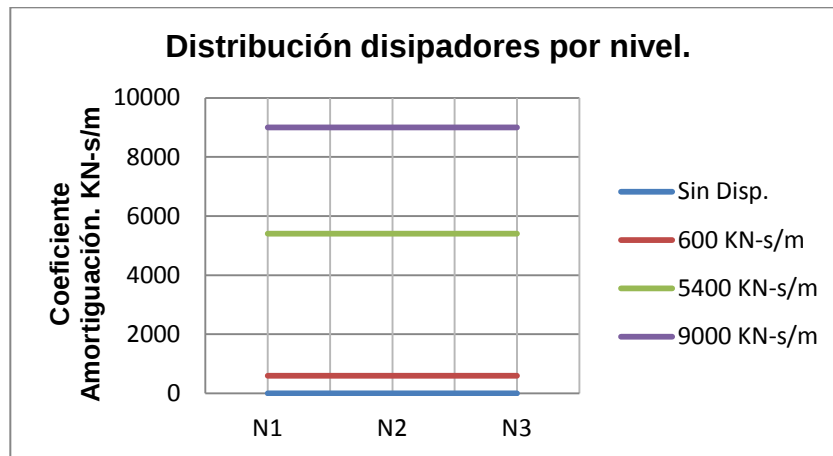


Fig. 31. Distribución disipadores por nivel. Estructura tres niveles.

Segunda etapa.

Para la segunda etapa de análisis, se plantea el mismo procedimiento anterior, aumentando el rango de rigideces (calibres) con los cuales se modelara la familia de estructuras, y aumentando los niveles a seis (18.00 m de altura total).

La variación de rigidez se muestra a continuación.

Calibres.	Variación Dispositivos			
120 x 4 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
135 x 4.3 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
175 x 5.5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
200 X 5.5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
200 X 7 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
220 x 9 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m

Tabla No.3. Variación dispositivos y rigideces. Pórtico de seis niveles.

De manera análoga se emplean los siguientes coeficientes:

- Rigidez soporte: 141320.5 KN/m
- Coeficiente amortiguación: variable (según tabla No. 2)
- Exponente no lineal: 0.5. (Nota: De acuerdo a la norma 1756-2001, este valor se encuentra entre 0.4 y 0.6, por lo que se emplea el valor medio).

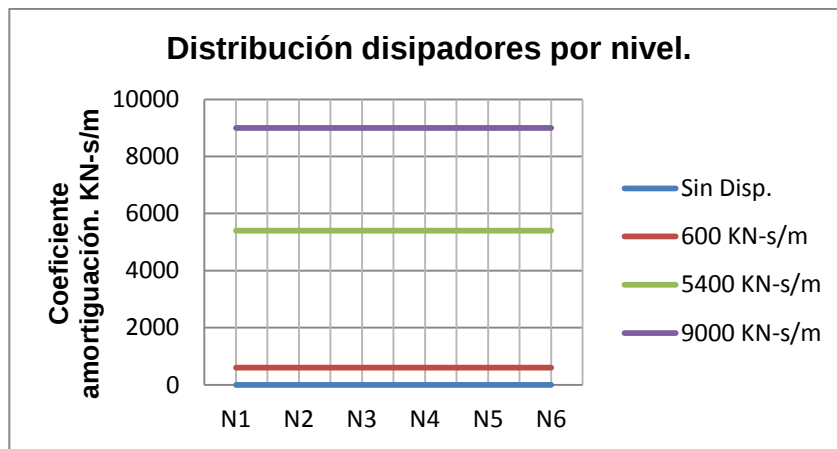


Fig. 32. Distribución disipadores por nivel. Estructura seis niveles.

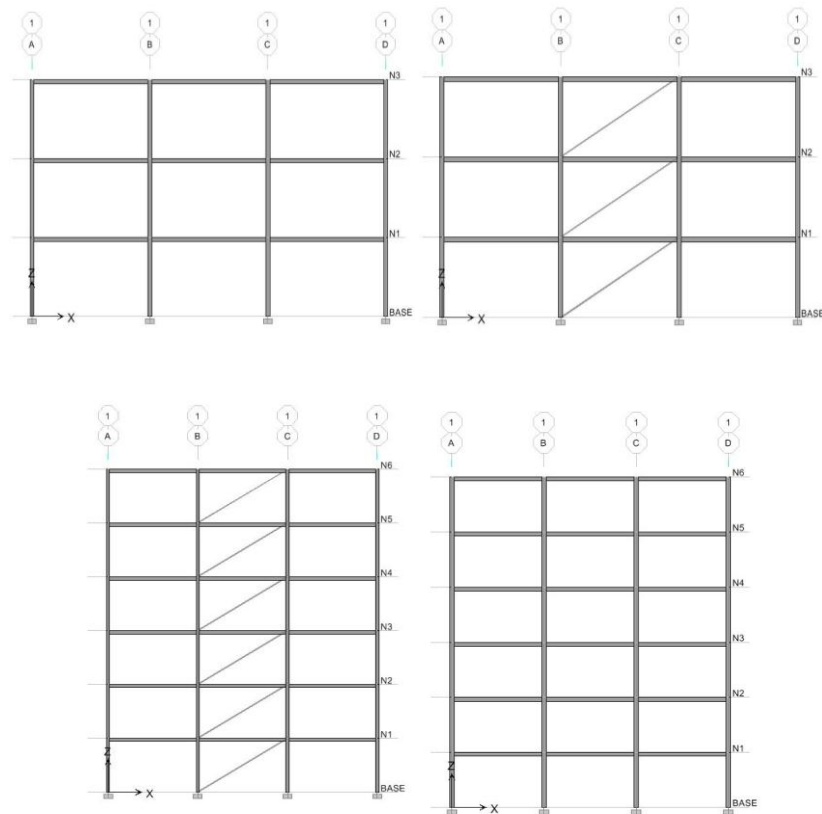
Tercera etapa.

La tercera etapa es la que corresponde a las estructuras de nueve niveles (27.00 m de altura). Se incrementan nuevamente los rangos de rigidez de columna, y se mantienen los demás rangos de variación (ver tabla 3).

Calibres.	Variación Dispositivos			
175 x 5.5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
200 x 5 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
200 X 7 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
220 x 9 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
260 x 9 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m
260 x 11 mm.	S/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m

Tabla No. 4. Variación dispositivos y rigideces. Pórtico de nueve niveles.

La figura 33, ilustra la disposición en las que se modelaron los pórticos en el software ETABS, para las tres primeras etapas del estudio.



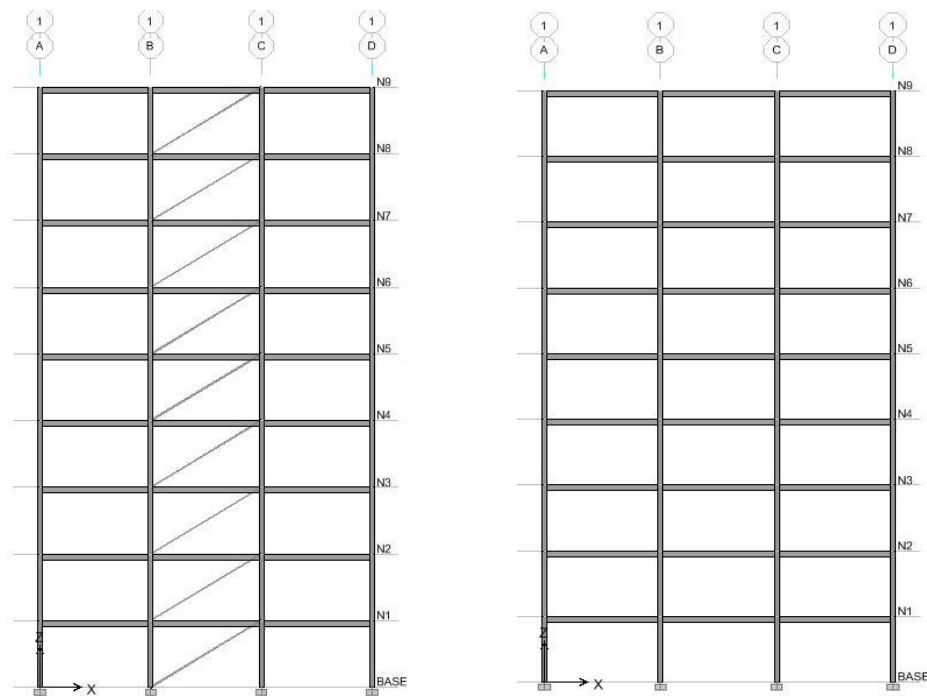


Fig. 33. Disposiciones pórticos y disipadores de primera, segunda y tercera etapa.

Cuarta etapa.

Una vez realizadas las tres familias de análisis, se procede a realizar una nueva modalidad de ensayos, variando la posición y los coeficientes de amortiguación de cada familia de estructuras (tres, seis y nueve niveles).

Estructuras de tres niveles. Debido a lo limitado de la geometría de la estructura, para la familia de pórticos de tres niveles se varía la posición de los disipadores, manteniéndose el coeficiente de amortiguación y variándose la rigidez de sus columnas. Se plantea la disposición “diagonal” para la estructura de tres niveles, con dispositivos de 600 KN-s/m (ver fig. 34).

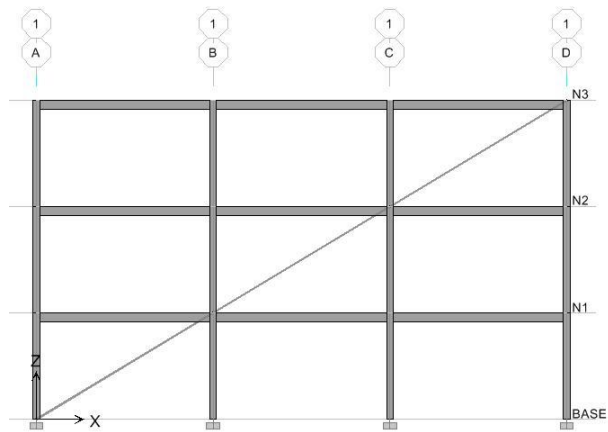


Fig. 34 Pórtico de tres niveles con variación de posición de disipadores.

Estructuras de seis y nueve niveles.

Para los pórticos de seis y nueve niveles se varía el coeficiente de amortiguación en función de la ubicación en la altura. Se establecieron cinco variantes de amortiguación, las cuales se explican a continuación.

- Variación ascendente. Se aumentan los valores de coeficiente de amortiguación de forma lineal, a medida que aumenta la altura. Se ensaya la familia de pórticos con las rigideces asignadas al estudio de la segunda y tercera etapa respectivamente (ver fig. 35).

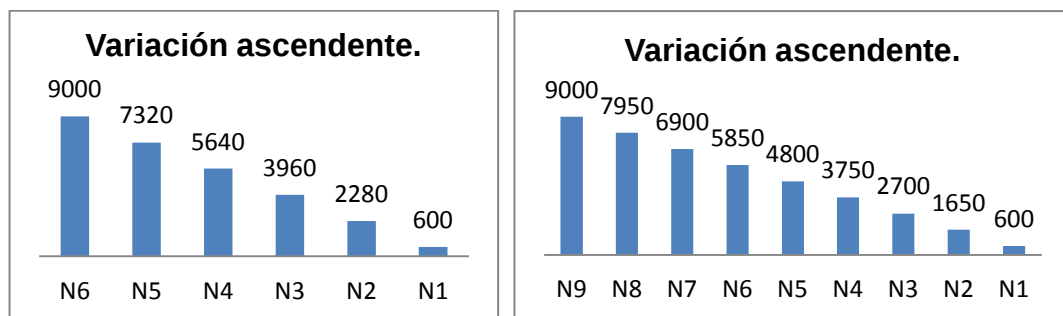


Fig. 35. Variación ascendente. Unidades KN-s/m.

- Variación descendente. De forma opuesta al caso anterior, los valores de coeficiente de amortiguación se disminuyen linealmente a medida que aumenta la altura del pórtico. Se ensaya la familia de pórticos con las rigideces asignadas al estudio de la segunda y tercera etapa respectivamente (ver fig. 36).

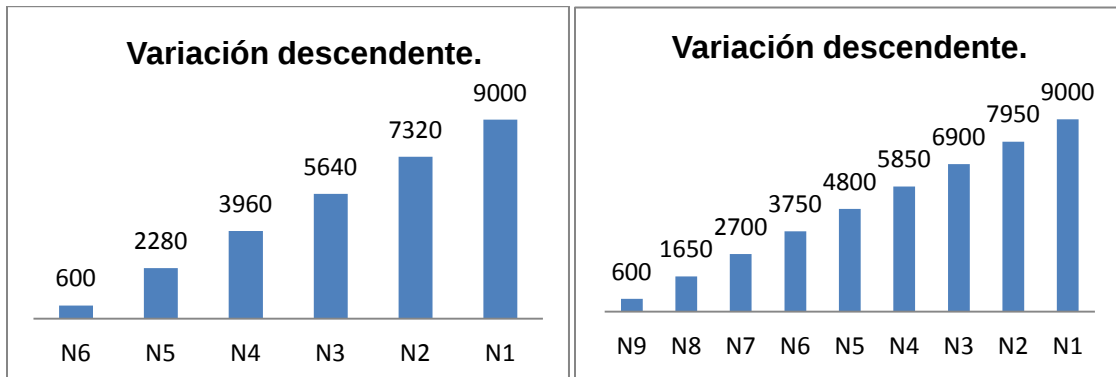


Fig. 36. Variación descendente. Unidades KN-s/m.

- Distribución simétrica 1. Se fija el coeficiente de amortiguación de 9000 KN-s/m en la zona central de la estructura, y se va reduciendo linealmente hacia los extremos, hasta alcanzar el valor de 600 KN-s/m en el primer y último nivel de los pórticos. Se ensaya la familia de pórticos con las rigideces asignadas al estudio de la segunda y tercera etapa respectivamente (ver fig. 37).

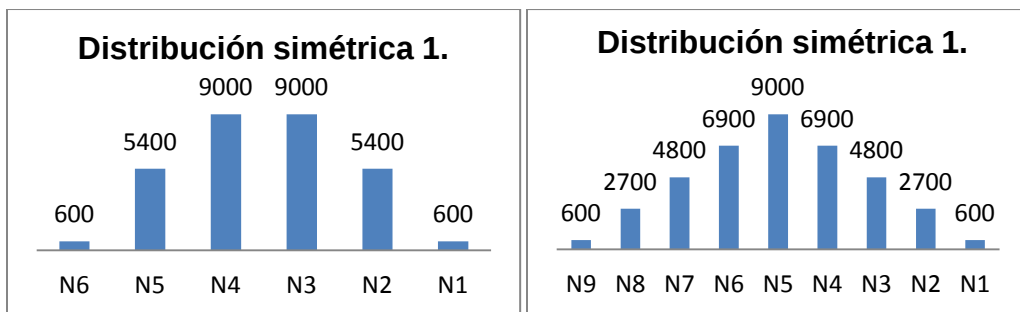


Fig. 37. Distribución simétrica 1. Unidades KN-s/m.

- Distribución simétrica 2. Se fija el coeficiente de amortiguación de 600 KN-s/m en la zona central de la estructura, y se va aumentando linealmente hacia los extremos, hasta alcanzar el valor de 9000 KN-s/m en el primer y último nivel de los pórticos. Se ensaya la familia de pórticos con las rigideces asignadas al estudio de la segunda y tercera etapa respectivamente (ver fig. 38).

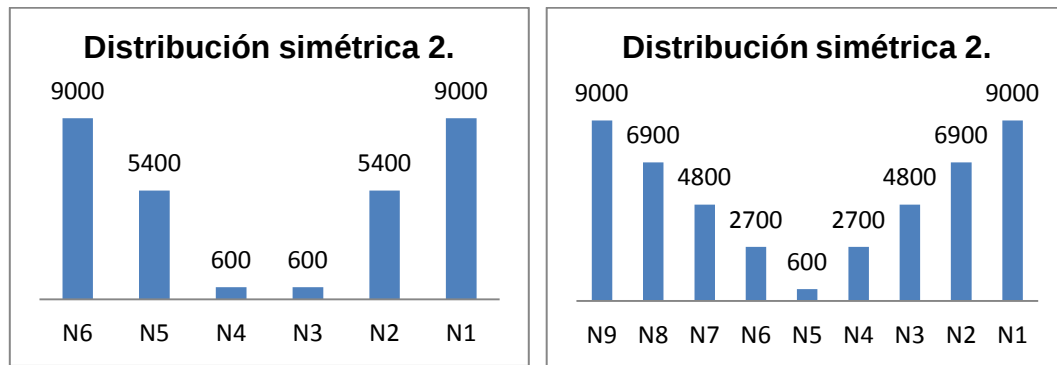


Fig. 38. Distribución simétrica 2. Unidades KN-s/m.

- Distribución alterna. Se alternan los dispositivos de 600 y 9000 KN-s/m a lo largo de la altura del pórtico, en niveles consecutivos. Se ensaya la familia de pórticos con las rigideces asignadas al estudio de la segunda y tercera etapa respectivamente (ver fig. 39).

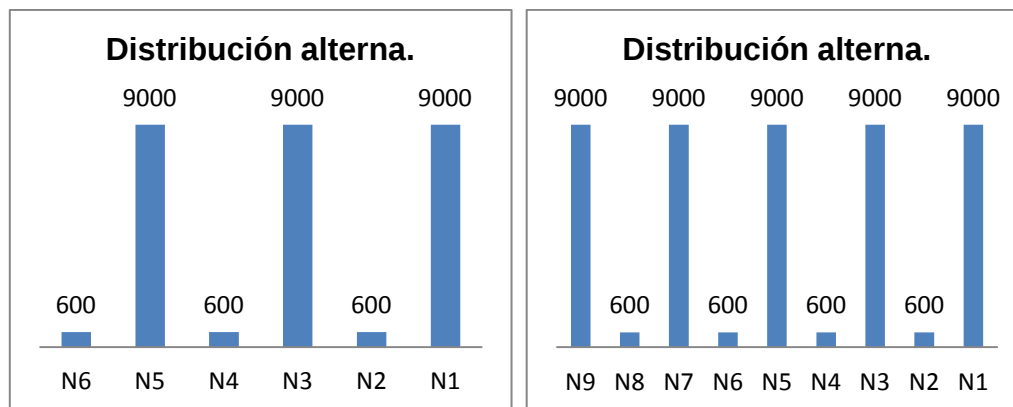


Fig. 39. Distribución simétrica 2. Unidades KN-s/m.

- Pórtico 6 x 6. Se evaluará una familia de pórticos de 6 niveles y 6 luces, de la misma magnitud de las anteriores (altura entrepiso de 3 metros y luz entre ejes de 5 metros), manteniendo los parámetros rigidez de pórtico (220 x 220 x 9 mm.) y coeficientes de amortiguación (600 KN-s/m.), variando las posiciones de los dispositivos según se aprecia en la figura 40 y comparando la magnitud de las derivas con las que sufre un pórtico regular (sin dispositivos) de las mismas dimensiones.

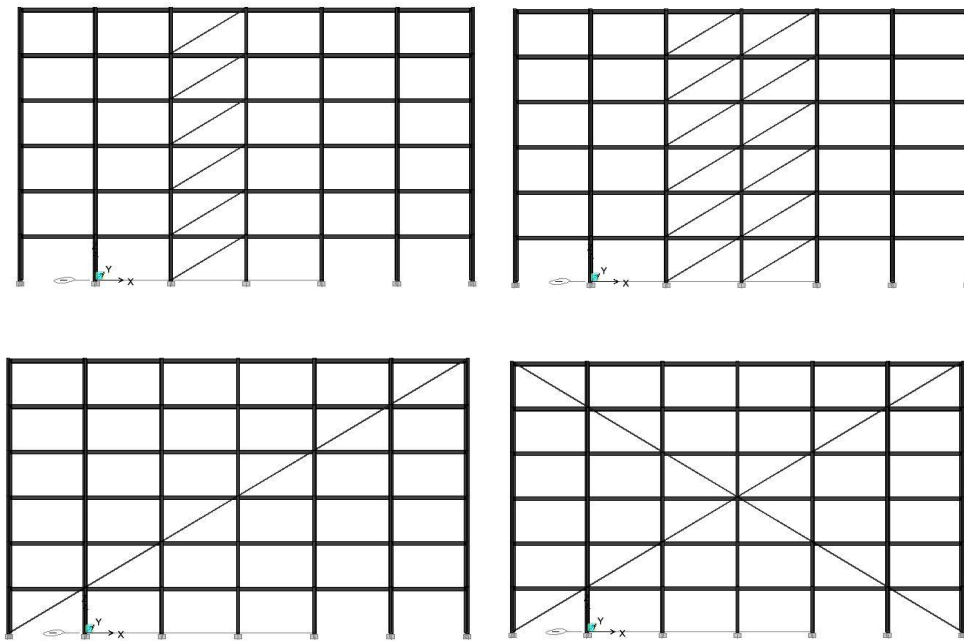


Fig. 40. Pórticos 6 x 6. Paralelo simple, paralelo doble, diagonal simple, diagonal doble.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Los resultados se muestran bajo tres parámetros que ilustran los desempeños de los disipadores de energía.

- Deriva. Desplazamiento entre dos pisos consecutivos, cuyo valor máximo normativo (Fondonorma 1756-2001 “Edificaciones Sismorresistentes”) para la altura de los pórticos utilizada, es de 3.6 cm.

$$\partial = \Delta i - \Delta(i - 1)$$

- Porcentaje de reducción de deriva. Análisis comparativo entre el valor de la deriva máxima que sufre el pórtico regular y el pórtico de cada configuración de amortiguación, bajo los efectos y la simulación del sismo descrito. Describe el porcentaje de reducción de cada dispositivo ante la deriva del pórtico regular.

$$\%R = \frac{(\partial \text{ port. reg.} - \partial \text{ port. disp.})}{\partial \text{ port. reg.}} * 100$$

- Rendimiento del dispositivo. Valor que resulta de dividir el valor de la deriva del pórtico regular entre la deriva de cada ensayo de pórticos con dispositivos. Este valor refleja el factor de reducción de derivas que genera cada estructura con dispositivos en relación con la estructura regular.

$$Rend. = \frac{\partial \text{ port. reg.}}{\partial \text{ port. disp.}}$$

Primera etapa. Pórticos de tres niveles.

3 Niveles sin dispositivos	
Calibres (mm.)	Deriva máx. (cm.)
110	9.8904
120	8.3735
155	3.7751
175	2.6178
200X5.5	3.9595
200X7	3.7994

3 Niveles con disp. 600KN-s/m	
Calibres (mm.)	Deriva máx. (cm.)
110	0.2966
120	0.3118
155	0.1671
175	0.1129
200X5.5	0.1125
200X7	0.1133

3 Niveles con disp. 5400KN-s/m	
Calibres (mm.)	Deriva máx. (cm.)
110	0.1425
120	0.1224
155	0.1024
175	0.097
200X5.5	0.0947
200X7	0.0945

3 Niveles con disp. 9000KN-s/m	
Calibres (mm.)	Deriva máx. (cm.)
110	0.1231
120	0.1041
155	0.0873
175	0.0813
200X5.5	0.0805
200X7	0.0817

Tabla No. 5. Derivas máximas en cm. Primera etapa.

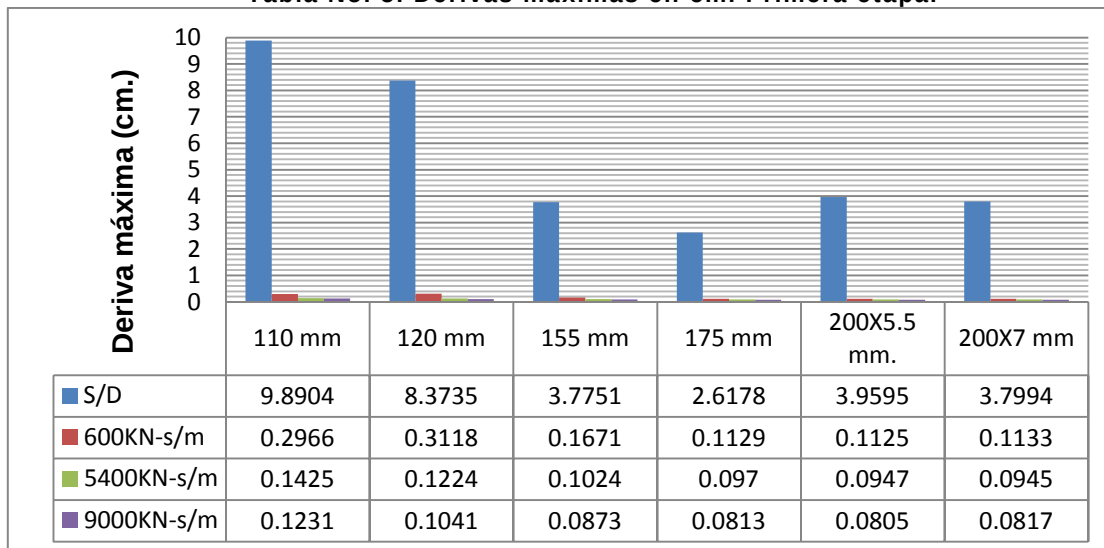


Fig. 41. Deriva vs. rigidez. Estructuras de tres niveles.

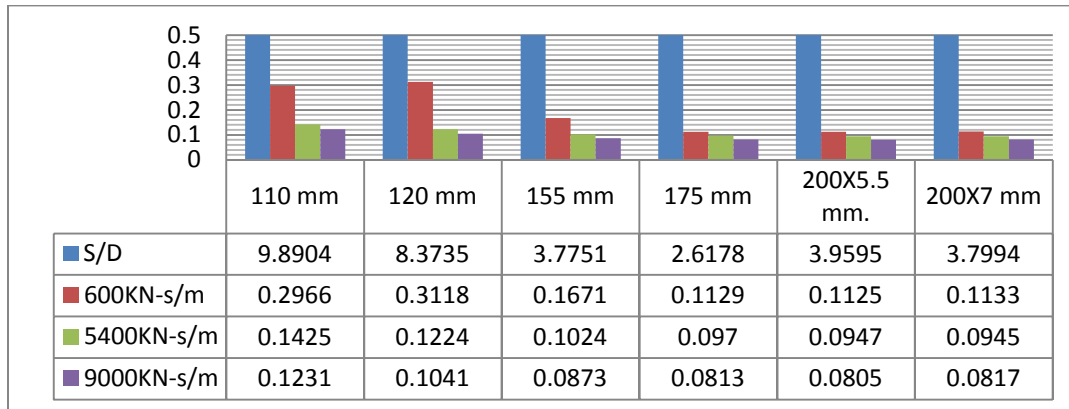


Fig. 41. Deriva vs. rigidez (detalle). Estructuras de tres niveles.

% Reducción de derivas.				
Calibres	S/D	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m
110 mm	0	97.00	98.56	98.76
120 mm	0	96.28	98.54	98.76
155 mm	0	95.57	97.29	97.69
175 mm	0	95.69	96.29	96.89
200X5.5 mm.	0	97.16	97.61	97.97
200X7 mm	0	97.02	97.51	97.85

Tabla No. 6. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura tres niveles. Primera etapa.

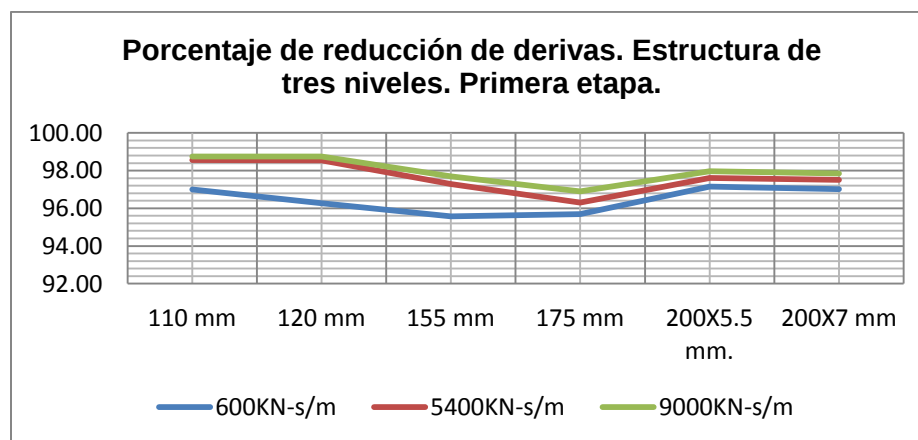


Fig. 42. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura de tres niveles. Primera etapa.

Rendimiento dispositivos.				
Calibres	S/D	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m
110 mm	1	33.34	69.40	80.34
120 mm	1	26.85	68.41	80.43
155 mm	1	22.59	36.86	43.24
175 mm	1	23.18	26.98	32.19
200X5.5 mm.	1	35.19	41.81	49.18
200X7 mm	1	33.53	40.20	46.50

Tabla No. 7. Rendimiento dispositivos. Estructura de tres niveles. Primera etapa.

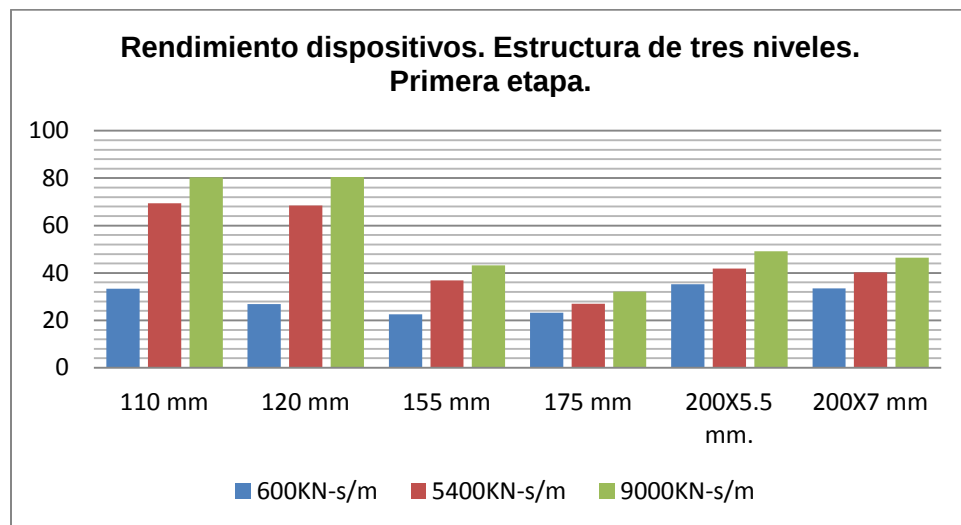


Fig. 43. Rendimiento dispositivos. Estructura de tres niveles. Primera etapa.

Análisis de resultados. Primera etapa.

Los resultados obtenidos en los análisis de los pórticos de tres niveles, arrojan varias tendencias notables.

El valor de la deriva máxima, va disminuyendo a medida de que aumentan las rigideces. No obstante, cuando se acerca a los mayores calibres, hay un leve aumento, lo que se adjudica al incremento en el peso propio de la estructura, aumentando su inercia en mayor proporción que lo que representa la propia rigidez.

En consecuencia de lo anterior, ocurre el fenómeno que se aprecia en el rendimiento de los dispositivos, en el cual dicho coeficiente tiende a disminuir con el aumento de la rigidez.

La reducción de las derivas producidas por los dispositivos en los pórticos se ubica entre 95 y 98%, lo que confirma la información de la gran efectividad de la disposición Taylor para dispositivos disipadores en edificaciones de baja altura.

El rendimiento de los dispositivos es mayor para estructuras flexibles en los pórticos de tres niveles.

Segunda etapa. Pórticos de seis niveles.

6 Niveles sin dispositivos	
Calibre	Deriva máx. (cm.)
120 mm.	19.1582
135 mm.	13.8702
175 mm.	10.8895
200X5.5 mm.	10.7312
200X7 mm.	9.0830
220X9 mm.	8.1494

6 Niveles con disp. 600KN-s/m	
Calibre	Deriva máx. (cm.)
120 mm.	2.5890
135 mm.	2.0157
175 mm.	1.1000
200X5.5 mm.	1.3476
200X7 mm.	0.9329
220X9 mm.	0.8517

6 Niveles con disp. 5400KN-s/m	
Calibre	Deriva máx. (cm.)
120 mm.	1.1265
135 mm.	0.9849
175 mm.	0.662
200X5.5 mm.	0.5998
200X7 mm.	0.5296
220X9 mm.	0.4648

6 Niveles con disp. 9000KN-s/m	
Calibre	Deriva máx. (cm.)
120 mm.	0.8493
135 mm.	0.8796
175 mm.	0.5383
200X5.5 mm.	0.4878
200X7 mm.	0.4319
220X9 mm.	0.3798

Tabla No. 8. Derivas máximas en cm. Segunda etapa.

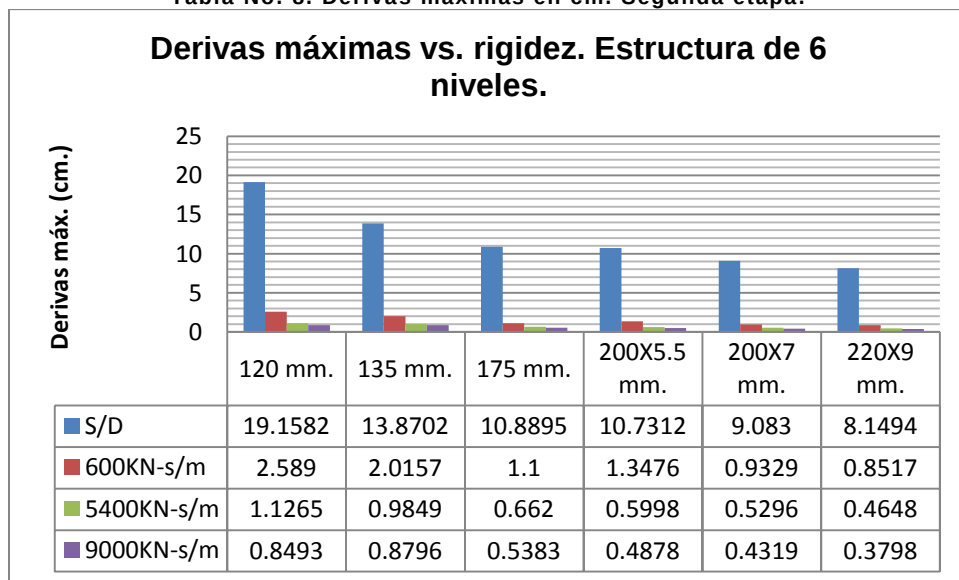


Fig. 44. Derivas máximas vs. rigidez. Estructuras de seis niveles.

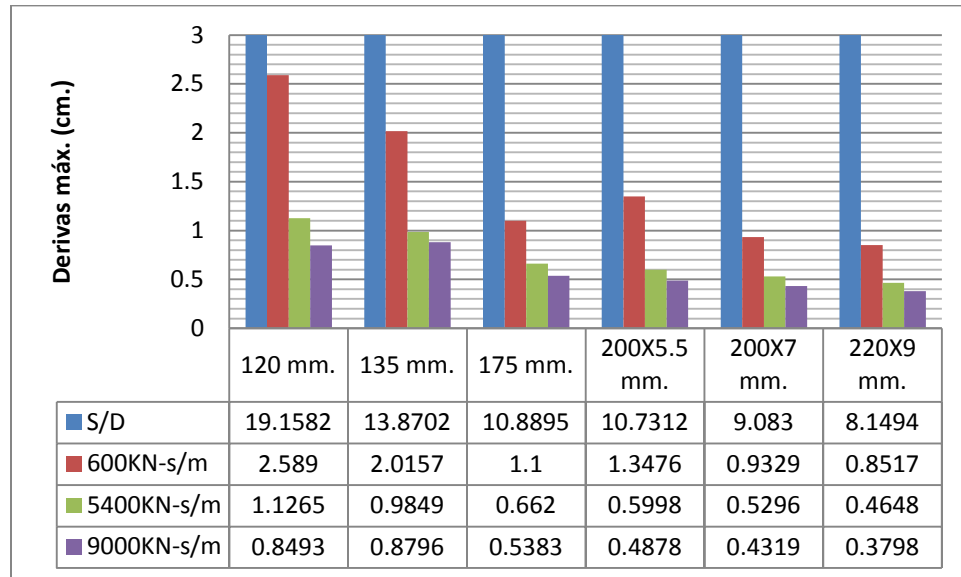


Fig. 44. Derivas máximas vs. rigidez (detalle). Estructuras de seis niveles.

% Reducción de derivas.				
Calibre	S/D	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m
120 mm.	0	86.49	94.12	95.57
135 mm.	0	85.47	92.90	93.66
175 mm.	0	89.90	93.92	95.06
200X5.5 mm.	0	87.44	94.41	95.45
200X7 mm.	0	89.73	94.17	95.24
220X9 mm.	0	89.55	94.30	95.34

Tabla No. 9. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura seis niveles. Segunda etapa.

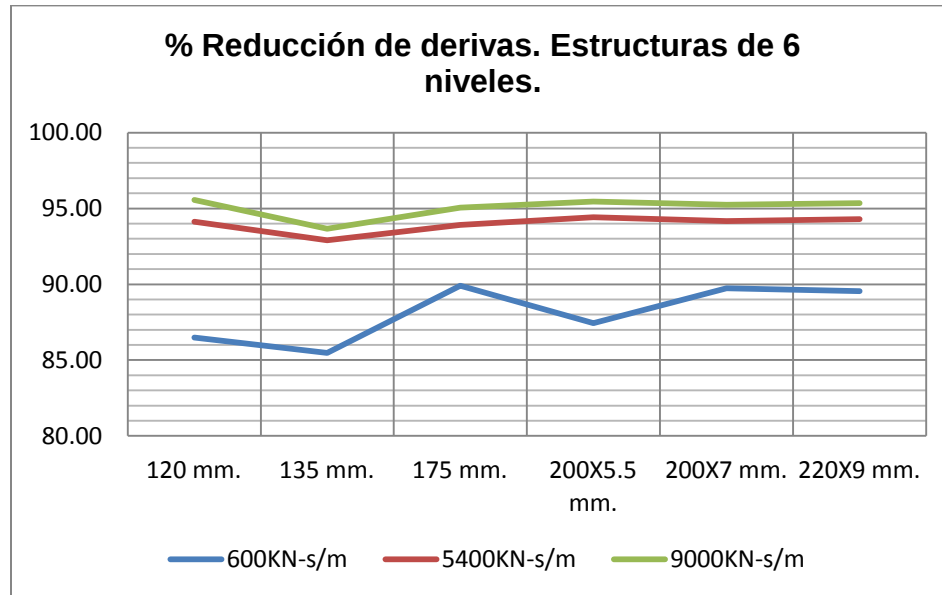


Fig. 45. Porcentaje de reducción de derivas. Estructuras de seis niveles.

Calibre	Rendimiento dispositivos.			
	S/D	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m
120 mm.	1	7.400	17.007	22.558
135 mm.	1	6.881	14.083	15.769
175 mm.	1	9.900	16.449	20.229
200X5.5 mm.	1	7.963	17.891	21.999
200X7 mm.	1	9.736	17.151	21.030
220X9 mm.	1	9.568	17.533	21.457

Tabla No. 10. Rendimiento de dispositivos. Estructura seis niveles. Segunda etapa.

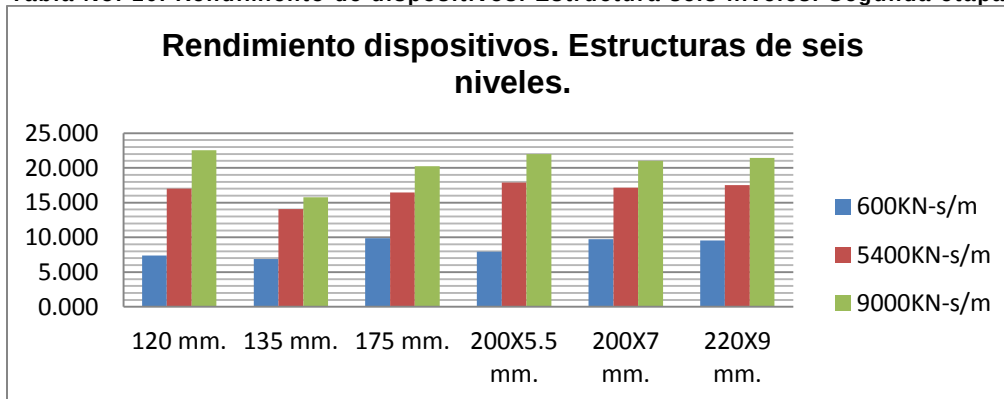


Fig. 46. Rendimiento de dispositivos. Estructuras de seis niveles.

Análisis de resultados. Segunda etapa.

Las derivas del pórtico sin disipadores arrojan un valor superior al obtenido en la primera etapa, con magnitudes entre 19 y 8 centímetros. El rendimiento de los disipadores disminuye aproximadamente dos tercios, en comparación con la estructura de tres niveles.

El valor de las derivas máximas para los pórticos sin disipadores se mantiene en una tendencia uniforme con el incremento de la rigidez de la estructura. Al aplicarse los disipadores, se presenta una tendencia de disminución de derivas cuando aumentan las rigideces y los coeficientes de amortiguación.

El porcentaje de reducción de derivas aumenta con el incremento de la rigidez de la estructura.

Tercera etapa. Pórticos de nueve niveles.

9 Niveles sin dispositivos.		9 Niveles con 600KN-s/m	
Calibre	Deriva cm.	Calibre	Deriva cm.
175 mm.	4.9725	175	3.7987
200X5.5 mm.	5.497	200X5.5	1.8328
200X7 mm.	4.5567	200X7	1.9115
220X9 mm.	4.1199	220X9	1.9511
260X9 mm.	4.9895	260X9	1.8739
260X11 mm.	4.0663	260X11	1.8829

9 Niveles con 5400KN-s/m		9 Niveles con 9000KN-s/m	
Calibre	Deriva cm.	Calibre	Deriva cm.
175	2.3583	175	1.9642
200X5.5	1.762	200X5.5	1.5279
200X7	1.4582	200X7	1.295
220X9	1.2838	220X9	1.0611
260X9	1.2564	260X9	0.9621
260X11	1.198	260X11	0.9118

Tabla No. 11. Derivas máximas. Estructura nueve niveles. Tercera etapa.

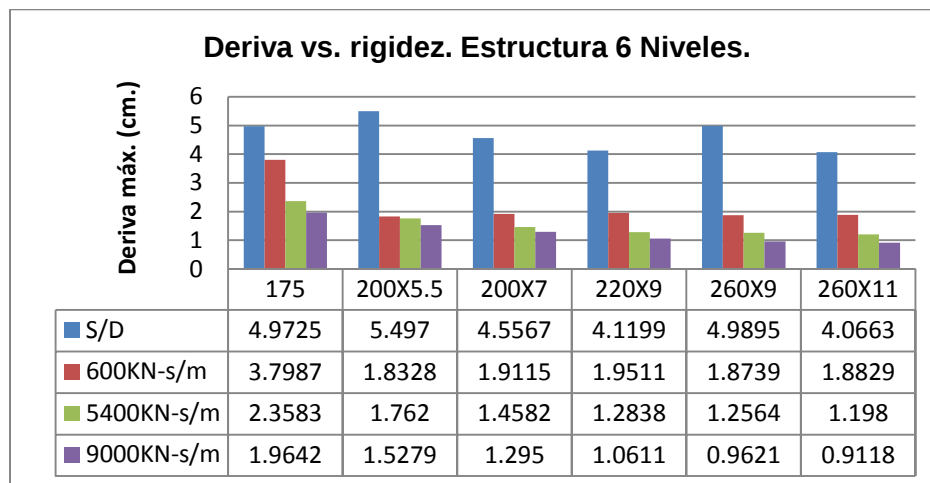


Fig. 47. Derivas máximas vs. rigidez. Estructuras de nueve niveles.

% Reducción de derivas.			
Calibre	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m
175	23.61	52.57	60.50
200X5.5	66.66	67.95	72.20
200X7	58.05	68.00	71.58
220X9	52.64	68.84	74.24
260X9	62.44	74.82	80.72
260X11	53.70	70.54	77.58

Tabla No. 12. Porcentaje de reducción de derivas. Estructura nueve niveles. Tercera etapa.

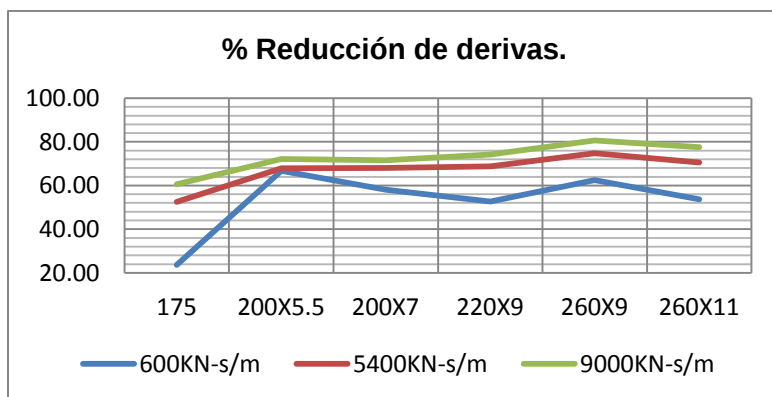


Fig. 48. Porcentaje de reducción de derivas. Estructuras de nueve niveles.

Rendimiento dispositivos.			
Calibre	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m
175	1.3090	2.1085	2.5316
200X5.5	2.9992	3.1198	3.5977
200X7	2.3838	3.1249	3.5187
220X9	2.1116	3.2091	3.8827
260X9	2.6626	3.9713	5.1861
260X11	2.1596	3.3942	4.4596

Tabla No. 13. Rendimiento de dispositivos. Estructura nueve niveles. Tercera etapa.

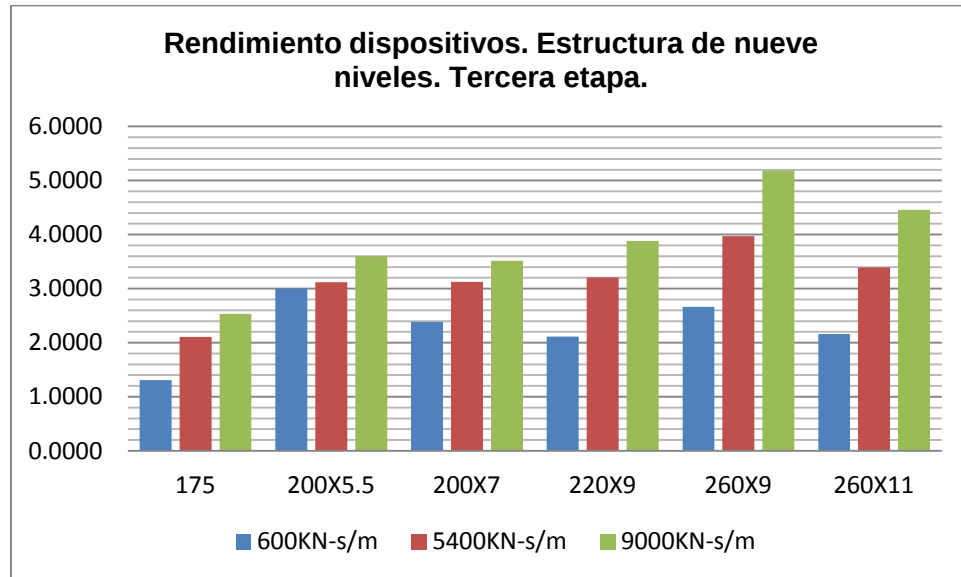


Fig. 49. Rendimiento de dispositivos. Estructuras de nueve niveles.

Análisis de resultados. Tercera etapa.

Los pórticos de nueve niveles presentan derivas con valores más lineales con respecto a la variación de su rigidez, en comparación con las etapas anteriores. Todas las rigideces presentan valores de derivas entre 4.00 y 6.00 cm, inferiores a los presentados en la segunda etapa.

El porcentaje de reducción de derivas tiene valores entre 23 y 80%. Los porcentajes de reducción aumentan consistentemente a medida que aumentan las rigideces y los coeficientes de amortiguación.

El rendimiento de los dispositivos presenta magnitudes inferiores a los que arrojan las etapas anteriores, presentando valores entre 2.5 y 5.0, lo que indica que los dispositivos son más eficientes para edificaciones de baja altura.

Cuarta etapa.

Los resultados de los análisis de la cuarta etapa se presentan en un orden similar al de las anteriores, arrojando los resultados de los modelos en un orden de tres, seis y nueve niveles.

- Tres niveles. Diagonal

Comparación derivas con sistema diagonal 3 niveles.				
Calibre	600KN-s/m	5400KN-s/m	9000KN-s/m	Diagonal.
110	0.2966	0.1425	0.1231	0.0769
120	0.3118	0.1224	0.1041	0.0699
155	0.1671	0.1024	0.0873	0.0625
175	0.1129	0.097	0.0813	0.0607
200X5.5	0.1125	0.0947	0.0805	0.0605
200X7	0.1133	0.0945	0.0817	0.0626

Tabla No. 14. Derivas primera etapa vs. derivas diagonal 3 niveles. Cuarta etapa.

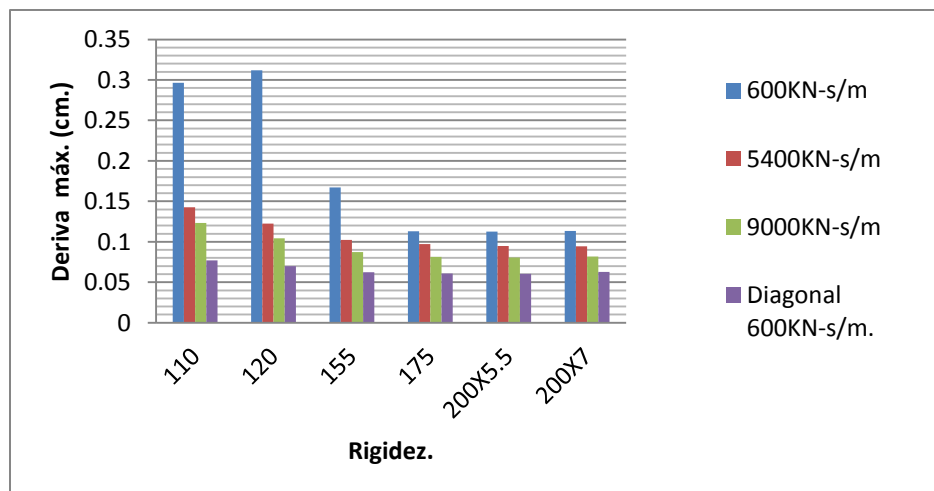


Fig. 50. Derivas primera etapa vs. derivas diagonal 3 niveles. Cuarta etapa.

La disposición diagonal arroja una disminución notable en las derivas máximas, usando un coeficiente de amortiguación de 600 KN-s/m. Dicha disposición supera la efectividad en reducción de derivas incluso para los dispositivos de mayor amortiguación, lo que demuestra una reducción más eficiente.

- Seis Niveles.

Los modelos de seis niveles se dividen en modelos de tres y seis vanos. Los modelos de tres vanos mantienen la posición de los dispositivos haciendo las variaciones descritas.

6 NIVELES.									
	s/D	600 KN-s/m	5400 KN-s/m	9000 KN-s/m	Trapezoidal sim. 1	Trapezoidal sim. 2	Ascend.	Descend.	Alternó 9000 y 600 KN-s/m
120	19.1 582	2.589	0.8493	1.1265	1.2855	1.2982	1.566	1.2289	1.2736
135	13.8 702	2.0157	0.9849	0.8796	0.9902	0.9938	1.1185	0.9539	0.9827
175	10.8 895	1.1	0.662	0.5383	0.6777	0.687	0.7921	0.5859	0.6569
200X 5.5	10.7 312	1.3476	0.5998	0.4878	0.6096	0.6263	0.7671	0.5614	0.5966
200X 7	9.08 3	0.9329	0.5296	0.4319	0.537	0.5528	0.7056	0.5142	0.5276
220X 9	8.14 94	0.8517	0.4648	0.3798	0.4691	0.4851	0.6483	0.4692	0.4649

Tabla No. 15. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa.

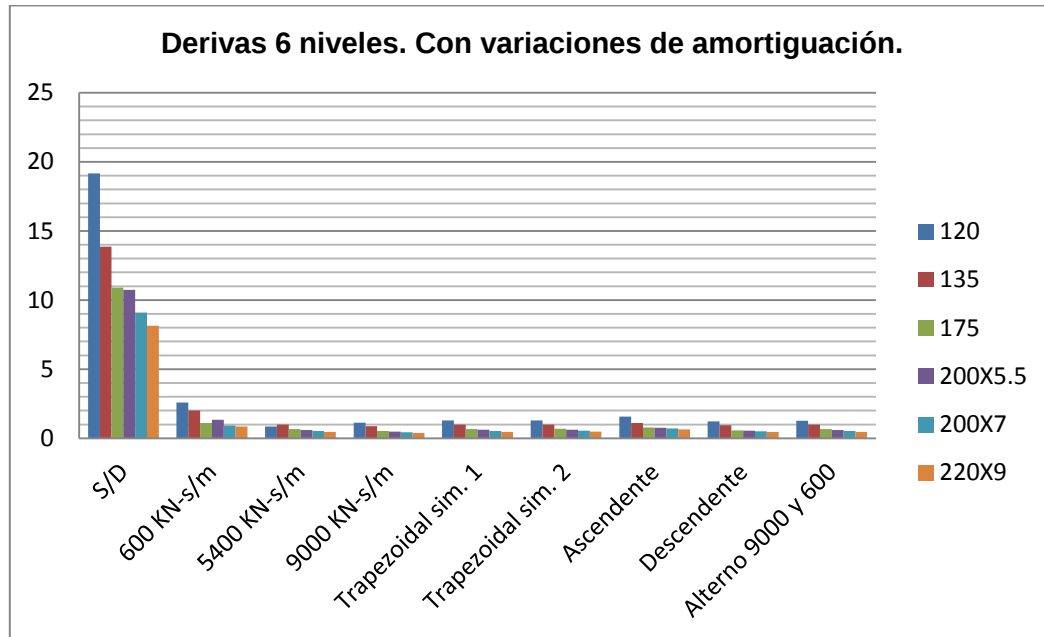


Fig. 51. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa. Estructura seis niveles.

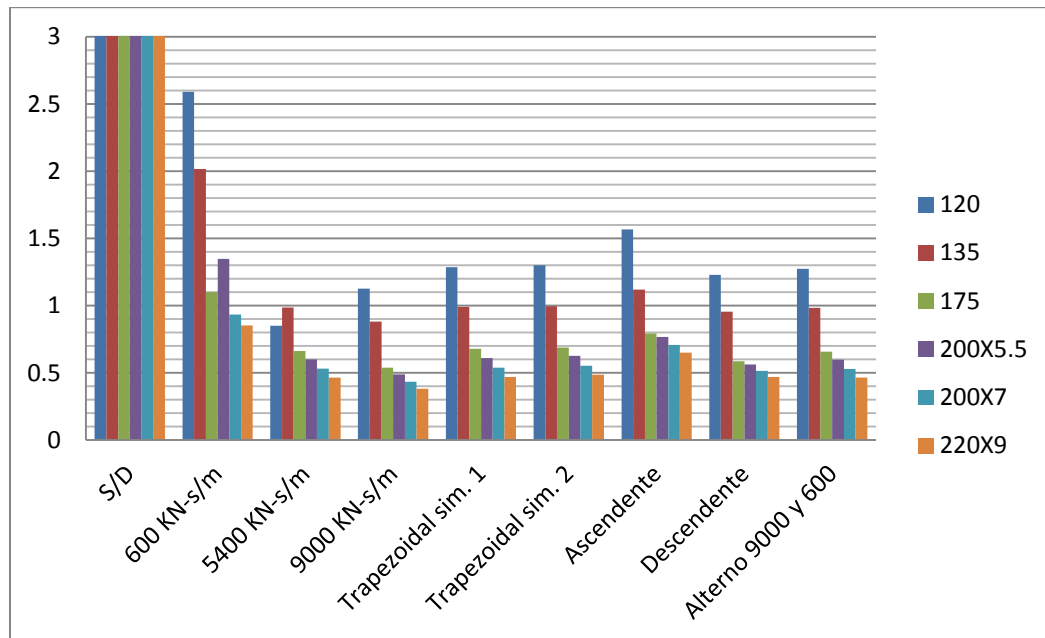


Fig. 51. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa (detalle). Estructura seis niveles.

Las reducciones de derivas máximas ofrecidas por las variaciones de coeficiente de amortiguación arrojan resultados similares y satisfactorios en comparación a los dispositivos uniformes de 5400KN-s/m y 9000 KN-s/m, lo que las convierte en una opción más económica, debido a que mientras mayor es el poder amortiguador de un dispositivo, mayor es su costo, lo que traduce en una ventaja poder emplear un menor número posible de dispositivos de estas características. Las disposiciones trapezoidal simétrica 1, descendente y alterna, permiten derivas máximas comparables a la que permite la distribución uniforme de 9000 KN-s/m, todas por debajo del valor máximo que establece la norma 1756-2001 (3.6 cm. Según la disposición de alturas de entrepiso adoptadas en el presente trabajo especial de grado).

Para el pórtico individual de seis niveles y seis vanos, se encontraron los resultados que se muestran a continuación.

Rigidez 220 X 220 X 9 CON 600 KN-s/m.					
	6X6 DIAGONAL	6X6 PARALELOS	6X6 DIAGONAL DOBLE	6X6 PARALELO DOBLE	6X6 REGULAR
Deriva máx. (cm.)	0.3618	1.6731	0.2337	0.8045	10.5448

Tabla No. 16. Derivas máximas pórticos 6 x 6. Disposiciones en paralelo y diagonal.

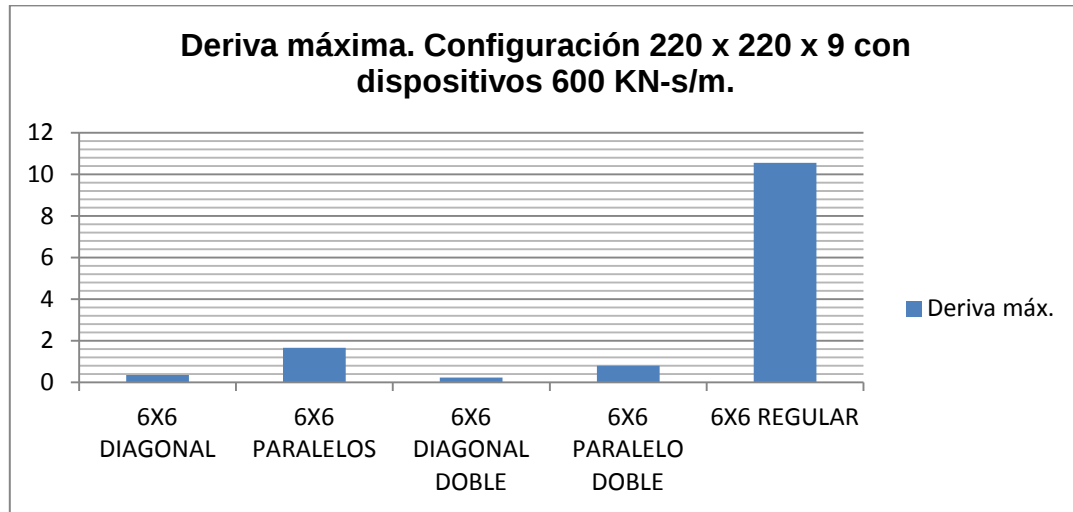


Fig. 52. Derivas pórtico 6x6 regular vs. pórticos con disposición de dispositivos. Cuarta etapa.

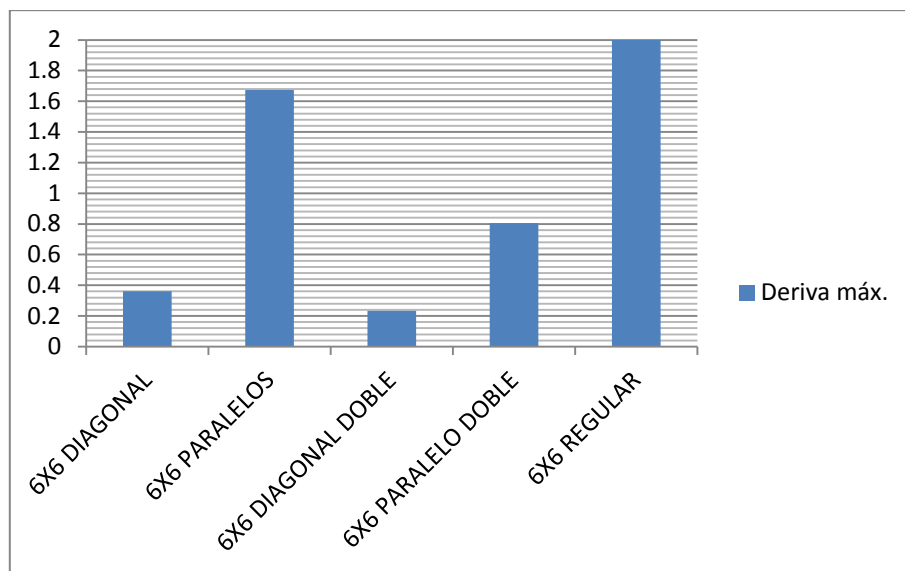


Fig. 52. Derivas pórtico 6x6 regular vs. pórticos con disposición de dispositivos (detalle). Cuarta etapa.

En los pórticos 6 x 6, se confirma la mayor eficiencia del arriostramiento en diagonal para las edificaciones con dispositivos, presentando los porcentajes de reducción que se muestran a continuación.

	Diagonal vs paralelo	Diagonal doble vs. paralelo doble.
% Reducción.	78.38	70.95

Tabla No. 17. Porcentaje reducción de derivas máximas pórticos 6 x 6. Disposiciones en paralelo y diagonal.

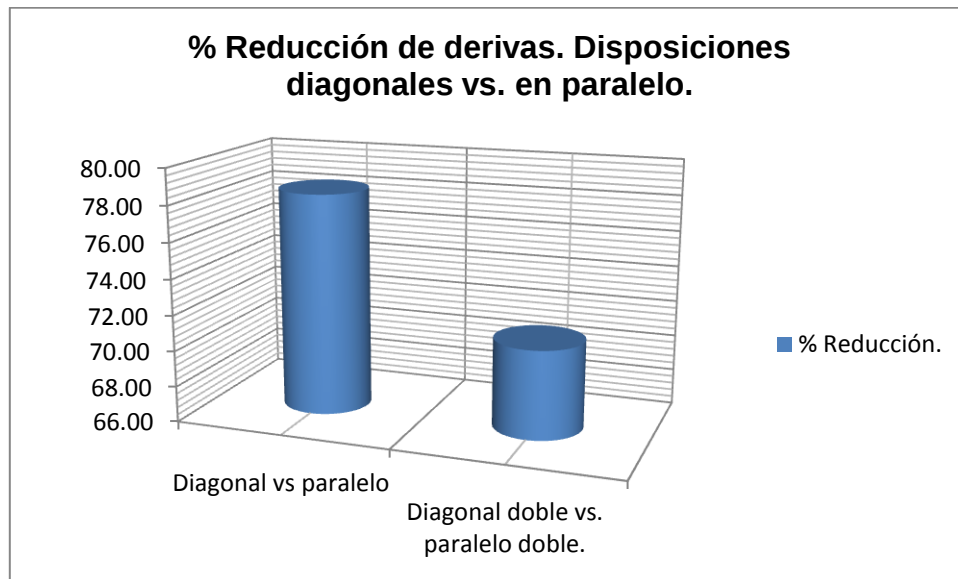


Fig. 53. Porcentaje reducción de derivas máximas pórticos 6 x 6. Disposiciones en paralelo y diagonal.

La reducción de derivas con variaciones de disposición, se comparan según el número de dispositivos en la estructura. En la comparación diagonal vs paralelo, se logra una reducción de más de 78% entre dos estructuras de la misma geometría y rigidez con el mismo número de dispositivos en total y por nivel (siete en total y uno por nivel), lo que aumenta el beneficio que ofrece la disposición en diagonal. De forma similar, comparando las disposiciones diagonal doble contra paralelo doble, se obtiene una reducción de más del 70 %.

- Nueve niveles.

9 NIVELES									
	S/D	600 KN- s/m	5400 KN- s/m	9000 KN-s/m	Trapezoidal sim. 1	Trapezoidal sim. 2	Ascend ente	Descend ente	Alterno 9000 y 600
175	4.97 25	3.79 87	2.35 83	1.9642	2.487	2.3794	2.2116	2.8602	7.0099
200X 5.5	5.49 7	1.83 28	1.76 2	1.5279	1.8334	1.7649	1.6788	1.8713	5.1519
200X 7	4.55 67	1.91 15	1.45 82	1.295	1.4949	1.4613	1.4086	1.496	1.84
220X 9	4.11 99	1.95 11	1.28 38	1.0611	1.3616	1.302	1.1924	1.4659	1.745
260X 9	4.98 95	1.87 39	1.25 64	0.9621	1.3524	1.2855	1.1404	1.5213	2.2945
260X 11	4.06 63	1.88 29	1.19 8	0.9118	1.2985	1.2332	1.0771	2.7927	2.4643

Tabla No. 18. Derivas máximas pórticos de nueve niveles. Variación coeficiente de amortiguación. Cuarta etapa.

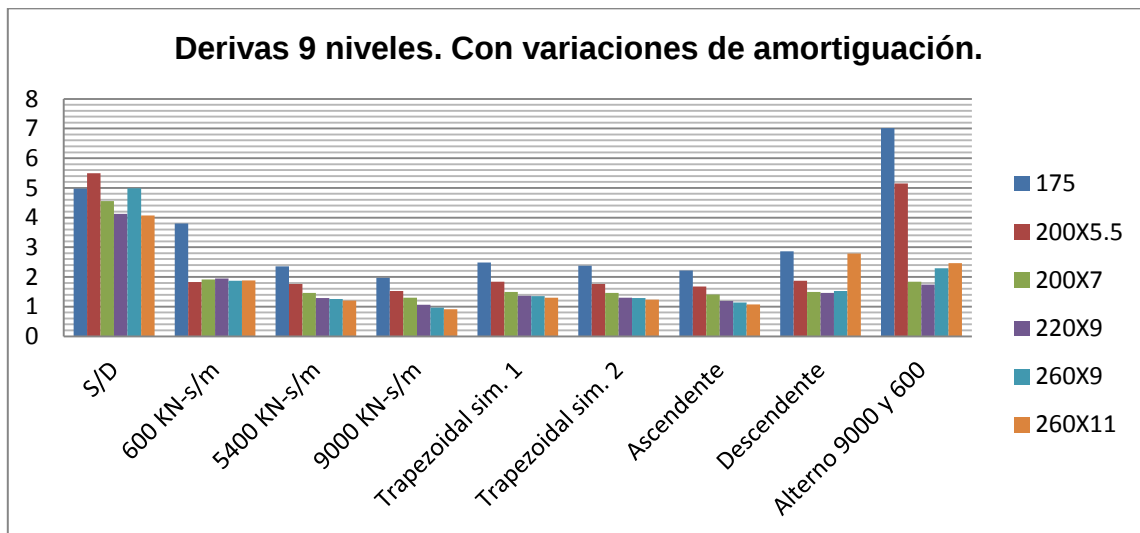


Fig. 54. Derivas variación dispositivos vs. derivas cuarta etapa. Estructura nueve niveles.

Para las estructuras de nueve niveles, la variación de coeficientes de amortiguación en los dispositivos, arrojan resultados satisfactorios (por debajo del valor normativo: 3.6 cm) en cuatro de las cinco variaciones propuestas. Las disposiciones trapezoidal simétrica 1 y 2, ascendente y descendente, arrojan valores satisfactorios inferiores al valor de 3.6 cm. La disposición alterna en estructuras de nueve niveles, no es soportada satisfactoriamente por la estructura, lo que es atribuido a la pérdida de efectividad de los dispositivos con el aumento de la altura, en especial para los dispositivos de 600 KN-s/m aplicados a las estructuras más flexibles.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

- El uso de dispositivos disipadores de energía constituye un adelanto notable y representativo en el desarrollo de la ingeniería sismorresistente, permitiendo reducciones notables en los esfuerzos sufridos por la estructura durante un sismo.
- Los valores arrojados por el presente trabajo son válidos para el juego de acelerogramas y configuraciones empleados.
- La información –literatura- existente acerca de dispositivos disipadores de energía es sumamente limitada en comparación a la existente sobre el resto de los tipos de dispositivos de disipación o aislamiento sísmico.
- El trabajo presentado es la síntesis de una variada gama de análisis numéricos, que si bien arrojan información importante en el desarrollo de la ingeniería sismorresistente, requieren del soporte que pueda ofrecer la comparación con los valores arrojados por el estudio con ensayos en laboratorios.
- Los dispositivos disipadores de energía producen reducciones en las derivas que se ubican en un 97% para estructuras de tres niveles, 94% para seis niveles y entre 23 y 80% para estructuras de nueve niveles, lo que representa una notable disminución de los esfuerzos en los elementos estructurales, y la conclusión de que este tipo de dispositivos son más eficientes para edificaciones de media a baja altura.
- Para los estudios realizados, las configuraciones en diagonal continua de los dispositivos disipadores, generan derivas mucho menores que en paralelo (cuarta etapa), por lo que se recomiendan estudios más especializados que permitan su uso.

Recomendaciones.

- Para el presente trabajo se simularon pórticos sumamente flexibles con el fin de maximizar el efecto de los dispositivos disipadores, por lo que no se recomiendan como referencia para el diseño de estructuras.
- Es necesario desarrollar en las normas venezolanas el estudio necesario para constituir un capítulo acerca de los dispositivos de disipación y aislamiento de energía, que permita nivelar las tecnologías constructivas de Venezuela, con las existentes a nivel mundial.
- En caso de estructuras nuevas, se recomienda hacer un estudio con distintas configuraciones de amortiguación, que permita hallar la combinación óptima para cada edificación.
- Se recomienda ampliar los análisis para nuevas configuraciones, dispositivos y coeficientes de amortiguación, así como para nuevas secciones y tipos de acero estructural.
- Con el fin de posibilitar un desarrollo de edificaciones con disipadores en Venezuela, y en virtud de su inexistencia en las normas venezolanas, el uso de normas como la norma NCH.2369. *DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS E INSTALACIONES (INDUSTRIALES) 2003* de Chile, o la norma *MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES* (ASCE/SEI 7-10) de Estados Unidos.
- Se recomienda desarrollar estudios acerca de los efectos de una estructura sometida a sismo, que posea una combinación de distintos métodos de dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Cano, H., Zumaeta, 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. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Lima, Perú.
- Diseño sísmico de estructuras e instalaciones (industriales). (Norma N° NCH.2369). (2003). Instituto Nacional de Estandarización, Chile. (Extraordinario), 2003.
- Hernández, E. (2008). Análisis y Diseño Estructural Utilizando el Programa ETABS v9 [Libro en línea]. CSI Latinoamérica (Morrison Ingenieros). Disponible: https://www.academia.edu/5719230/An%C3%A1lisis_y_Dise%C3%B1o_Estructural_Utilizando_el_Programa_ETABS_v9_C%C3%B3digo_CSI-ETABS-FEB-08-R0_Extended_Three_Dimensional_Analysis_of_Building_Systems_An%C3%A1lisis_Tridimensional_Extendido_de_Edificaciones [Consulta : 2015, julio 15]
- Kelly, T. (2001). In-structure damping and energy dissipation design guidelines. Holmes Consulting Group LTD. Wellington, Nueva Zelanda. [Consulta : 2015, julio 1]
- Mayorga V., Carlos A. (2011). Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostramiento de pandeo restringido. Trabajo especial de postgrado. Inédito. Universidad Nacional de Colombia.
- Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. (ASCE/SEI 7-10). (2013). American Society of Civil Engineers, USA. (2013)

- Morillas R, Leandro M. (2013). Proyecto sismorresistente basado en prestaciones utilizando métodos energéticos aplicado a pórticos con sistema de control pasivo. Trabajo de doctorado. Inédito. Universidad de Granada.
- Nagui William B. (2004). *Seismic Protection of Structures Using Passive Control System*. Trabajo doctorado publicado, Universidad de Canterbury. Christchurch, Nueva Zelanda. [Consulta: 2015, junio 20]
- Norma venezolana COVENIN 1618-1998 Estructuras de acero para edificaciones. Método de los estados límites. (Norma N° 1618). (2006). Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 36635. Febrero 3, 1999.
- Norma venezolana COVENIN 1753:2006 Proyecto y construcción de obras en concreto estructural. (Norma N° 1753). (2006). Fondonorma (Extraordinario), agosto 30, 2006.
- Norma venezolana COVENIN 1756:2001 Edificaciones sismorresistentes (Norma N° 1756). (2001, Marzo). Fondonorma (Extraordinario), julio 25, 2001.
- Serrano L., Palmieri B. (2014). Propuesta de utilización de disipadores de energía en la construcción de estructuras de concreto armado en Venezuela. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela.
- Sigweb (1993). Disipación de energía. [Publicación en línea]. Sigweb, Sistemas Integrados de Gestión. Disponible: <http://www.sigweb.cl/biblioteca/DisipacionEnergia.pdf> [Consulta : 2015, junio 19]
- Taylor A. (enero 17, 2014). The Northridge Earthquake. [Publicación en línea]. The Atlantic. Disponible: <http://www.theatlantic.com/photo/2014/01/the-northridge-earthquake-20-years-ago-today/100664/> [Consulta : 2015, junio 20]

- Torres, M. Sistemas de disipación pasiva de energía sísmica [Publicación en línea] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Disponible: <http://www.imcyc.com/revistacyt/en11/ingenieria.htm> [Consulta : 2015, julio 10]
- Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Oficina de Proyectos. (2007). Disipador metálico para una conexión seca articulada de viga y columna. Córdoba, Argentina. Gerbaudo, C.; Inaudí, J.A.
- Vargas, C. (2015). Tecnología Antisísmica. [Publicación en línea]. Antisismos.blogspot.com Disponible: <http://antisismos.blogspot.com/2015/06/5.html> [Consulta : 2015, junio 24]