

FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES EN COLOMBIA



Presentado por:

JORGE LUIS ARÉVALO SIERRA

RENZO RAFAEL CANTILLO POLO

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

SANTA MARTA, D.T.C.H.

2006

**FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL USO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS EN EL
DISEÑO DE EDIFICACIONES EN COLOMBIA**

Presentado por:

**JORGE LUIS ARÉVALO SIERRA
RENZO RAFAEL CANTILLO POLO**

Director de Proyecto:

**VICTOR FRANCISCO CEBALLOS MELENDEZ
Ing. Civil M. I. C. (Candidato a doctor)**

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

SANTA MARTA, D.T.C.H.

2006

*A mis padres, a mis hermanos,
a mis familiares y
En especial a mi Tía Nancy
Por su inmenso apoyo y por
Creer en mí.*

Jorge Luis

*A mi hija, a mi madre y a mi esposa por
ser las mujeres de mi inspiración.
A mis hermanos por su gran amor y apoyo.
En especial a mi Papá por
su apoyo incondicional.
Y a todos nuevamente por haber
creído y confiado en mí.*

Renso Rafael

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a todos los que de una u otra forma aportaron para desarrollo de nuestros conocimientos desde el comienzo de la carrera, en especial al Ingeniero Víctor Ceballos por sus aportes y sugerencias, por su disposición, motivación y su apoyo permanente en el desarrollo de este proyecto.

Les agradecemos a nuestros familiares por su amor y su voz aliento en los momentos difíciles y por ser la máxima inspiración para salir adelante. A nuestros amigos por su cariño y su amistad incondicional en todo el transcurso de nuestro estudio.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
1. PRESENTACIÓN	14
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.3 ANTECEDENTES	19
1.4 MARCO TEORICO	27
1.4.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES	27
1.4.1.1 Ductilidad.	27
1.4.1.2 Deriva	28
1.4.1.3 Capacidad de disipación de energía.	30
1.4.1.4 Coeficiente de capacidad de disipación de energía, R	31
1.4.1.5 Espectro de diseño.	32
1.4.1.6 Sismo Artificial.	33
1.4.1.7 Compatibilización de espectros.	33
1.4.1.8 Respuesta histerética.	34
1.4.1.9 Aislador	35
1.4.1.10 Amortiguamiento efectivo	36
1.4.1.11 Desplazamiento de diseño	36
1.4.1.12 Desplazamiento máximo	36
1.4.1.13 Desplazamiento total máximo.	36
1.4.1.14 Interfaz de aislación	37

1.4.1.15 Rigidez efectiva o secante.	37
1.4.1.16 Sismo de diseño (SDI)	37
1.4.1.17 Sismo máximo posible (SMP)	37
1.4.2 SISTEMAS INELÁSTICOS.	38
1.4.2.1 Comportamiento en el rango inelástico de materiales estructurales.	39
1.4.2.1.1 Concreto estructural.	39
1.4.2.1.2 Acero estructural.	44
1.4.3 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VIBRACIONES	46
1.4.3.1 Clasificación de los Sistemas de reducción de vibraciones.	47
1.4.3.1.1 Sistemas de control pasivo.	48
1.4.3.1.1.1 Sistemas de control pasivo con aislamiento en la base	48
1.4.3.1.1.2 Sistemas de control pasivo con disipadores de energía.	49
1.4.3.1.1.3 Sistemas de control pasivo mediante sistemas inerciales acoplados.	50
1.4.3.1.2 Sistemas de control activo.	51
1.4.3.1.3 Sistemas de control semiactivo.	53
1.4.3.1.4 Sistemas de control híbrido.	55
1.4.4 NORMATIVA PARA EL ANALISIS Y DISEÑO	57
1.4.5 FILOSOFIA DE LOS REQUERIMIENTO DE DISEÑO PARA EDIFICIOS AISLADOS	57
1.4.6 PROCEDIMIENTO DE ANALISIS DE LOS AISLADORES	59

ELASTOMÉRICOS	
1.4.6.1 Criterio de selección	59
1.4.6.1.1 Bases de Diseño	59
1.4.6.1.2 Estabilidad del sistema de aislación	59
1.4.6.1.3 Categoría de destino	60
1.4.6.1.4 Selección del procedimiento de respuesta	60
1.4.6.1.4.1 Análisis Estático	60
1.4.6.1.4.2 Análisis Dinámico	61
1.4.6.2 Procedimiento de análisis Estático	62
1.4.6.2.1 Característica de fuerza deformación del sistema de aislamiento	62
1.4.6.2.2 Desplazamiento Laterales Máximos	64
1.4.6.2.3 Fuerza laterales mínima	69
1.4.6.3 Procedimiento de análisis dinámico	71
1.4.6.3.1 Sistema de aislación y elementos de la subestructura	71
1.4.6.3.2 Elementos estructurales de la superestructura	72
1.4.6.3.3 Registros	72
1.4.6.3.4 Modelo Matemático	73
1.4.6.3.5 Descripción del procedimiento de análisis	75
1.4.6.3.6 Límite de desplazamiento	76
1.4.7 REQUERIMIENTO DETALLADO DE LOS SISTEMAS	76
1.4.7.1 Sistema de Aislación	76

1.4.7.2 Sistema Estructural	78
1.5 JUSTIFICACIÓN	79
1.6. OBJETIVOS	81
1.6.1. OBJETIVO GENERAL	81
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	81
1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES	82
1.8. FORMULACION Y GRAFICACION DE HIPOTESIS.	83
2. MATERIALES Y METODOS	84
2.1. Diseño metodológico según la naturaleza del proyecto	84
2.2. Selección y medición de las variables del análisis	85
2.3. Materiales	86
3. DELIMITACIÓN DEL ESPACIO TEMPORAL Y GEOGRÁFICO	87
4. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	87
5. MEMORIA DE CALCULO	88
5.1. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN	88
5.2. NORMAS Y ESPECIFICACIONES	89
5.3. PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	90
5.4. ANALISIS DE CARGA	93
5.4.1. Carga Muerta	93
5.4.2. Carga Viva	95
5.5. COMBINACIONES DE CARGA	96

5.6. REQUISITOS MINIMOS DE DISEÑO	97
5.6.1. CAPACIDAD DE DISIPACION DE ENERGIA MODERADA (DMO)	97
5.6.1.1. Vigas	97
5.6.1.2. Columnas	98
5.6.1.3. SISTEMA PORTICO $A_a = 0.15$	100
5.6.1.3.1. Diseño de elementos	104
5.6.1.3.2. Derivas	104
5.6.1.4. SISTEMA DUAL $A_a = 0.15$	105
5.6.1.4.1. Derivas	106
5.6.1.5. SISTEMAS CON AISLADORES $A_a = 0.15$	107
5.6.1.5.1. Derivas	111
5.6.2. CAPACIDAD DE DISIPACION DE ENERGIA ESPECIAL (DES)	112
5.6.2.1. Vigas	112
5.6.2.2. Columnas	114
5.6.2.3. SISTEMA PORTICO $A_a = 0.30$	114
5.6.2.3.1. Diseño de elementos	117
5.6.2.3.2. Derivas	117
5.6.2.4. SISTEMA DUAL $A_a = 0.30$	118
5.6.2.4.1. Derivas	119
5.6.2.5. SISTEMA CON AISLADORES $A_a = 0.30$	120

5.6.2.5.1. Derivas	122
5.6.2.6. COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS	125
(Curvas de histéresis)	
5.6.3. CALCULO DE LOS AISLADORES ELASTOMERICOS	127
5.6.3.1 Procedimiento para el análisis y diseño de los Aisladores	128
5.6.3.2. Detalles De La Geometría De Los Aisladores	144
5.6.4. Presupuestos	145
CONCLUSIÓN	155
BIBLIOGRAFIA	157

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento UBC	66
Tabla 2. Carga muerta por panel de entrepiso	94
Tabla 3. Carga muerta por panel de cubierta	95
Tabla 4. Base escogidas de las vigas	97
Tabla 5. Secciones mínimas de columnas	99

Tabla 6. Secciones finales de Vigas Zona Intermedia	102
Tabla 7. Secciones finales de Columnas Zona Intermedia	102
Tabla 8. Derivas en porcentaje para el sistema pórtico Zona Intermedia	104
Tabla 9. Secciones finales de Vigas Zona Intermedia	104
Tabla 10. Secciones finales de Muro y columna Zona Intermedia	106
Tabla 11. Derivas en porcentaje para el sistema dual Zona Intermedia	107
Tabla 12. Secciones finales de Vigas Zona Intermedia	107
Tabla 13. Secciones finales de Columnas Zona Intermedia Sistema con Aisladores	107
Tabla 14. Derivas en porcentaje para el Sistema de Aisladores Zona Intermedia	112
Tabla 15. Secciones de las base escogidas de las vigas	113
Tabla 16. Secciones finales de Vigas, Sistema pórtico Zona Intermedia	114
Tabla 17. Secciones finales de Columnas, Sistema Pórtico Zona Intermedia	115
Tabla 18. Derivas en porcentaje para el sistema pórtico Zona Alta	117
Tabla 19. Secciones finales de Vigas, Sistema Dual Zona Alta	118

Tabla 20. Secciones finales de Muros y columnas zona alta	119
Tabla 21. Derivas en porcentaje para el sistema dual Zona alta	119
Tabla 21. Secciones finales de Vigas para Sistema con	120
Aisladores Zona Alta	
Tabla 22. Secciones finales de Columnas para el Sistema con	120
Aisladores Zona Alta	
Tabla 23. Derivas en porcentaje para el sistema con Aisladores	123
Zona Alta	
Tabla 24. Precios de los Materiales	145

TABLA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema del sistema pendular friccionante	23
Figura 2. Implementación de sistemas de control pasivo en Norte	23
América	
Figura 3. Aplicación de aisladores sísmicos en Japón antes de	24
1995.	
Figura 4. Aplicación de aisladores sísmicos en Japón antes y	24
después de 1995.	
Figura 5. Clínica UC. San Carlos, Chile	25

Figura 6. Aeropuerto Internacional de San Francisco	26
Figura 7. Abovenet, San Francisco	26
Figura 8. Definición de Deriva	29
Figura 9. Espectro Elástico de diseño	33
Figura 10. Efecto de carga y descarga, con inversión del sentido de la fuerza.	35
Figura 11. Concreto estructural	39
Figura 12. Viga en voladizo cargada en el extremo	40
Figura 13. Agrietamiento de la viga en voladizo con carga en el extremo	40
Figura 14. Repuesta histerética elemento de concreto	41
Figura 15. Efecto de estrangulamiento	44
Figura 16. Respuesta histerética elemento en acero	45
Figura 17. Sistemas de protección sísmica	47
Figura 18. a) Aisladores de goma con núcleo de plomo	48
b) Aisladores de goma.	
Figura 19. a) Disipadores tipo ADAS b) Respuesta histeretica en los primeros ciclos de carga	49
Figura 20. Ilustración de los dispositivos TMD	50
Figura 21. Esquema de funcionamiento sistemas de control activo.	51

Figura 22. Edificio con control de desplazamiento mediante AMD	53
Figura 23. Esquema de funcionamiento de un sistema de control semiactivo.	54
Figura24. Control estructural semiactivo mediante amortiguador MR	54
Figura 25. Esquema de Amortiguador MR	55
Figura 26. Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido.	56
Figura 27. Aislamiento de base con control activo del desplazamiento	56
Figura 28. Curva fuerza-deformación, aislador de bajo amortiguamiento.	63
Figura 29. Curva fuerza-deformación, aislador con corazón de plomo	63
Figura 30. Curva fuerza-deformación, aislador de alto amortiguamiento.	64
Figura 31. Configuración de la planta	88
Figura 32. Corte transversal placa de entrepiso	93
Figura 33. Modelo típico sistema de resistencia sísmica tipo pórtico	100
Figura 34. Tipificación de columnas	101
Figura 35. Espectro de diseño para zona intermedia $A_a = 0.15$	103

Figura 36. Modelo típico sistema de resistencia sísmica tipo dual	105
Figura 37. Sistema de resistencia sísmica con aisladores elastoméricos	107
Figura 38. Detalle de aislador tipo	109
Figura 39. Registro Sísmico Artificial Zona Intermedia	111
Figura 40. Espectro de diseño para zona intermedia $A_a = 0.30$	116
Figura 41. Registro Sísmico Artificial zona Alta	122
Figura 42. Relación de derivas ZA	123
Figura 43. Relación de derivas ZI	124
Figura 44. Relación de desplazamientos ZA	124
Figura 45. Relación de desplazamiento ZI	125
Figura 46. Curva de histéresis aislador en zona intermedia	126
Figura 47. Curva de histéresis aislador en zona alta	127
Figura 48. Propiedades geométricas de aislador Zona Alta	144
Figura 49. Propiedades geométricas de aislador Zona Intermedia	144
Figura 50. Resumen de costos Zona Intermedia	153
Figura 51. Resumen de costos Zona Alta	154

RESUMEN

En las últimas décadas han sido desarrolladas técnicas para el control y reducción de las vibraciones debidas a eventos sísmicos en las estructuras. Estas técnicas son conocidas como Sistemas de Reducción de Vibraciones (SRV) y se pueden clasificar en cuatro grupos: Sistemas de Control Activo (SCA), Sistemas de Control Pasivo, Sistemas de Control Semiactivo (SCSA) y Sistemas de Control Híbrido (SCH). Los Sistemas de Control Pasivo (SCP) se destacan por ser robustos (no requieren de fuentes de energía exterior y son mecánicamente simples); y por lo tanto más económicos que los otros sistemas de control. Los sistemas de aislamiento sísmico, pertenecen a este grupo de sistemas pasivos de reducción de vibraciones en estructuras y son una alternativa muy viable y económica para usarse en el diseño de nuestras estructuras. Para dichos sistemas, aún el importarlos a Colombia es económico, esto es; comparado con los beneficios (a corto y a largo tiempo) de seguridad que ofrecen “mantener funcional una edificación durante y después de un sismo severo”. El principal objetivo del presente trabajo fue, evaluar la factibilidad de la aplicación de los sistemas de aislamiento sísmico, en el diseño de edificaciones en nuestro País, dando como resultado general que sería factible aplicar esta tecnología, si se tiene en cuenta, el uso y la ubicación de la estructura en el mapa de zonificación sísmica.

ABSTRACT

In the last decades techniques have been developed for the control and reduction from the due vibrations to seismic events in the structures. These techniques are known as Systems of Reduction of Vibrations (SRV) and they can be classified in four groups: Systems of Active Control (SCA), Systems of Passive Control, Systems of Control Semi active (SCSA) and Systems of Hybrid Control (SCH). The Systems of Passive Control (SCP) they stand out to be robust (they don't require of sources of external energy and they are mechanically simple); and therefore more economic than the other control systems. The systems of seismic isolation belong to this group of passive systems of reduction of vibrations in structures and they are a very viable and economic alternative to be used in the design of our structures. For this system, caring them to Colombia is still economic; this is; compared with the benefits (to short and at long time) of security that you/they offer "to maintain functional a construction during and after a severe earthquake". The main objective of the present work was, to evaluate the feasibility of the application of the systems of seismic isolation, in the design of constructions in our Country, giving as a result general that it would be feasible to apply this technology, if one has in bill, the use and the location of the structure in the map of seismic zonificacion.

1. PRESENTACIÓN

La búsqueda de la preservación de las vidas humanas y de los bienes materiales, ante los efectos producidos por los diferentes tipos de fenómenos naturales; ha creado una conciencia de cambio y de desarrollo tecnológico, en cuanto a las metodologías y técnicas de diseño y construcción de las diferentes clases de estructuras existentes.

En el caso de las edificaciones las cuales sufren grandes daños debido a los efectos sísmicos, se ha buscado la disminución de las pérdidas causadas por estos fenómenos; regulando por medio de la implementación de normas que rigen los diseños de las nuevas edificaciones. En nuestro país la NSR-98 regula actualmente el diseño de edificaciones y aunque en esta se citan algunas metodologías no convencionales estas no han sido implementadas en el diseño y construcción de edificaciones debido a la desinformación con respecto a la nueva tecnología.

Actualmente las alternativas más finas de diseño sismo-resistente están enmarcadas en un gran grupo denominado “Sistemas de Reducción de Vibraciones” (SRV), dividido en otros cuatro subgrupos conocidos como: Sistemas de Control Activo (SCA), Sistemas de Control Semi-Activo (SCSA), Sistema de Control Híbrido (SCH) y Sistemas de Control Pasivo (SCP),

Una de estas técnicas de diseño sismorresistente muy utilizada en todo el mundo es el aislamiento en la base con dispositivos elastoméricos, este sistema (tema de nuestro estudio) se ha implementado tanto en el diseño de estructuras nuevas, como en la rehabilitación de estructuras existentes.

El aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija.

Después de conocer la constante evolución de estos sistemas y alternativa de diseño sismo-resistente, existe la gran necesidad de que la Universidad del Magdalena continúe en el estudio de estas nuevas tecnologías por medio de campos de investigación a través de sus docentes y estudiantes.

Con base en lo anterior se optó por realizar un estudio de la factibilidad económica del uso de aisladores elastoméricos en el diseño de edificaciones en Colombia.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los fenómenos naturales más destructivos con la que se ha visto afectada Colombia son los movimientos sísmicos ya que a través de la historia han traído consecuencias al ser humano, su hábitat y entorno, sumándose víctimas humanas, pérdidas materiales incalculables, graves secuelas físicas y psicológicas. Como consecuencia surgió la necesidad de implementar normas sismo-resistente con el fin de proteger las vidas y tener la menor cantidad de pérdidas económicas. Sin embargo, a pesar de seguir las normas, en algunas ocasiones se ha presentado que las operaciones para socorrer a las víctimas se han visto dificultadas por los daños que ocurren en los hospitales, estaciones de bomberos, defensa civil y edificaciones que en caso de desastres sirven de albergue a las personas (Armenia, sismo del 25 de Enero de 1999, México 19 de Septiembre de 1985).

En eventos sísmicos significativos y relativamente recientes, tales como el de Northridge en 1994 en los Estados Unidos y el de Kobe en 1995 en Japón, han puesto en evidencia algunos de los problemas asociados al uso de sistemas estructurales tradicionales para resistir las acciones sísmicas durante sismos intensos, ya que es conocido que la modelación inelástica

convencional tiene una serie de limitaciones en cuanto a la predicción de las fuerzas sísmicas y algunas veces estas fuerzas estimadas para el diseño sismo-resistente convencional son inferiores a las producidas por la acción de un sismo de alta intensidad, por otra parte la reducción de las acciones sísmicas en las construcciones se obtiene en función de su ductilidad, lo que genera daño tanto en los elementos estructurales y no estructurales, siendo difícil y costosa la reparación luego de un sismo.

Como un avance en las técnicas de diseño sismorresistente están los sistemas de reducción de vibraciones en las cuales se busca localizar las zonas de disipación de energía para controlar las fuerzas sísmicas y así concentrar los daños en elementos específicos, garantizando el funcionamiento de la estructura durante y después de la ocurrencia de un sismo.

Colombia es un país en vía de desarrollo que necesita implementar técnicas de diseño y rehabilitación que sean eficaces y económicas, con el fin de contrarrestar los efectos de los sismos sobre sus estructuras, y teniendo en cuenta que el incremento del números de sismos ocurridos en el mundo durante el siglo XX con respecto a los ocurridos en el siglo XIX, ha sido de dos veces y media mayores, hace que los Sistema de Reducción de

Vibraciones se transformen de una medida preventiva a una medida necesaria, tanto para la rehabilitación como en el diseño de edificaciones.

La simplicidad de los análisis y diseño para la implementación de estas tecnologías se convierte en una ventaja para su aplicación en nuestro medio; el aumento de los costos con los que habitualmente vienen acompañadas no se puede comparar con los beneficios obtenidos. Estos costos son enfrentados con los niveles de seguridad (relación costo-beneficio) a los que se pueden llevar las edificaciones, niveles a los que solo podrían llegar, los diseño sismo-resistentes convencionales, con aumento en secciones elevando así también los costos totales de la estructura. Basados en lo anterior se puede concluir que para equivalentes niveles de seguridad la utilización de sistemas de aislamiento sísmico pueden resultar más económicos y confiables que el diseño sismo-resistente convencional. Luego los sistemas de aislamiento sísmico son una muy buena alternativa para tener en cuenta en el momento del diseño de estructuras importantes como lo son hospitales, escuelas, coliseos o estructuras con contenidos que superan en costos a los de la misma estructura.

Es de saber que, el aislamiento es especialmente eficaz en estructuras rígidas (p.e., $T < 1.2s$) en que el efecto del alargamiento del periodo produce

reducciones de respuesta en aceleración que varían entre 5 y 10 veces con la respecto a la estructura de referencia de base fija.

1.3 ANTECEDENTES

Lamentablemente vivimos en un país que no se ha dado cuenta de las consecuencias y pérdidas que ocasiona un movimiento sísmico; que no se quiere salir de la monotonía, es decir, que hay resistencia al cambio y no se utiliza la tecnología que se ha venido desarrollando en todo el mundo sobre los sistemas de aislamiento sísmico. Además, las pocas investigaciones para no decir ninguna sobre los sistemas de aislamiento sísmico influyen en gran porcentaje en la no investigación de estos sistemas.

En Colombia sólo se han desarrollado dos investigaciones sobre este sistema. El primer estudio llamado “Modelación Estructural y Comparación Económica de Edificios con Aislamiento Sísmico en la base” no arrojó buenos resultados, según dicha investigación el uso del sistema tiene altos costos; y la segunda “Aislamiento Sísmico de Puentes” introdujo al país algunos conceptos fundamentales de lo que es el aislamiento sísmico con aisladores elastoméricos haciendo comparaciones entre los diseños convencionales de puentes y los diseños con este tipo de tecnología.

El primer Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistente fue el publicado en 1984 (fue desarrollado a causa del sismo del 13 de marzo en Popayán-1983) y antes de este no existía en Colombia un reglamento obligatorio para el diseño y la construcción de estructuras en cuanto a requisitos sísmicos, luego esta norma fue actualizada en el año de 1998 actualización que trajo consigo algunos cambios debido a que, El Gobierno Nacional por medio de la Ley 400 de 1997 establece los criterios mínimos de diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas, así como también decidió que en todas las edificaciones existentes en la nación se deben realizar estudios de vulnerabilidad y rehabilitación, no siendo todo esto mas que el producto del trabajo de las investigaciones echas en el resto del mundo y aquí en el país para procurar diseños mas seguros para las personas y buscando que las estructuras construidas antes de la vigencia de las normas sismo-resistentes también puedan brindar seguridad ante eventos como los sísmicos es por eso que se justifica el investigar por alternativas, para el diseño y rehabilitación de estructuras, que tengan viabilidad técnica y económica para su aplicación sobre todo en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, recordando que esa zonificación no es una exageración por parte de la comunidad científica que la realizo, como quedo demostrado en el sismo que ocurrió en el eje cafetero en 1999. Esto

nos sirve para reflexionar sobre que tan preparados estamos a la hora de enfrentar un evento de este tipo.

Los sistemas de reducción de vibraciones se comenzaron a desarrollar en un principio para ser aplicados en la industria automotriz, luego fueron desarrollándose los principios para su adecuada implementación en la ingeniería estructural. El aislamiento sísmico y la disipación de energía, a través de dispositivos amortiguadores. Una de las primeras formas para disipar energía en edificios fue a través de la adhesión de material viscoelástico (VEM). La forma de uso de este tipo de material consistía en colocar una capa de VEM sobre la base de la estructura, cuando se presentaban deformaciones este material se calentaba y a través de este calor se disipa la energía, el problema era la gran cantidad de VEM que se necesitaba para llegar a niveles aceptables de amortiguamiento para la disipación. De esta forma, el uso de sistemas de reducción de vibraciones se ha difundido poco a poco siendo los más usados los sistemas de control pasivo.

Los primeros Aisladores de base utilizados en edificios fueron de neopreno, en una escuela en Skopje, Macedonia, terminada en 1969. El principal inconveniente de estos dispositivos era su elevada flexibilidad vertical, razón por la cual no se ha vuelto a utilizar.

Estudios más adelante buscando una mejor rigidez vertical y se intercalaron placas delgada de acero en un cilindro de neopreno teniendo buenos resultado pero sin perder su flexibilidad vertical. En el año 1978 se fabricaron los primeros aisladores reforzado con laminas de acero, muchos de estos aisladores fueron utilizados en 1991 en muchas edificaciones (más de 58 edificios) en Japón, pero su capacidad de disipación de energía era baja, así, investigaciones consecutivas dieron a conocer en 1982 a Robinson y Tucker quienes lograron un aumento en la capacidad de disipación de energía al adicionándole a los aisladores de neopreno y laminas de acero un centro de plomo.

En 1987 Zayas propone un sistema de aislamiento basado en el movimiento pendular del edificio sobre superficies cóncavas de los aisladores de base, Este tipo de aislador proporciona una rigidez relativa al desplazamiento lateral proporcional al peso de la estructura y inversamente proporcional al radio de curvatura, uno de los elementos de interés de estos dispositivos es su capacidad de proporcionar periodos y desplazamientos largos manteniendo su capacidad portante.

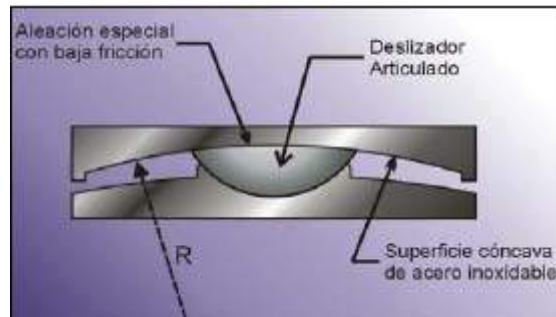


Figura.1 Esquema del sistema pendular friccionante (FPS).[∇]

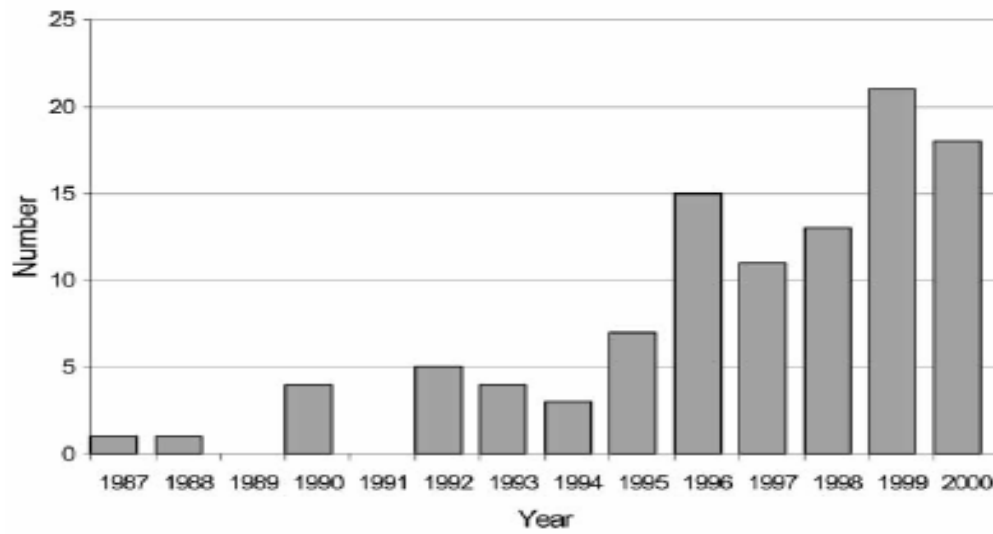


Figura 2. Implementación de sistemas de control pasivo en Norte América[®]

[∇] Javier ZEVALLOS, Marcial BLONDET, Alejandro Muñoz. Estado del arte de la protección Sísmica

[®] Base Isolation Design guinline

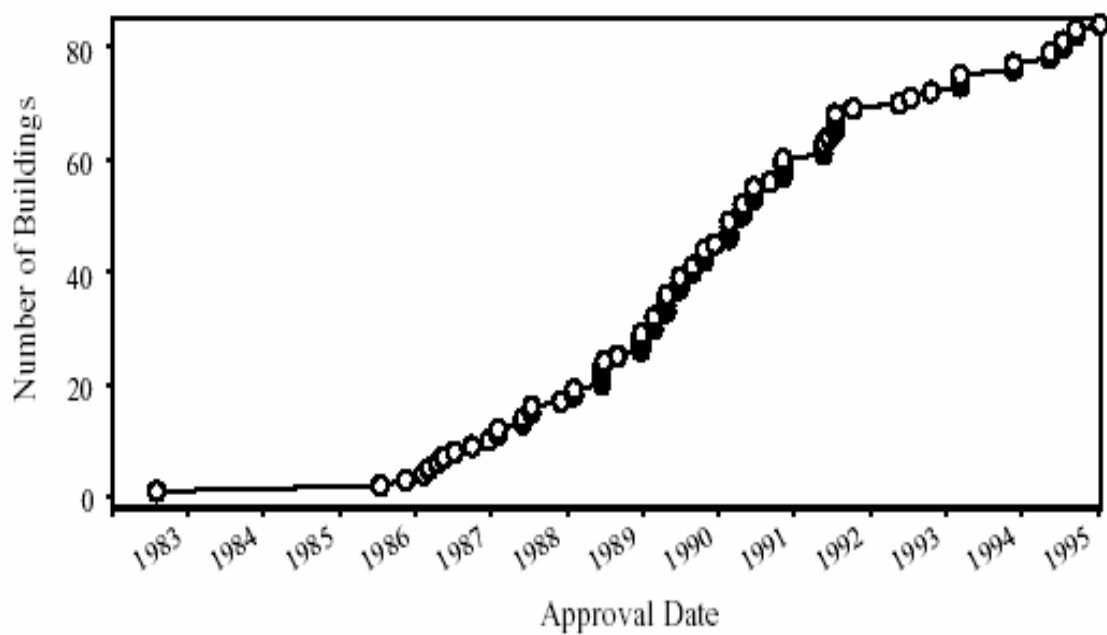


Figura 3. Aplicación de aisladores sísmicos en Japón antes de 1995

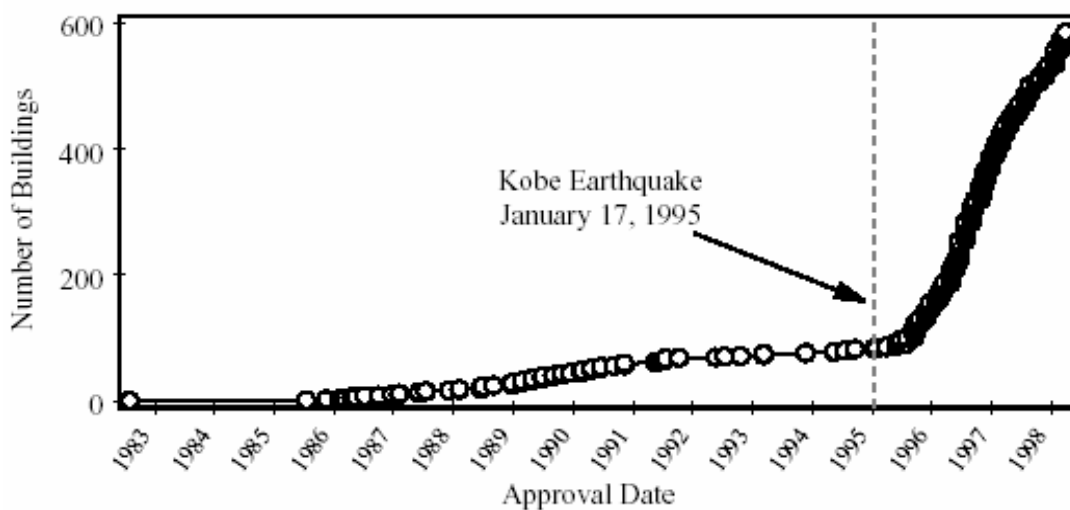


Figura 4. Aplicación de aisladores sísmicos en Japón antes y después de 1995

En la actualidad existen miles de estructuras construidas con los sistemas de reducción de vibraciones y un gran porcentaje de estas con aisladores y disipadores de energía, pero, en Colombia no se ha construido una estructura con aisladores. Además se han modelado algunos edificios proponiendo la aplicación de aisladores para el diseño, realizados por universidades como la de los Andes, pero con malos resultados. De esta forma creemos que esta propuesta es viable en nuestro país, siendo los aisladores tema de nuestro estudio.

Edificaciones con Sistemas de Aisladores:



Figura 5. Clínica UC San Carlos, Chile



Figura 6. Aeropuerto Internacional de San Francisco

Estructura más grande aislada en el mundo



Figura 7: Abovenet, San Francisco

1.4 MARCO TEORICO

Durante el desarrollo del presente proyecto se citarán una serie de términos, conceptos y principios que están íntimamente relacionados con la modelación de estructuras, respuesta inelástica de los elementos estructurales y sistemas de protección sísmica, los cuales serán utilizados posteriormente para definir y calificar diferentes patrones de comportamiento de las estructuras y elementos estructurales en particular.

1.4.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

1.4.1.1 Ductilidad

Capacidad que tiene un material estructural de resistir, sin fallar, deformaciones que le lleven más allá del límite elástico, o límite hasta donde las deformaciones son linealmente proporcionales al esfuerzo o fuerza aplicada (ley de Hooke). Dependiendo del parámetro que describe las deformaciones, la ductilidad puede hacer referencia a:

- ***ductilidad de curvatura:*** Ductilidad que se mide con respecto a la curvatura de la sección del elemento estructural. Se define como el cociente entre el momento flector aplicado y la rigidez de la sección,

- ***ductilidad de rotación:*** Esta se mide con respecto a la rotación que tiene un sector longitudinal del elemento estructural. La rotación se define como la pendiente de la línea elástica del elemento medida con respecto a la posición original del eje longitudinal del mismo.
- ***ductilidad de desplazamiento:*** Cuando la ductilidad se mide con respecto al desplazamiento o deflexión que tiene el elemento estructural. El desplazamiento se mide con respecto a la posición original del eje longitudinal del elemento.
- ***ductilidad de deformación:*** Esta se mide con respecto a la deformación unitaria de una fibra paralela al eje neutro de la sección.

1.4.1.2 Deriva

Generalmente cuando se presenta un sismo, algunos de los efectos asociados a los desplazamientos horizontales de la estructura son: daños a elementos que no hacen parte del sistema de resistencia sísmicas, tales como muros divisorios, particiones, enchapes, acabados, instalaciones eléctricas, mecánicas, etc., deformación inelástica de los elementos estructurales y no estructurales, alarma en las persona dentro de la

edificación, inestabilidad global de la estructura y en algunos casos colapso total.

Debido a lo anterior estos desplazamientos si llega ser de gran magnitud se consideran indeseables para el funcionamiento de la estructura. Para garantizar un adecuado comportamiento de la edificación y su contenido las Normas Sismo-Resistentes Colombianas NSR 98 establecen que durante el diseño se realice un estricto chequeo del desplazamiento horizontal relativo entre dos pisos o niveles consecutivos de la edificación (deriva), con el fin de que este no supere el uno por ciento de la altura libre entre los dos pisos consecutivos.

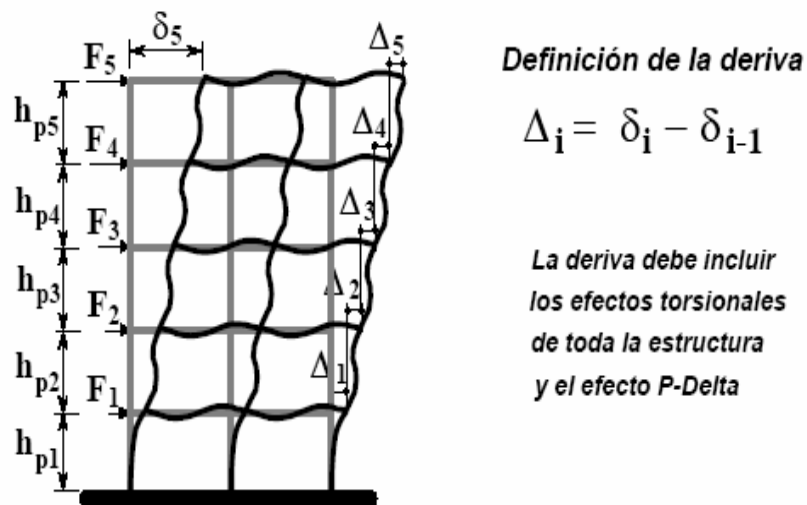


Figura 8. Definición de la Deriva®

1.4.1.3 Capacidad de disipación de energía

Es la capacidad que tiene un elemento estructural, de trabajar dentro del rango inelástico de respuesta sin perder su resistencia. Se cuantifica por medio de la energía de deformación que el elemento estructural dentro del rango inelástico es capaz de disipar en ciclos de histéresis consecutivos. Cuando se hace referencia al sistema de resistencia sísmica, se define por medio del coeficiente de capacidad de disipación de energía **R**. El grado de capacidad de disipación de energía se clasifica en nuestro país según la NSR-98 como especial (DES), moderado (DMO) y mínimo (DMI).

La filosofía del diseño sismorresistente actual permite que la mayor parte de la energía inducida por el sismo a la estructura sea disipada por medio de energía histerética, por lo tanto, en la estructura existirán importantes demandas de deformación inelástica que se traducirán en diferentes niveles de daño tanto en elementos estructurales y no estructurales.

Los sistemas de reducción de vibraciones establecen mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras basándose fundamentalmente en la reducción de la energía de entrada a la estructura, o incrementando la

capacidad de disipación de energía. La disminución de la energía de entrada se puede lograr por medio del aislamiento sísmico.

Los Aisladores sísmicos reducen el efecto de los sismos sobre la estructura. Estos son dispositivos que absorben mediante deformaciones elevadas la energía que un movimiento sísmico transmite a una estructura. Estos dispositivos pueden ser de diferentes tipos y formas, los mas conocidos son los basados en goma de alto amortiguamiento, goma con núcleo de plomo, neoprenicos o friccionales. Al utilizar estos elementos, la estructura sufre un cambio en la forma como se mueve durante un sismo y una reducción importante de las fuerzas que actúan sobre ella durante un sismo.

1.4.1.4 Coeficiente de capacidad de disipación de energía, R

Coeficiente que se prescribe para cada sistema estructural de resistencia sísmica, cuyo valor depende del tipo de sistema estructural y de las características de capacidad de disipación de energía propias del material estructural que se utiliza en el sistema. Es una medida de la capacidad de disipación de energía general del sistema de resistencia sísmica cuando los movimientos sísmicos hacen que responda inelásticamente.

1.4.1.5 Espectro de diseño

Se define como el espectro correspondiente a los movimientos sísmicos de diseño. La norma colombiana de diseño y construcción sismorresistente NSR 98, en la figura A.2-4 establece la forma del espectro elástico de aceleraciones para un coeficiente elástico de amortiguamiento crítico del cinco por ciento (5%), que se debe utilizar en el diseño. En el espectro de diseño se encuentran incluidas algunas consideraciones sobre:

- Generalmente, se considera una probabilidad de excedencia del sismo de diseño del 10% en un período de vida media útil del edificio de 50 años.
- Las frecuencias dominantes y respuestas máximas. Normalmente, los espectros de sismos exhiben sectores estrechos de frecuencias donde se encuentran las respuestas máximas.

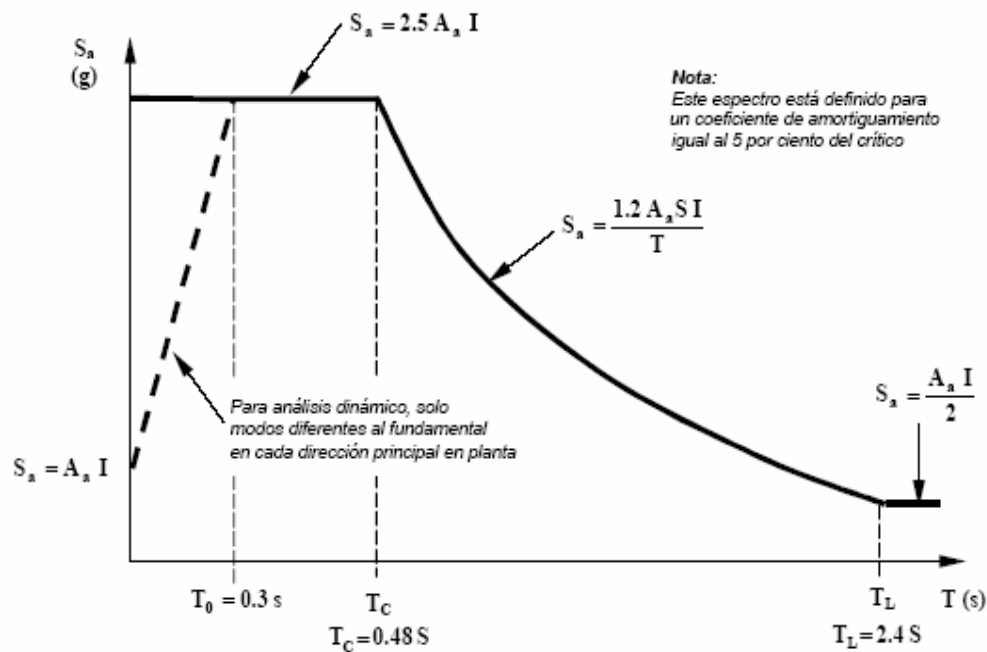


Figura 9. Espectro Elástico de diseño®

1.4.1.6 Sismo Artificial

Es el registro sísmico producido analíticamente con propiedades especiales referentes a ciertas características del estudio que se esté realizando. En nuestro caso particular es compatible con el espectro de aceleración de la norma NSR-98.

1.4.1.7 Compatibilización de espectros

Es cuando se crea un sismo artificial que tiene la propiedad específica de que al realizar un espectro de respuesta, este sea compatible con el espectro guía de donde se inició el estudio.

® NSR-98

1.4.1.8 Respuesta histerética

Cuando a un material se le impone una serie de ciclos de carga, descarga y carga en el sentido opuesto; en los cuales los esfuerzos sobrepasan el límite elástico del material, se obtiene el comportamiento que se muestra en la figura 10. La histéresis es un fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que dependen de la historia del comportamiento previo. Por lo tanto, hace referencia al comportamiento del material estructural cuando se ve sometido a deformaciones o esfuerzos alternantes que están fuera del rango de respuesta lineal, o elástica, ante una sollicitación; ya sea de fuerza o de deformación impuesta. Una gran parte de la energía que es capaz de disipar el material estructural en el rango inelástico de respuesta se asocia con el área comprendida en los ciclos de histéresis.

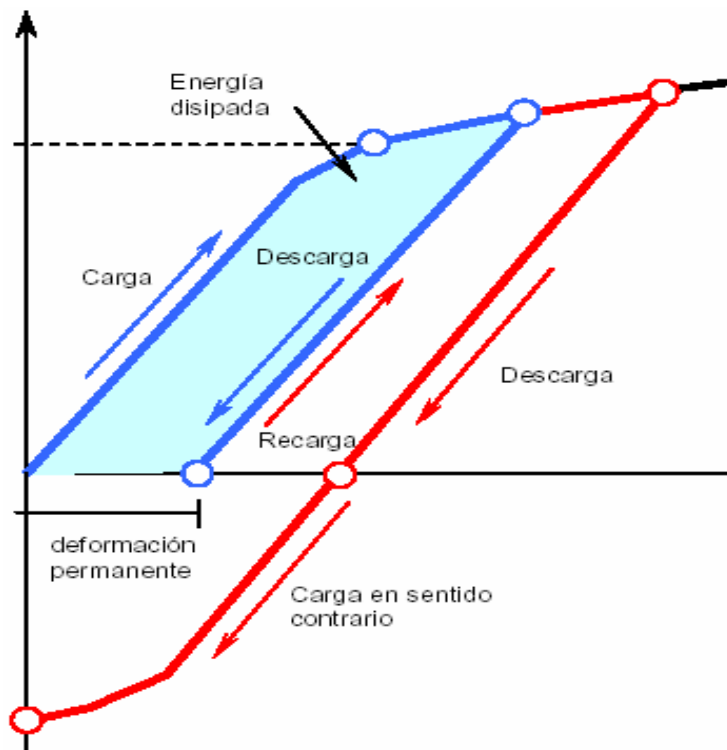


Figura 10. Efecto de carga y descarga, con inversión del sentido de la fuerza

1.4.1.9 Aislador

Elemento estructural del sistema aislación que es horizontalmente flexible y verticalmente rígido y que permiten grandes deformaciones laterales bajo sollicitaciones sísmicas. Es un elemento que puede utilizarse como parte del, o adicionalmente al, sistema de carga gravitacional de la estructura.

1.4.1.10 Amortiguamiento efectivo

Es el valor de la razón de amortiguamiento viscoso equivalente que se obtiene de la energía disipada para respuesta cíclica del sistema de aislación.

1.4.1.11 Desplazamiento de diseño

Es el desplazamiento lateral producido por el sismo de diseño, excluyendo el desplazamiento debido a la torsión natural accidental, requerido para el diseño del sistema de aislación.

1.4.1.12 Desplazamiento Máximo

Es el desplazamiento lateral provocado por el sismo máximo posible, excluyendo el desplazamiento adicional debido a torsión natural y accidental, requerida para el diseño del sistema de aislación o de algún elemento de él.

1.4.1.13 Desplazamiento Total Máximo

Es el desplazamiento lateral máximo provocado por el sismo máximo posible incluyendo desplazamientos adicionales debido a torsión natural y accidental, requerida para la verificación de la estabilidad del sistema de aislación, o elementos de él, para el diseño de las separaciones entre edificios, y para los ensayos bajo carga vertical de los prototipos de los aisladores.

1.4.1.14 Interfaz de Aislación

Es el espacio generado por el sistema de aislación que se encuentra limitado en su parte superior por la estructura que está aislada (superestructura), y en su parte inferior por la estructura que se mueve con el suelo (subestructura).

1.4.1.15 Rigidez Efectiva o Secante

Es el valor de la fuerza lateral que se genera en el sistema de aislación, o en un elemento de él, dividido por el correspondiente desplazamiento lateral.

1.4.1.16 Sismo de Diseño (SDI)

Es el nivel del movimiento sísmico del suelo que tiene como mínimo el 10 % de la probabilidad de excedencia en 50 años.

1.4.1.17 Sismo Máximo Posible (SMP)

Es el nivel máximo del movimiento del suelo que puede esperarse en el lugar de la edificación dentro del esquema geológico conocido.

1.4.2 SISTEMAS INELÁSTICOS.

La gran mayoría de los materiales estructurales muestran dentro del rango de esfuerzos utilizados en la práctica, en alguna medida, características inelásticas. Algunos materiales como el concreto son inelásticos en casi todo el rango útil de esfuerzos. Adicionalmente, en la respuesta de estructuras sometida a los efectos de sismos fuertes, éstas actuarán más allá del rango elástico, permitiendo que parte de la energía que impone el movimiento sísmico se pierda como energía disipada, disminuyendo las fuerzas inerciales a las que se va a ver sometida la estructura.

Un aspecto importante en la capacidad de un material de responder dinámicamente en el rango inelástico esta asociado con la ausencia de modos frágiles de falla. Cuando se presenta una falla frágil, se viola la premisa básica que un sistema estructural “sobreviva a la excitación dinámica”. Por esta razón se buscan maneras de disponer y diseñar materiales estructurales que respondan dinámicamente en el rango inelástico, sin pérdidas graves de resistencia y estabilidad del sistema estructural.

1.4.2.1 Comportamiento en el rango inelástico de materiales estructurales.

A diferencia de los sistemas elásticos, no existe una manera específica de describir el comportamiento inelástico de todos los materiales estructurales, es por esta razón; que se explica el comportamiento en el rango inelástico para cada uno de estos materiales.

1.4.2.1.1 Concreto estructural

El concreto reforzado es la unión de dos materiales con propiedades mecánicas totalmente diferente como se muestra en la figura 11.

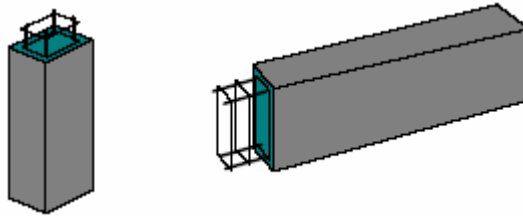


Figura 11. Concreto estructural®

Para explicar el comportamiento histeréticos de elementos en concreto reforzado, se aplicó una serie de cargas alternantes sobre una viga en voladizo, con refuerzo longitudinal simétrico (figura 12(a)).

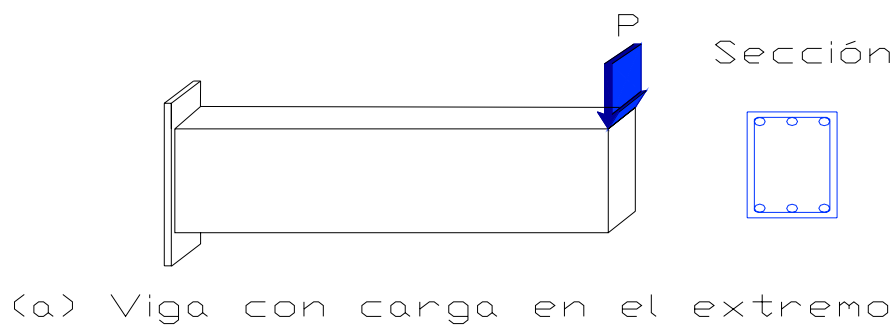


Figura 12. Viga en voladizo cargada en el extremo

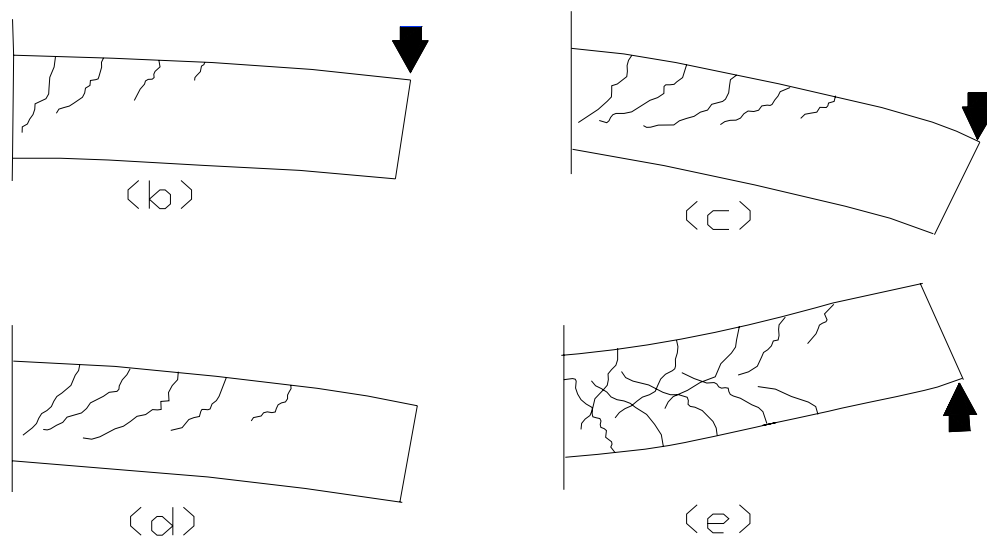


Figura 13. Agrietamiento de las vigas en voladizo

En el primer cuarto de ciclo de carga se observa que existe una relación lineal con pendiente EI_g hasta que el concreto alcanza el momento de agrietamiento M_{cr} (figura 13). En este periodo se presentan tres etapas bien definidas: 0-1, 1-2, 2-3. La etapa 0-1 muestra la respuesta de la viga antes que aparezcan fisuras en el apoyo del voladizo en la zona a tensión. La

perdida de la rigidez del elemento, se inicia con la aparición de la primera fisura. La disminución de rigidez se presenta en mayor cantidad al inicio (al acercarse al punto 1) y va disminuyendo gradualmente (cerca del punto 2) a medida que continúe el ciclo de carga, esto es generado por la fisuración del concreto, aparición de deformaciones en el rango inelástico, la reducción de la zona de compresión al subir la localización del eje neutro de la sección y del resbalamiento debido a la disminución de la adherencia al concreto.

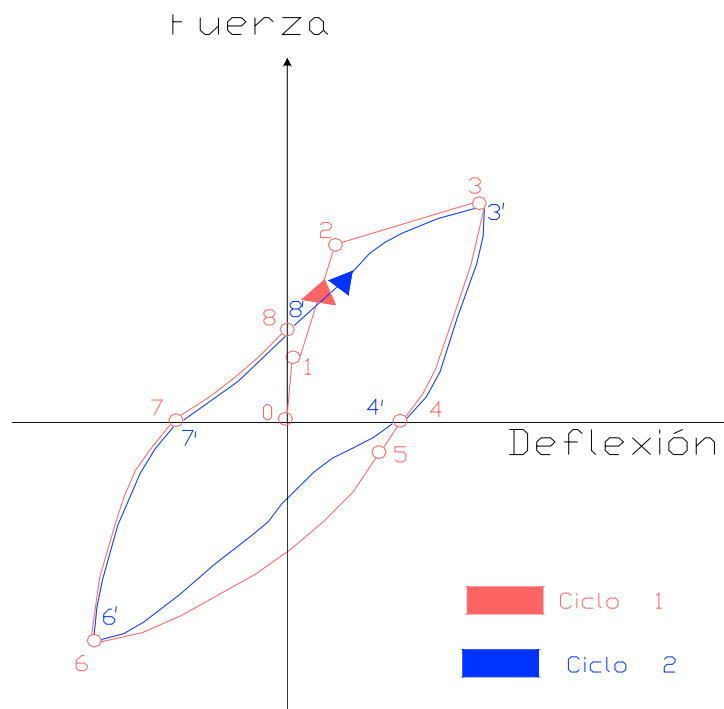


Figura 14. Respuesta histerética elemento de concreto

En el punto 2 el acero de refuerzo a tensión alcanza la fluencia llegando a F_y . en este punto la viga ya tiene una serie de microfisuras de diferente longitud (figura 13(b)). A medida que la deformación se aumenta más allá del punto 2,

se presentan incrementos importantes en la deformación por un pequeño aumento en la carga aplicada.

El elemento a partir de estas etapas sufre cambios en la sección de inercia constante, presentándose un elemento de sección variable. En la Norma Sismo Resistente Colombianas NSR-98 en la tabla C.8-1 “Propiedades de rigidez para el análisis”, establecen que para determinar las deformaciones a nivel de resistencia, es recomendable que la rigidez **EI** represente la rigidez de los elementos en el estado inmediatamente anterior a la falla, especialmente si las deflexiones obtenidas por medio del análisis se utilizan para predecir la deformación de la estructura en el estado de falla inminente. Para vigas corresponde a **0.35 I_g** y para columnas de **0.7I_g**.

En el punto 3 las fisuras se hacen mayores en una distancia igual a la altura del elemento, a partir del apoyo del voladizo (figura 13(c)). Generalmente se presenta un descacaramiento del concreto en la fibra extrema a compresión, cerca al apoyo. La disminución de la rigidez se hace aun más fuerte en este punto. En el acero de refuerzo se presenta un endurecimiento por deformación. Esta deformación se invierte en el punto 3, disminuyéndose los esfuerzos en el acero de refuerzo, el cual tiende a volver a su posición inicial, y el concreto, reduciéndose igualmente la carga y deflexión.

En el punto 4 el elemento tiene una deformación permanente, las fisuras son visibles, aunque tiene un espesor pequeño, si es que no se han cerrado completamente. El punto 4 es un punto de inversión de carga, la zona inferior del elemento ahora esta sometido a tensión. La viga es casi tan rígida como al inicio ya que el concreto esta intacto en esa zona. Por esta razón la curva procede al punto 5, en este punto se produce la fisuración de por tensión en la parte inferior de la viga (figura 13(e)).

La curva entre los puntos 5 y 6 dependen de una interacción compleja entre las propiedades de esfuerzo y deformación del acero de refuerzo, la cuantía de refuerzo longitudinal y la distribución y ancho de las fisuras existentes. En el punto 6 ocurre una inversión arbitraria del sentido de las deformaciones hacia el punto 7 donde se presenta una deformación permanente, similar al punto 4, pero en dirección contraria. A medida que la carga aumenta del punto 7 al 3', se pasa por el punto 8 dando fin al primer ciclo de carga e iniciando el segundo (figura 14). Entre el punto 8 y 3' el elemento resiste la carga con una respuesta que manifiesta menor rigidez, que la del primer ciclo, esto se debe a un ablandamiento del acero de refuerzo por haberlo cargado cíclicamente en tensión y compresión.

En algunos elementos de concreto reforzado, a pesar de tener ciclos de histéresis estables, la cantidad de energía disipada se puede ver afectada por el estrangulamiento, que se presentan debido a que no se cierran las fisuras del ciclo de carga anterior (figura 15).

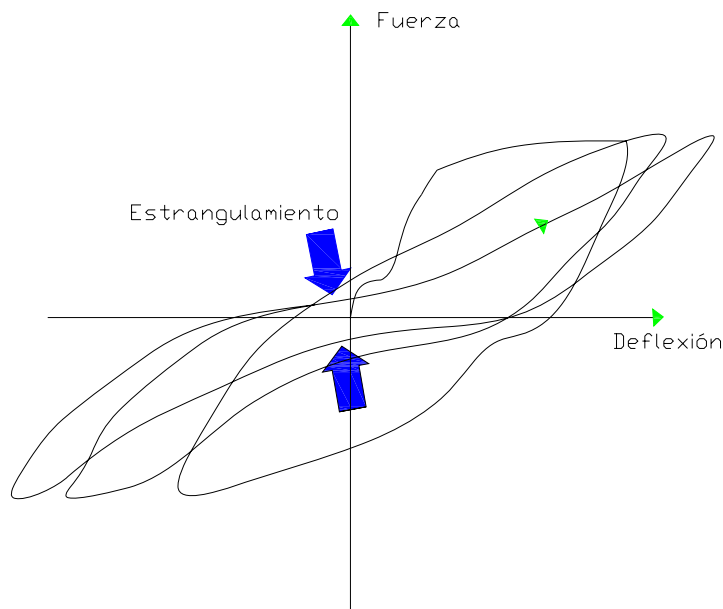


Figura 15. Efecto de estrangulamiento

1.4.2.1.2 Acero estructural

A diferencia del concreto reforzado, el comportamiento histerético del acero es mucho más simple y estable. Todas las bondades del acero como material son transmitidas a los elementos contruidos con él. La desventaja del acero es que se debe ser cuidadoso en determinar secciones estables (secciones compactas) en el rango inelástico y la forma de construcción de las juntas

entre elementos, especialmente cuando sean diseñadas para resistir momentos.

Para explicar el comportamiento histerético de elementos en acero estructural, al igual que en el concreto, se aplicó una serie de cargas alternantes sobre una viga en voladizo (figura 16(a)). En la figura 16(b) se muestran ciclos de histéresis muy estables, aún después de varios ciclos de carga y descarga, en la viga cuando tiene una conexión soldada a la columna de apoyo.

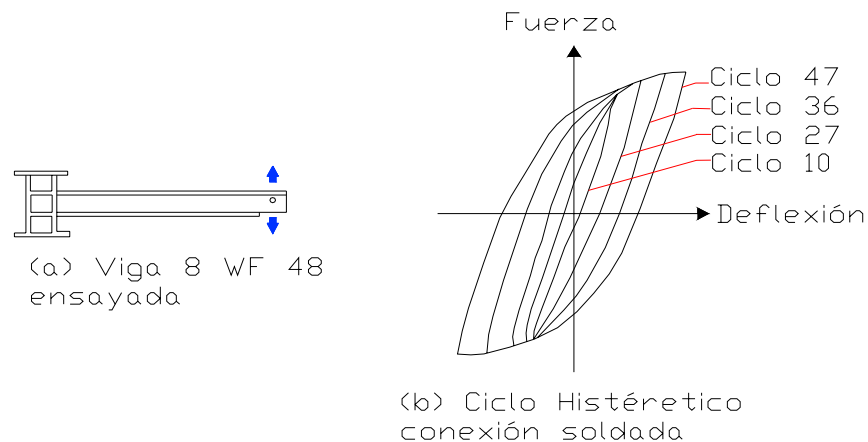


Figura 16. Respuesta histerética elemento en acero

El tipo de problemas detectados se basan en:

- El uso de estructuras aporticadas resistentes a momentos, con conexiones soldadas.

- El uso de estructuras construidas con perfiles ensamblados utilizando platina soldada.
- Uso de elementos en celosía dentro de estructuras que conformen pórticos resistentes a momento.

1.4.3 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VIBRACIONES

El control estructural ante acciones sísmicas se considera como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, basado en la ductilidad y el hiperestatismo estructural. Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de los desplazamientos de una estructura haciendo uso de alguna o varias facultades, como:

1. La disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos.
2. La variación de las propiedades dinámicas del edificio, de forma que éste reduzca su respuesta o evite actitudes resonantes.
3. Introducen fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

1.4.3.1 Clasificación

Los sistemas de control de vibraciones están divididos en cuatro subgrupos según sus propiedades, formas de funcionamiento, condiciones de trabajo, forma de respuesta ante acciones sísmicas y como alteran las propiedades dinámicas de la estructura.

Una primera clasificación permite hablar de sistemas de control pasivo, sistemas de control activo, sistemas de control semiactivo y sistemas de control híbrido (ver figura 17). Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas, no precisan de aporte energético para su funcionamiento. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controladores a tiempo reales y dispositivos sensores instalados en la estructura. Estos elementos trabajan conjuntamente a través de un algoritmo de control de la respuesta estructural en bucle cerrado.

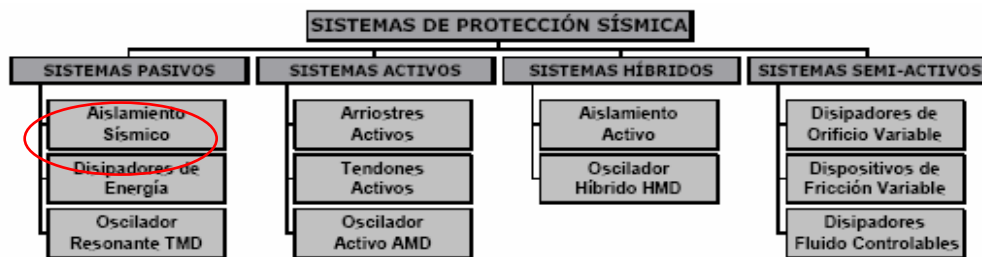


Figura 17. Sistemas de protección sísmica[∇]

[∇] Javier ZEVALLOS, Marcial BLONDET, Alejandro Muñoz. Estado del arte de la protección Sísmica

1.4.3.1.1 Sistemas de control pasivo

Los dispositivos pasivos son elementos de carácter netamente reactivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentren. Son sistemas que intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural. Entre sus ventajas se encuentra su competitividad económica y la robustez de su comportamiento. Los sistemas de control pasivo pueden clasificarse en (Jara, 1994):

- a) sistemas de aislamiento de base
- b) sistemas disipadores
- c) sistemas inerciales acoplados.

1.4.3.1.1.1 Sistemas de control pasivo con aislamiento en la base

El aislamiento se consigue a partir de dispositivos flexibles a los movimientos horizontales y rígidos al desplazamiento vertical, situados entre los cimientos y la superestructura. Se fundamenta en desacoplar la estructura del movimiento del suelo para proteger a ésta de los efectos del terremoto. Su presencia alarga el período fundamental de la estructura, con lo cual desacopla de forma parcial la superestructura del movimiento del terreno y

limita su entrada de energía cinética. Este sistema es recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos firmes.



(b)

(a)

Figura 18. a) Aisladores de goma con núcleo de plomo b) Aisladores de goma[∇]

1.4.3.1.1.2 Sistemas de control pasivo con disipadores de energía

En general se distingue dos clases de disipadores: histeréticos y viscoelásticos. En los dispositivos histeréticos su comportamiento dependen básicamente del desplazamiento y se basan en:

- a) la plastificación de metales por flexión, torsión, cortante o extrusión
- b) fricción entre superficies.

En los disipadores viscoelásticos su comportamiento depende fundamentalmente de la velocidad y pueden basarse en:

- a) sólidos viscoelásticos

[∇] Javier ZEVALLOS, Marcial BLONDET, Alejandro Muñoz. Estado del arte de la protección Sísmica

b) fluidos conducidos a través de orificios

c) fluidos viscoelásticos.

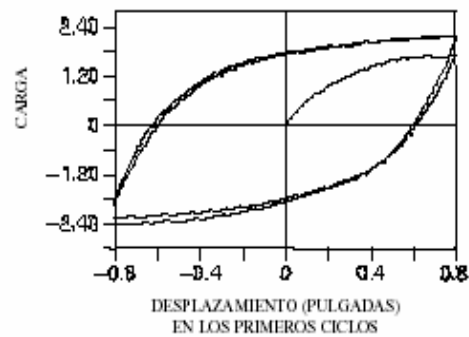
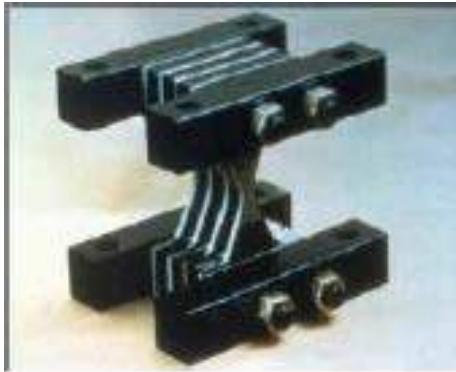


Figura 19. a) Disipador tipo ADAS. b) Respuesta histerética en los primeros ciclos de carga®

1.4.3.1.1.3 Sistemas de control pasivo mediante sistemas inerciales acoplados "Tuned mass damper" (TMD)

Habitualmente se instala en la parte superior de los edificios. La masa y la rigidez del muelle se determinan de forma que la frecuencia de oscilación sea la misma que la frecuencia fundamental de la estructura. Este tipo de sistemas consta de los siguientes componentes:

a) un oscilador de un grado de libertad

b) un mecanismo de muelle

® Tesis Doctoral, universidad Politecnica de Cataluña. Chais, X (2000)

c) un mecanismo de amortiguamiento.

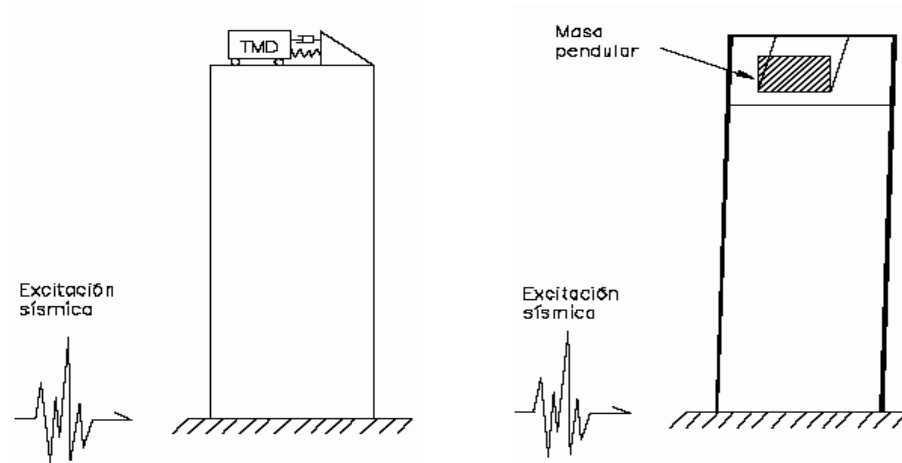


Figura 20. Ilustración de los dispositivos de los TMD

El TMD se ha demostrado efectivo para reducir la vibración del viento y también para resistir fuerzas sísmicas. La mayor desventaja del TMD es que requiere una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación.

1.4.3.1.2 Sistemas de control activo

Un sistema de control estructural activo tiene la configuración básica mostrada en la figura 21. Consiste en:

a) Sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, variables de la respuesta estructural o de ambos tipos.

b) Sistemas controladores que, los cuales se basan en las medidas de los sensores y a través de un algoritmo de control, calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos

c) Actuadores, habitualmente alimentados por fuentes de energía externas, para ejercer las fuerzas.

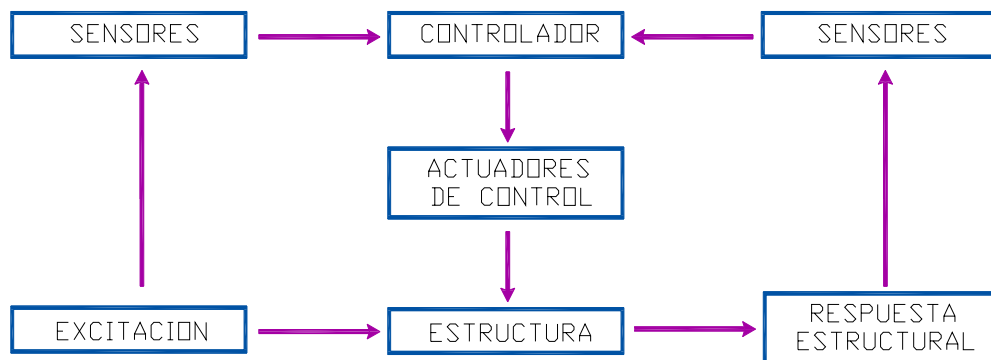


Figura 21. Esquema de funcionamiento sistemas de control activo.

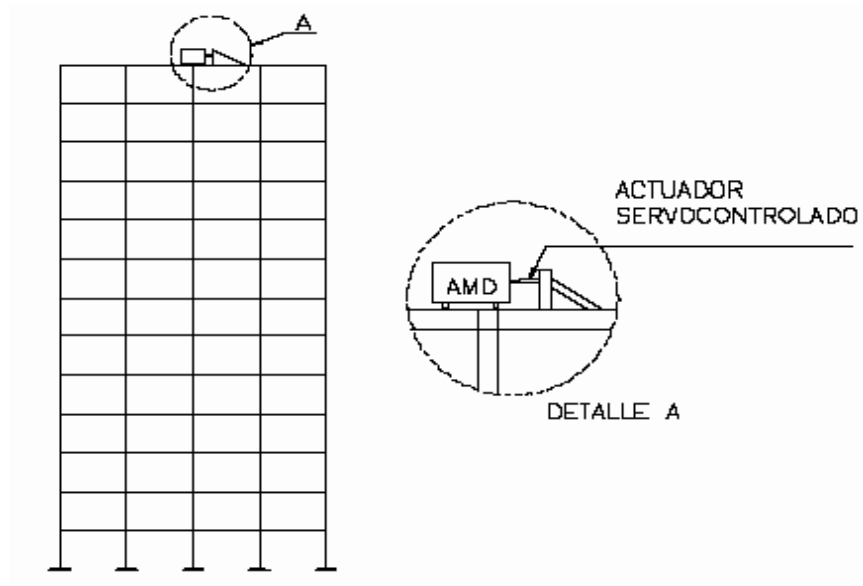


Figura 22. Edificio con control de desplazamiento mediante AMD

1.4.3.1.3 Sistemas de control semiactivo

Los sistemas semiactivos tienen un esquema de funcionamiento (figura 23) muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de éstos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos.

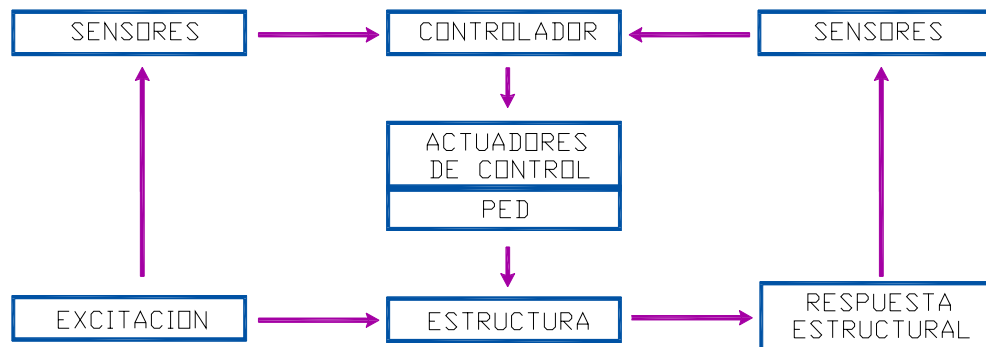


Figura 23. Esquema de funcionamiento de un sistema de control semiactivo.

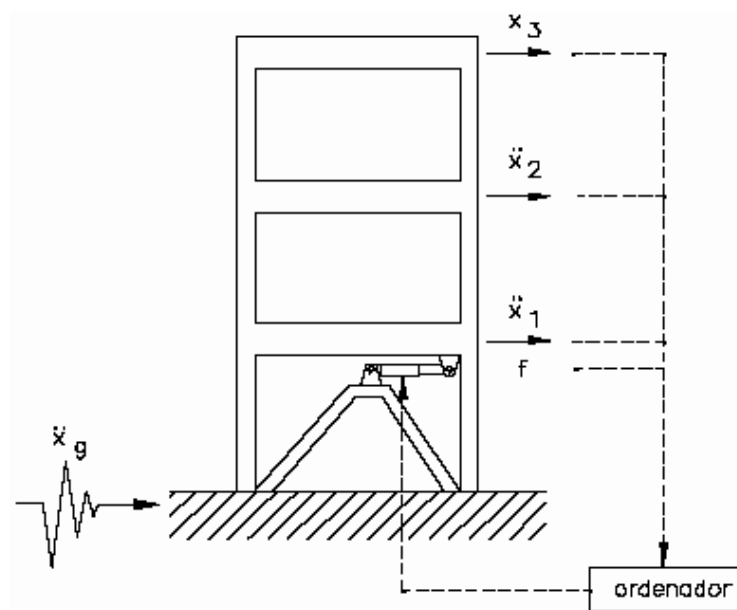


Figura 24. Control estructural semiactivo mediante amortiguador MR

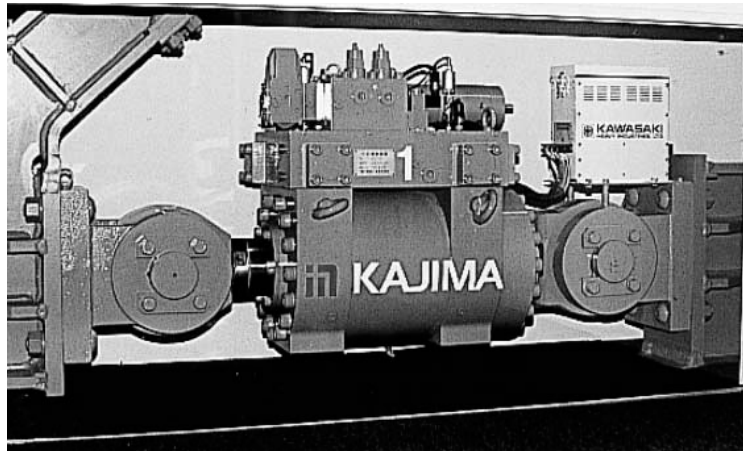


Figura 25. Esquema de amortiguador MR

1.4.3.1.4 Sistemas de Control Híbrido

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y pasivos (figura 26). Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen mejoras con relación a los activos:

- a) En caso de fallo del componente activo, y aunque de forma menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control.
- b) Los requerimientos energéticos son inferiores. Dos de los sistemas híbridos que han despertado mayor interés son el HMD (*"Híbrid Mass Damper"*) y el aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base.

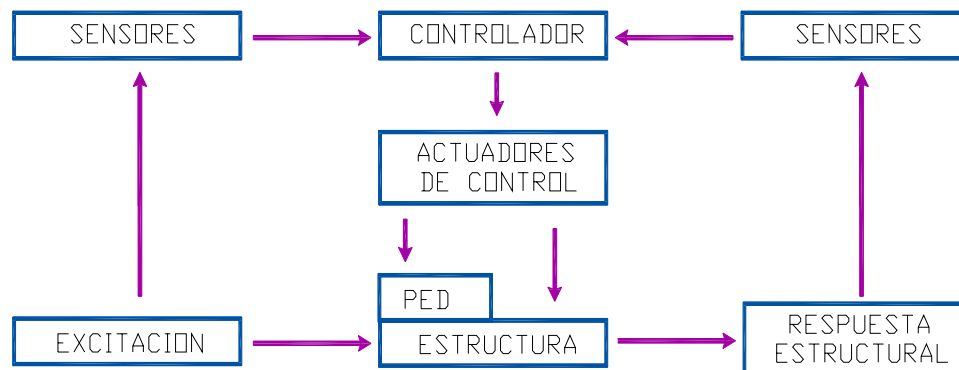


Figura 26. Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido.

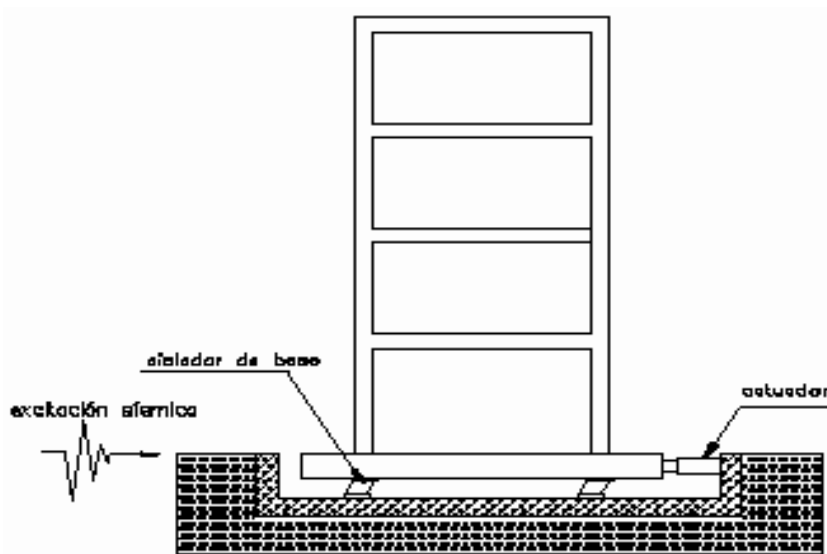


Figura 27. Aislamiento de base con control activo del desplazamiento.

1.4.4 Normativa para el Análisis y Diseño

En la NSR – 98 se establece en el título A Se permite el empleo de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los tres documentos siguientes:

- ❖ “*NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings – Provisions and Commentary*”, 1994 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 222A, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., USA, May 1995,
- ❖ “*Uniform Building Code - 1997*”, UBC-97, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, USA, April 1997.

Para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, este proyecto se basará en el código Chileno más exactamente la ACHISINA (Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica), la cual se basa en la UBC-97 (*Uniform Building Code*) y la Fema

1.4.5 Filosofía de los requerimientos de diseño para edificios aislados

El objetivo de una estructura aislada no solo involucra la protección de la vida durante un sismo severo si no también la reducción del daño de las edificaciones y sus contenidos. De tal manera, los requerimientos de este sistema es la unión de estos dos objetivos:

1. la protección de la vida.
2. la reducción del daño.

Estos requerimientos definen dos niveles sísmicos, un nivel sísmico de diseño (SDI) y un nivel sísmico máximo posible (SMP).

El sismo de diseño coincide con el nivel utilizado comúnmente en el diseño de estructuras convencionales consistente en la probabilidad de excedencia de 10% en 50 años y para el sismo máximo posible corresponde al máximo movimiento del suelo que puede ocurrir dentro del marco geológico conocido y ha sido definido como el nivel que tiene una probabilidad de excedencia de una 10% en un periodo de 100 años.

Para el diseño de estructuras aisladas se requiere que el sistema de aislamiento sea capaz de sostener las deformaciones y cargas correspondientes al SMP sin fallas. Análogamente, cualquier sistema que cruce la interfaz de aislamiento debe ser diseñado para acomodar el desplazamiento correspondiente al SMP.

De acuerdo con los requerimientos indicados, el diseño de una estructura cumple con los siguientes objetivos de desempeño:

1. resistir sismos pequeños y moderados sin daño en elementos estructurales, componentes no estructurales y contenidos del edificio.
2. resistir sismos severos sin que exista: a) fallas del sistema de aislación, B) daño significativo a los elementos estructurales, c) daño

masivo a elementos no estructurales, d) interrupción de la operabilidad de la estructura.

1.4.6 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS¹

1.4.6.1 CRITERIO DE SELECCIÓN

1.4.6.1.1 Bases de Diseño

El procedimiento y limitaciones para el diseño de estructura con aislación sísmica deben determinarse considerando la zona, características del lugar, aceleración vertical, propiedades de las secciones agrietadas de los elementos de hormigón y mampostería, destino, configuración, sistema estructural y altura.

1.4.6.1.2 Estabilidad Del Sistema De Aislación

La estabilidad de los elementos del sistema de aislación sujetos a cargas verticales debe verificarse por análisis y ensayos, según se requiera, para desplazamiento sísmicos laterales iguales al desplazamiento máximo total.

En general los sistemas de aislación que se consideran adecuado deben:

1. Permanecer estables para el desplazamiento de diseño requerido.

¹ Procedimiento de análisis, Tomado de la ACHISINA (Asociación de Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica).

2. Proveer una resistencia que no decrezca con un aumento en el desplazamiento.
3. No degradarse en rigidez y resistencia bajo carga cíclica.
4. Poseer una relación constitutiva fuerza deformación que este bien definida y sea repetible.

1.4.6.1.3 Categoría De Destino

El factor de importancia, I , para una edificación con aislación debe considerarse igual a 1.0 sin considerar la categoría de destino.

La razón por la cual el factor de importancia es igual a 1.0, es porque el objetivo de desempeño del diseño es siempre lograr funcionalidad luego del sismo, no tiene sentido diferenciar por concepto de uso entre estructuras.

1.4.6.1.4 Selección De Procedimiento De Respuesta

1.4.6.1.4.1 Análisis estático

El procedimiento de análisis estático lateral equivalente puede utilizarse para el diseño de una estructura con aislación sísmica siempre que:

1. La estructura esté ubicada a más de 10 kilómetros de todas las fallas activas las cuales son aquellas capaces de generar sismos que puedan controlar el diseño de la estructura.
2. La estructura esté ubicada en suelo tipo I o II.
3. La estructura tenga una altura equivalente a 4 pisos o menor que 20 metros.
4. El periodo efectivo de la estructura aislada, T_M , sea menor igual a 3.0 segundos.
5. El periodo efectivo de la estructura aislada, T_D , sea mayor a 3 veces el periodo elástico de base fija de la superestructura.

6. La superestructura tenga una configuración regular.

7. Que esté definido por los siguientes atributos:

- ✚ La rigidez efectiva del sistema de aislación para el desplazamiento de diseño es mayor que un tercio de la rigidez efectiva a un 20% del desplazamiento de diseño.
- ✚ El sistema de aislación tiene la capacidad de producir una fuerza restitutiva.
- ✚ El sistema de aislación tiene propiedades de fuerza – deformación que son independiente de la velocidad de carga.
- ✚ El sistema de aislación tiene propiedades de fuerza – deformación que son independiente a las cargas verticales y efectos de sollicitaciones bidireccionales.
- ✚ El sistema de aislación debe permitir alcanzar el desplazamiento sísmico máximo posible y no menos de 1.2 veces el desplazamiento total de diseño.



1.4.6.1.4.1 Análisis Dinámico

Debido a que suelos blandos tienden a producir espectro de respuesta con amplificaciones importantes en bandas angosta de frecuencia, es esencial poder caracterizar estas bandas para poder evitar que las frecuencias de diseño de la estructura aislada coincidan con las predominantes del suelo.

Esto debe utilizarse como especifica a continuación:

1. Análisis Espectral

El análisis espectral puede utilizarse para el diseño de una estructura con aislación sísmica siempre que:

-  La estructura esté ubicada en un tipo de suelo I, II o III.
-  El sistema de aislación esté definido por todos los atributos del ítem 7, para el análisis estático.

2. Análisis de Historia de Respuesta en el Tiempo

El análisis de historia en el tiempo puede utilizarse para el diseño de cualquier estructura con aislación sísmica y debe utilizarse para el diseño de todas las estructuras con aislación sísmica que no cumplan con los criterios anteriores del análisis estático y espectral.

1.4.6.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS ESTÁTICO

1.4.6.2.1 Característica De Fuerza -Deformación Del Sistema De Aislamiento:

Los desplazamientos y fuerzas mínimas de diseño provocados por sismos en estructuras aislados sísmicamente deben basarse en las características de fuerza deformación del sistema de aislación.

Dichas características deben incluir explícitamente los efectos que provoca el sistema para restringir los efectos del viento, si tal sistema se usa para cumplir con los requerimientos de diseño establecidos.

Característica de fuerza- deformación de los aisladores elastoméricos:

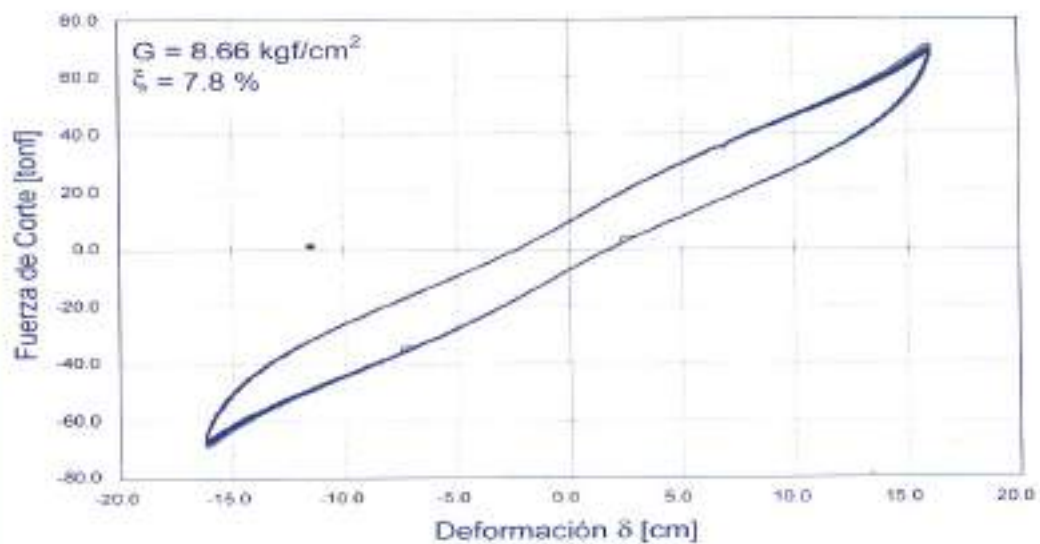


Figura 28. Curva fuerza- deformación, aislador de bajo amortiguamiento.®

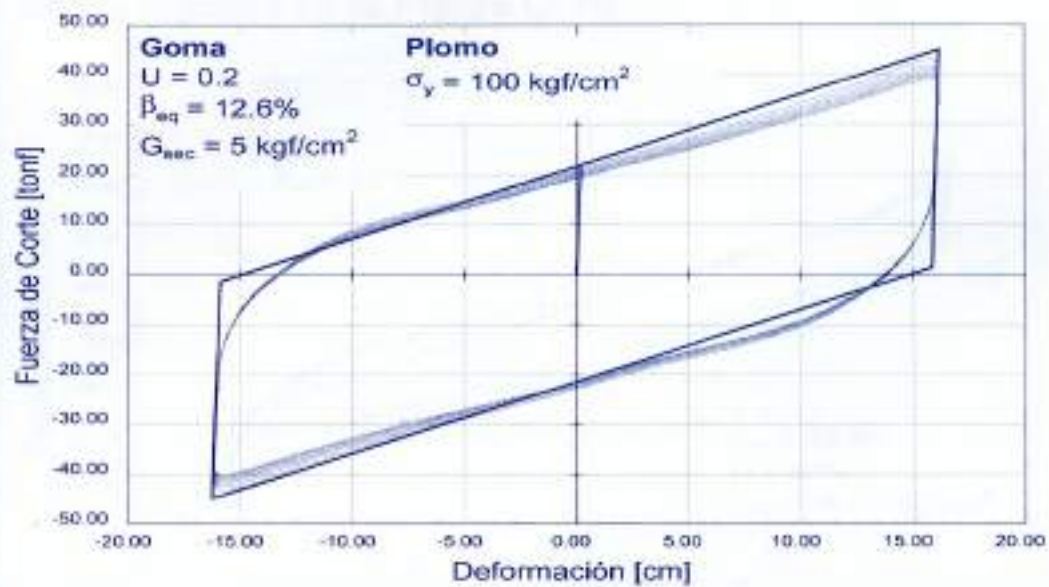


Figura 29. Curva fuerza- deformación, aislador con Corazón de plomo

® Tomado de la ACHISINA (Asociación de Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica.

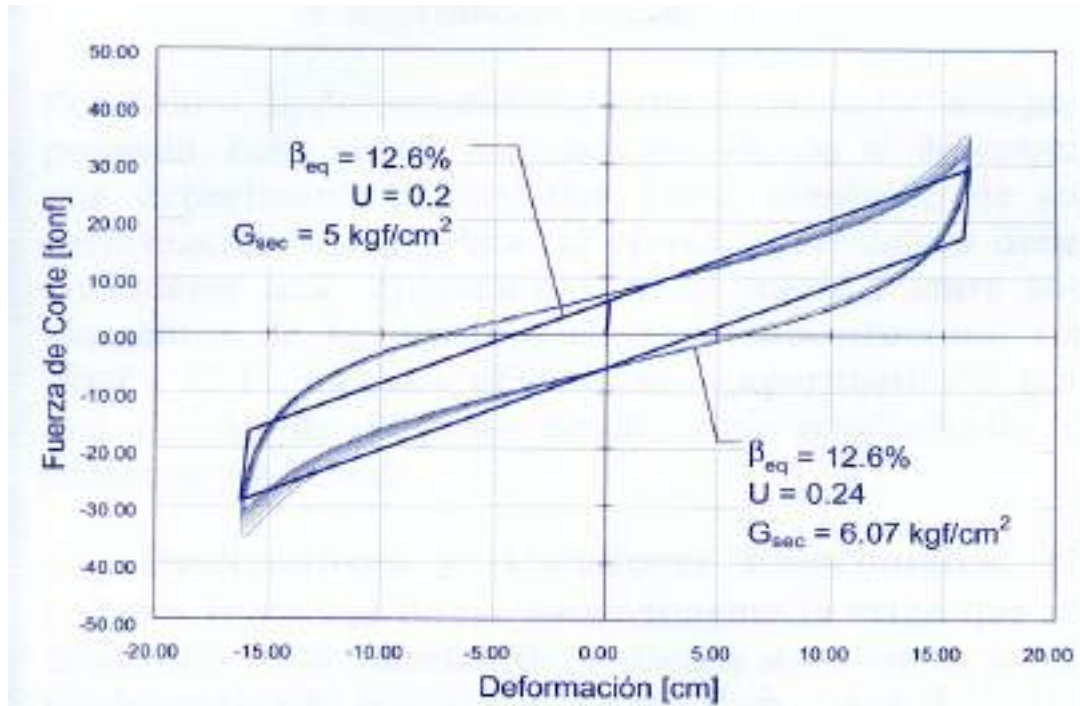


Figura 30. Curva fuerza- deformación, aislador de alto amortiguamiento

1.4.6.2.2 Desplazamientos Laterales Mínimos

🔧 Desplazamiento de diseño.

El sistema de aislación debe considerarse para soportar desplazamiento sísmicos laterales mínimos que actúen en la dirección de los dos ejes principales de la estructura según la formula

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$200 \times Z [mm] \quad \text{Para Suelo I y } T_D > 2 \text{ seg.}$$

$$C_D = 300 \times Z [mm] \text{ para Suelo II y } T_D > 2 \text{ seg.}$$

$$330 \times Z [mm] \text{ Para Suelo I y } T_D > 2 \text{ seg.}$$

B_D = Coeficiente de minoración por amortiguamiento

Z = Coeficiente de Mayoración

$$Z = \frac{3}{4} \text{ suelo I}$$

$$Z = 1 \text{ suelo II}$$

$$Z = \frac{5}{4} \text{ suelo III}$$

El desplazamiento entregado por la ecuación anterior se supone que ocurre en el centro de masa (CM) del sistema estructural. El coeficiente de reducción por amortiguamiento utilizado B_D ha sido determinado a partir de las razones entre los valores espectrales calculados para los registros compatibles Chilenos estas es una de nuestras limitaciones.

La ecuación anterior que asume la superestructura es rígida, provee una estimación conservadora del desplazamiento del sistema de aislación, debido a que la flexibilidad y deformación de la superestructura tienden hacer decrecer el desplazamiento del sistema de aislación.

Debido a que la estructura se encuentra en general en la zona de amplificación de desplazamiento, se ha definido un valor constante para el coeficiente sísmico de desplazamiento C_D .

El factor de respuesta por amortiguamiento B_D ² puede ser obtenido en forma conservadora a partir de la siguiente tabla obtenida de la **UBC-97**.

AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO <i>β_D o β_M</i> Porcentaje del valor critico	FACTOR B_D o B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Tabla 1. Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento UBC

Periodo efectivo correspondiente al desplazamiento de diseño

El periodo efectivo de la estructura aislada correspondiente al desplazamiento de diseño, T_D , debe determinarse usando las características de fuerza – deformación del sistema de aislación de acuerdo con la formula.

$$T_D = 2\pi \times \sqrt{\frac{W}{k_{D \min} g}} \quad \text{Ec. 2}$$

² Estos factores fueron obtenidos para 9 registros Chilenos compatibles con el SDI para tres tipos de suelo.

Esta ecuación describe una estimación del periodo de diseño. Esta ecuación se basa en la rigidez secante del sistema de aislación correspondiente al desplazamiento de diseño D_D . Esta estimación se basa conservadoramente en el menor valor de la rigidez efectiva, entregando el máximo valor del periodo efectivo.

Desplazamiento Máximo

El desplazamiento máximo del sistema de aislación, D_M , en la dirección horizontal más crítica debe calcularse de acuerdo con la formula siguiente:

$$D_M = \frac{C_M}{B_M} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$$C_M = \begin{cases} 200 \times M_M \times Z [mm] & \text{Para Suelo I y } T_D > 2 \text{ seg.} \\ 300 \times M_M \times Z [mm] & \text{para Suelo II y } T_D > 2 \text{ seg.} \\ 330 \times M_M \times Z [mm] & \text{Para Suelo I y } T_D > 2 \text{ seg.} \end{cases}$$

B_M = Coeficiente de minoración por amortiguamiento

M_M^3 = Coeficiente de mayoración (1.20 para las tres zona de amenaza sísmica)

Z = Coeficiente de Mayoración

$$Z = \frac{3}{4} \text{ suelo I}$$

$$Z = 1 \text{ suelo II}$$

$$Z = \frac{5}{4} \text{ suelo III}$$

Esta ecuación asume que la superestructura es rígida, provee una estimación conservadora del desplazamiento del sistema de aislación,

³ Tabla 3, pagina 66 ACHISINA (Asociación Chilena de sismología e ingeniería Sísmica)

debido a que la flexibilidad y deformación de la superestructura tienden a hacer decrecer el desplazamiento del sistema de aislación.

Periodo efectivo correspondiente al desplazamiento máximo

El periodo efectivo de la estructura aislada correspondiente al desplazamiento máximo, T_M , debe determinarse utilizando las características de fuerza deformación del sistema de aislación de acuerdo con la siguiente formula:

$$T_M = 2\pi \times \sqrt{\frac{W}{k_{M \min} g}} \quad \text{Ec. 4}$$

K_{Dmin} = Rigidez efectiva o secante mínimo del sistema de aislación

La ecuación prescribe una estimación del periodo fundamental correspondiente al desplazamiento máximo. Esta ecuación se basa en la rigidez secante del sistema de aislación correspondiente al desplazamiento máximo D_M , Esta estimación se basa conservadoramente en el menor valor de la rigidez efectiva, entregando el máximo valor del periodo efectivo.

Desplazamiento Total

El desplazamiento de diseño total, D_{TD} , y el desplazamiento máximo total, D_{TM} , de los elementos del sistema de aislación debe incluir desplazamientos adicionales debido a la torsión natural y accidental calculada considerando la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislación y la ubicación menos favorable de la excentricidad de la masa.

No debe considerarse menor de lo prescrito por las formulas siguiente:

$$D_{TD} = D_D \times \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \text{ Ec. 5}$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \text{ Ec. 6}$$

d = Dimensión en planta más larga de la estructura

b = Dimensión más corta de la planta de la estructura

e = excentricidad real, en milímetros

y = Distancia en milímetros, entre el centro de rigidez de aislación y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica considerada.

Si el resultado de las siguientes ecuaciones es menor que la disposición del código se escoge la que esta prescrita en el código. La cual es 1.1 veces D_D y D_M .

1.4.6.2.3 Fuerzas Laterales Mínimas

Sistemas de aislación y elementos estructurales en el nivel o bajo de aislación

El sistema de aislación, la fundación y todos los elementos estructurales bajo el sistema de aislación deben diseñarse y construirse para resistir una fuerza sísmica lateral mínima, V_b usando todos los requerimientos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas donde:

$$V_b = \frac{k_{D_{\max}} \times D_D}{R_1} \text{ Ec. 7}$$

Donde:

$K_{D_{\max}}$ = Rigidez efectiva o secante máxima del sistema de aislación

A diferencia de las estructuras convencionales en que los esfuerzos utilizados para el diseño de las fundaciones son también reducidos por el factor de reducción **R** (que no supera el valor de 2), en caso de estructuras aisladas no se permite tal reducción debido a lo importante que es garantizar la estabilidad de la subestructura para un desempeño adecuado del sistema de aislación.

Elementos estructurales sobre el sistema de aislación

La estructura sobre el sistema de aislación debe diseñarse y construirse para resistir como mínimo una fuerza de corte V_s usando todos los requerimientos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas donde:

$$V_s = \frac{k_{D_{\max}} \times D_D}{R_1} \text{ Ec. 8}$$

$K_{D_{\max}}$ = Rigidez efectiva o secante máxima del sistema de aislación

R_1 No supera el valor de 2, es sacado de la tabla 4 de la ACHISINA,

Limite de desplazamiento de entrepiso

Para los pisos de la superestructura, el desplazamiento relativo máximo entre dos piso consecutivos, medido en el centro de masa es cada una de las direcciones de análisis, no debe ser mayor que la altura de entrepiso multiplicada por **0.01**.

1.4.6.3 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DINAMICO

1.4.6.3.1 Sistema de Aislación y Elementos de la Subestructura

El desplazamiento total de diseño del sistema de aislación no debe considerarse menor que el 90% de D_{TD} , según la Ec. 3.

El desplazamiento máximo del sistema de aislación no debe considerarse menor que el 80% de D_{TM} , calculado por la Ec. 5

La fuerza de corte del sistema de aislación y en los elementos estructurales bajo el sistema de aislación no debe ser menor que el 90% de V_b , calculado con la Ec. 6

Los límites especificados en lo anterior deben evaluarse usando los valores de D_{TD} , y D_{TM} excepto que **$D_D`$ puede usarse en lugar de D_D** y **$D_M`$ puede usarse en lugar de D_M** , donde $D_D`$ y $D_M`$ se calculan con las formulas siguientes:

$$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad \text{Ec. 9}$$

$$D_M' = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad \text{Ec. 10}$$

T es el periodo de la superestructura con base fija y comportamiento elástico. Esta Debe calcularse mediante un análisis modal o bien mediante la formula implícita del código.

1.4.6.3.2 Elementos Estructurales De La Superestructura

El corte de diseño en la superestructura, en caso de ser ésta de configuración regular, no debe ser menor que el 80% de **V_s** calculado por la Ec. 8

EXCEPCION: Si la superestructura es de configuración regular, corte de diseño en la superestructura puede considerarse menor que 80% pero no menor que el 60% de **V_s** siempre que realice un análisis de historia en el tiempo para diseñar la estructura.

1.4.6.3.3 Registros

Deben seleccionarse y escalonarse partes apropiados de registros de aceleración horizontal del suelo al menos 3 eventos sísmicos. Los pares de registros deben tener magnitudes, distancias a la falla, fuente del mecanismo del sismo y tipos de suelo que sean consiente con aquellas que controlan el sismo de diseño (o máximo posible). Cuando no se disponga de tres pares apropiados de registros, se pueden agregar registros artificiales.

Para cada registro debe construir los espectros de aceleración con 5% de amortiguamiento y se debe cambiar según la raíz de la suma de los cuadrados (SRSS). Los registros deben escalarse de manera que el promedio de los espectro combinados con SRSS no resulte menor a 1.3 veces el espectro del sismo de diseño (o 1.3 veces el sismo máximo posible) en más de un 10% para los periodo entre $0.5T_D$ y $1.25T_M$.

1.4.6.3.4 Modelo Matemático

Sistema de aislación

El sistema de aislación debe modelarse de acuerdo con las características de deformación desarrollada y verifícas por ensayos.

Los programas de análisis estructural más utilizado actualmente para el análisis y diseño de estructura aisladas son:

- I. SAP2000
- II. 3D-BASIS

Ambos programas permiten modelar en forma sencilla las constitutivas no-lineales de los aisladores. Sin embargo, SAP2000 permite analizar casos más complejos en los que existe estructura bajo el nivel de aislación.

El sistema de aislación debe modelarse con suficientes detalles como para:

- I. Considerar la distribución espacial de los aisladores.
- II. Calcular las traslaciones en ambas direcciones horizontales y la torsión de la superestructura, considerando la posición menos favorable de la excentricidad de la masa.
- III. Poder determinar las fuerzas volcane o que provoquen levantamiento sobre cada aislador.

- IV. Considerar los efectos de la carga vertical, acciones bidireccionales, y la velocidad de carga en caso que las propiedades de fuerza – deformación del aislador sean dependientes de una o más de estas variables.

Desplazamiento

El máximo desplazamiento de cada piso, el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo en el sistema de aislación deben calcularse utilizando un modelo de la estructura aislada que incluya las características fuerza-deformación de los elementos no lineales del sistema de aislación y del sistema resistente a fuerzas laterales.

Fuerza y desplazamiento en los electos claves

La fuerza y desplazamiento de diseño en los electos claves del sistema resistente a las fuerzas laterales pueden calcularse utilizando un modelo elástico lineal de la estructura aislada, siempre que:

- I. Las propiedades elásticas equivalente asumidas para los componentes o lineales de los sistemas de aislación se basen en la rigidez efectiva máxima del sistema de aislación.
- II. Todos los elementos claves del sistema resistente a las fuerzas laterales de la superestructura y subestructura sean lineales.

1.4.6.3.5 Descripción del procedimiento de análisis

Solicitaciones sísmicas

El sismo de diseño debe utilizarse para calcular el desplazamiento total de diseño del sistema de aislación y las fuerzas y desplazamiento laterales de la estructura aislada. El sismo máximo posible debe utilizarse para calcular el desplazamiento total máximo del sistema de aislación.

Análisis de respuesta espectral

El análisis de respuesta espectral debe realizarse utilizando un valor de la razón de amortiguamiento modal para el modo fundamental en la dirección de interés no mayor que el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación o 30% del amortiguamiento crítico, en el que resulte menor. Los valores de la razón de amortiguamiento modal para los modos superiores deben seleccionarse en forma consistente con los apropiados para el análisis de respuesta espectral de la superestructura sobre una base fija.

Análisis de respuesta en el tiempo

Este procedimiento corresponde a un análisis de historia de respuesta en el tiempo para registros sintéticos o reales característico de la sismicidad de la zona de emplazamiento de la estructura. En todo caso, los resultados de este análisis deben ser escalonado hacia arriba si resultan menores que un factor del obtenido por el análisis estático.

1.4.6.3.6 Límites de desplazamiento

El desplazamiento máximo de entrepiso correspondiente a la fuerza lateral de diseño, incluyendo el desplazamiento horizontal debido a deformación vertical del sistema de aislación no debe exceder el siguiente límite:

El cociente máximo entre el desplazamiento de entrepiso de la estructura y la altura del piso por sobre el sistema de aislación mediante análisis espectral, no debe exceder de **0.02 / R**.

1.4.7 REQUERIMIENTO DETALLADO DE LOS SISTEMAS

1.4.7.1 Sistema de Aislación

Condiciones Medioambientales

Los Aisladores elastoméricos de goma natural son sensibles a la radiación ultravioleta y el ozono, y es recomendable que no se encuentren expuestos directamente a luz solar. Por esta razón estos aisladores deben estar protegidos por una lámina de sacrificio que retarde el proceso de envejecimiento. Similares precauciones con el polvo y la humedad deben tenerse con los aisladores friccionales de modo de evitar agrietamiento de las superficies como consecuencia del envejecimiento.

Resistencia al fuego

La resistencia al fuego del sistema de aislación debe cumplir con lo que se requiere para las columnas, muros u otros elementos estructurales de la edificación en el cual se encuentra instalado.

Los sistema de aislación requiere una calificación de resistencia al fuego deben protegerse con materiales o con sistema de construcción adecuados, diseñados para proporcionar el mismo grado de resistencia al fuego especificado para el elemento en el cual se encuentran instalados cuando se prueben de acuerdo con la norma UBC 7-1 Sección 703.2.

Inspección y reemplazo

- I. Debe contarse con acceso para inspección y reemplazo de todos los componentes del sistema de aislación.
- II. El ingeniero calculista o una persona designado por ellos debe realizar una serie final de inspección u observaciones de las áreas de separación de la edificación y los componentes que cruzan el sistema de aislación y dejar constancia de la aprobación en el libro de obra ante de emitir el certificado de uso para la edificación con aislación sísmica.
- III. Las edificaciones con aislación sísmica deben tener un programa de control, inspección y mantenimiento periódico para el sistema de aislación establecido por el ingeniero responsable del diseño del sistema. El objetivo es asegurar todos los elementos del sistema de aislación están en condiciones de cumplir con los niveles mínimos de diseño en todo momento.
- IV. La remodelación, reparación o reconstrucción del sistema de aislación incluyendo la de los componentes que cruzan el sistema de aislación

debe hacerse bajo la dirección del un ingeniero con experiencia en el diseño y construcción de estructura con aislación sísmica.

- V. Se recomienda instrumentar el edificio al menos al nivel del sistema de aislación con el propósito de registrar los desplazamientos relativos entre la base y la superestructura.

Control de Calidad

El ingeniero responsable del diseño estructural debe establecer un programa de ensayos de control de calidad para los aisladores.

1.4.7.2 Sistema estructural

Distribución horizontal de fuerzas

Un diafragma horizontal u otros elementos estructurales deben proveer continuidad por encima del sistema de aislación y deben tener suficiente resistencia y ductilidad para transmitir las fuerzas (debidas a los movimientos no uniformes del suelo) entre distintas partes de la edificación.

Separación entre edificaciones

Las separaciones mínima entre las edificaciones aisladas y los muros de contención u otras obstrucciones fijas circundantes no deben ser menores que el desplazamiento total máximo.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Los graves efectos que han tenido lugar en las diferentes edificaciones a lo largo del mundo entero debidos a los movimientos sísmicos; han enfrentado, a los ingenieros estructurales a los más grandes desafíos en lo que respecta a la seguridad de estas. Lo anterior ha llevado precisamente a una constante evolución en tecnología para el diseño sismo-resistente de edificaciones lo cual en los últimos años ha tenido un gran desarrollo con la introducción de sistemas de aislamiento y de disipación de energía para estructuras, los cuales han tenido una muy buena aceptación en el ámbito internacional.

Dentro de estos sistemas de diseño y construcción que se están implementando para satisfacer la necesidad de brindar seguridad, se encuentra el uso de aisladores elastoméricos que precisamente tiene como objetivos proteger lo máximo posible las edificaciones en el momento de un evento sísmico disminuyendo los daños de una edificación, guardando los bienes materiales y lo más importante que es la protección las vidas humana. Además, después de un sismo severo el funcionamiento de la estructura no se verá afectado en gran magnitud.

En la actualidad llevar una estructura con un diseño sismo-resistente convencional hasta niveles altos de seguridad como es posible con la tecnología anteriormente mencionada conlleva a aumentos excesivos en los costos de la estructura.

Es aquí donde la alternativa de los usos de los aisladores elastoméricos toma gran importancia y es viable para proteger y dar seguridad a los usuarios.

La presente propuesta busca abrir el campo como referencia a la factibilidad económica de la aplicación de esta tecnología (aislamiento basal, con el uso de aisladores elastoméricos) para dar a conocer en nuestro país su gran importancia e impulsar su utilización en la ingeniería estructural colombiana.

Lo que se quiere con este proyecto de investigación es la recopilación del conocimiento de la tecnología y de su funcionamiento e incentivar la aplicación de la misma.

Este proyecto tiene también como enfoque el seguir con la investigación e incentivar a otros estudiantes para que participen en este proceso de investigación, de producción y aplicación de conocimiento con la ayuda del programa y lo más importante el apoyo de la Universidad del Magdalena.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

- Establecer la factibilidad económica del uso de los Aisladores Elastoméricos en el diseño de edificaciones que revisten gran importancia en nuestro país. Además incentivar el uso de esta tecnología de aislamiento sísmico basal en el país.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los costos entre diferentes alternativas de diseño, esto frente a la aplicación de Aisladores Elastoméricos.
- Establecer la aplicación de nuevas técnicas eficaces, seguras y económicas para el diseño de edificaciones.
- Dar a conocer las ventajas de la aplicación de software como MATHCAD, Incentivando tanto a los docentes como estudiantes de nuestro programa para la creación e implementación de procedimientos de análisis y diseño.

1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

El alcance de esta investigación se limita a los lineamientos mencionados a continuación:

- El estudio se limita al análisis de los Aisladores Elastoméricos, específicamente a los laminados (goma y acero).
- No se tendrán en cuenta los ensayos requeridos para los aisladores.
- En el presente proyecto no se realizará modelamiento detallado del suelo. En todos los casos se supondrá que la estructura esta empotrada en la base.
- El análisis realizado a los modelos se limita solo a edificios de varios pisos, contruidos con concreto reforzado.
- En este estudio solo se analizarán elementos estructurales, es decir que los elementos no estructurales no se tendrán en cuenta.

- Para la modelación analítica se utilizará el programa SAP2000 v.9.01 y para el diseño de los Aisladores Elastoméricos el software matemático programable MATHCAD y se verificarán las propiedades físicas obtenidas a través del programa SAP2000 v.9.01

1.8. FORMULACION Y GRAFICACION DE HIPOTESIS.

En nuestro país la utilización de nuevas tecnología es baja para no decir ninguna y además no existe una conciencia sísmica adecuada.

Nos preguntamos cual será la causa? la causa principal es debido que la mayoría de los ingenieros tienden a amarrarse en un tipo de sistemas (las más convencionales y las más antiguas) sin saber de las ventajas que pueden brindar diferentes alternativas de diseño y construcción, tal vez nos es culpa de ellos sino de que en las diferentes universidades de nuestro país no tienen en cuenta una preparación en este tema.

Se quiere abrir la conciencia para este sistema de reducción de vibraciones en especial con los Aisladores elastoméricos, establecer la viabilidad económica y que en un futuro la utilización de estas nuevas alternativas sean las convencionales en nuestro país como lo es en este momento en diferentes países desarrollados.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. DISEÑO METODOLOGICO SEGÚN LA NATURALEZA DEL PROYECTO

Se escogió en principio una edificación regular (configuración regular en planta y en altura) para lograr una simplificación adecuada. Se le realizó el diseño sismo-resistente para el sistema de pórtico (columnas y vigas), luego se llevo acabo el diseño sismo-resistente para el sistema tipo dual (columnas, vigas y muros de cortante). A continuación se consideró el sistema alternativo de diseño basado en una estructura tipo pórtico aislada sísmicamente en su base con un sistema de aisladores elastoméricos. En todos los sistemas anteriormente mencionados se buscaron las dimensiones de los elementos estructurales para obtener la resistencia requerida frente a las solicitaciones de carga y cumplir con los requisitos de derivas máximas. La modelación con aislamiento sísmico se realizó basándose en lo establecido en el código chileno para el análisis y diseños de edificios aislados ACHISINA el cual esta basado en la UBC97.

Todo lo anterior se realizó para una estructura ubicada en una zona de amenaza sísmica intermedia ($A_a=0.15$) y también para otra con las mismas características arquitectónicas ubicada en una zona de amenaza sísmica alta

($A_a=0.30$), con el fin de tener en cuenta como influye, en la factibilidad económica de la aplicación de la tecnología, la ubicación de la edificación en el mapa de amenaza sísmica de nuestra norma vigente.

Después de finalizados los diseños se realizan los presupuestos de cada una de las alternativas planteadas, los cuales son utilizados para determinar la factibilidad económica de la implementación de este sistema de control pasivo respecto a los métodos convencionales de diseño en nuestro país.

2.2. SELECCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DEL ANÁLISIS

Las variables de análisis en el presente estudio son de tipos dependientes: Zona de amenaza sísmica, la cual depende de la ubicación o zona donde se construye la estructura y los costos, que dependen de las características de diseño y ubicación de la estructura.

Zona de amenaza sísmica: Esta define el comportamiento sísmico y el diseño de los sistemas y elementos estructurales de acuerdo con su capacidad de disipación de energía en el rango inelástico; aspecto fundamental en la obtención de una respuesta apropiada de la estructura al verse sometida a los efectos de un sismo. La NSR-98 contempla tres niveles

de capacidad de disipación de energía en el rango inelástico: especial (DES), moderada (DMO) y mínima (DMI).

Costo: Este define básicamente el valor estimado para cada una de las estructuras que se modela en el proyecto, y en base a esto se define la factibilidad económica de su uso. Esta variable depende básicamente del diseño de la estructura.

2.3. Materiales

Para el desarrollo del proyecto se utilizó:

El programa de análisis y diseño estructural SAP2000

El software matemático programable MATHCAD

La bibliografía especificada en el presente documento.

3. DELIMITACIÓN DEL ESPACIO TEMPORAL Y GEOGRÁFICO

Debido a que nuestro proyecto se llevará a cabo para zonas de amenaza sísmica alta e intermedia (Según lo estipulado en la NSR98), el proyecto queda situado dentro de todo el territorio nacional; lo que permite ubicarse más exactamente dentro del periodo entre el año de 1998 (en el que fue creada la NSR98), y la actualidad.

4. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para la recopilación de información se llevo acabo una amplia búsqueda de bibliografía a través de la Internet. Se estudiaron y seleccionaron varios artículos y documentos en general que están incluidos en la bibliografía que se presenta en este documento.

5. MEMORIAS DE CÁLCULO

5.1 DESCRIPCION DE LA EDIFICACIÓN

La edificación consta de 5 niveles y esta destinada a uso institucional (Escuela). El sistema estructural de la edificación consta de un sistema de pórticos, cinco pórticos en la dirección **x** designados con los números: 1, 2, 3, 4, 5 y cinco pórticos en la dirección **y** designados con las letras A, B, C, D, E. La estructura posee una configuración regular, tanto en planta como en altura. Con una placa de entrepiso aligerada con casetones de icopor recuperables armada en la dirección **x**. El sistema de fundación de la edificación esta constituido por zapatas aisladas.

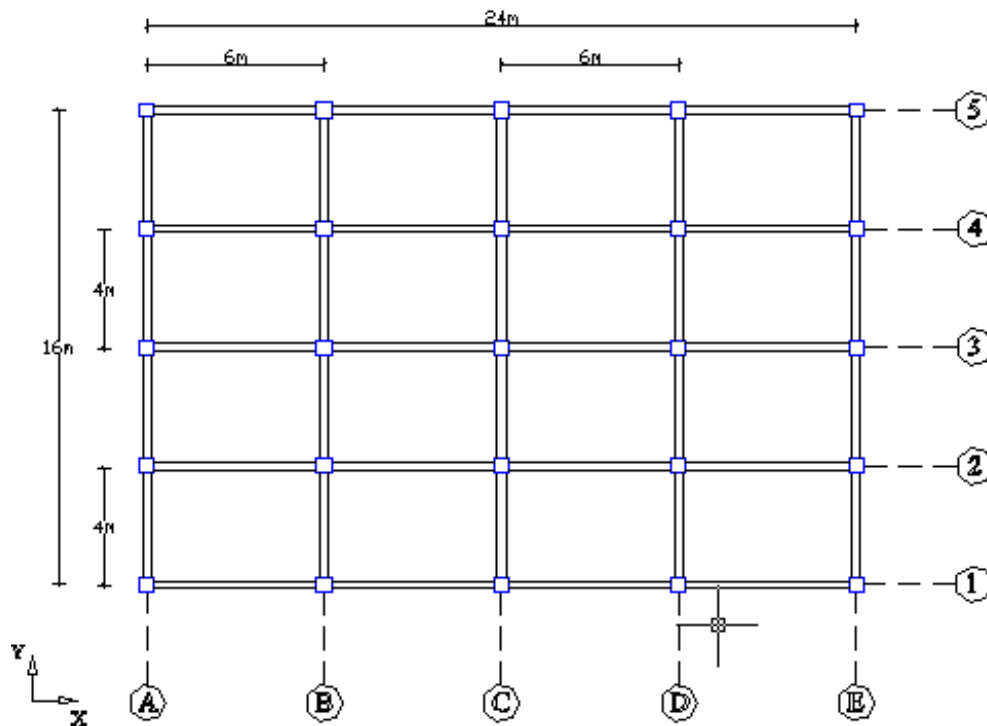


Figura. 31 Configuración de la planta

La estructura se modelará teniendo en cuenta lo establecido en la NSR-98 (Grado de disipación de energía de la estructura en el rango inelástico), por lo que se realizarán los diseños de los elementos estructurales dentro de dos zonas de amenaza sísmica; la intermedia ($A_a=0.15$) y la alta ($A_a=0.30$). El análisis sísmico se basa en los parámetros establecidos en la Ley 400 de construcciones sismo resistentes NSR-98 de la República de Colombia, también basados en este código se evaluarán las condiciones de nuestro proyecto y se definirá el riesgo sísmico, el coeficiente de sitio (según la NSR-98 tabla A-2-3) se tomará un factor de 1.2 para un perfil de suelo S2, el grupo de uso con un factor de 1 y el coeficiente de importancia con un factor de 1.3 para una edificación de importancia tipo IV.

Para la modelación de la estructura se utilizará en el programa **SAP2000**.

5.2 NORMAS Y ESPECIFICACIONES

Norma: Diseño según Norma Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes NSR-98

ESPECIFICACIONES:

Concreto para vigas $f'_c = 21\text{Mpa}$

Concreto para Columnas $f'_c = 28\text{Mpa}$

Acero longitudinal $F_y = 420\text{Mpa}$

Acero a cortante $F_y = 420\text{Mpa}$

Acero retracción fraguado y Temperatura $F_y = 420\text{Mpa}$

5.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La sección C.9-5 de la NSR-98 en la que se refiere al control de deflexiones, hace mención a que los elementos de concreto reforzado, sometidos a flexión, deben diseñarse de modo que tengan rigidez suficiente para limitar deflexiones u otras deformaciones que puedan perjudicar la resistencia o el uso normal o funcionalidad de la estructura. De acuerdo con esto y con el numeral C.9.5.2. para construcciones en una dirección, como es el caso del modelo, Las vigas y losas no preesforzadas que trabajen en una dirección deben cumplir con los espesores mínimos indicados en las tablas C.9.1.(a) y C.9.1.(b) de la NSR-98. Para el edificio se toman los espesores de la tabla C.9.1(a) ya que

pueden existir elementos que soporten muros divisorios y particiones frágiles susceptibles a dañarse por deflexiones grandes.

Losa de entrepiso

Ambos apoyos continuos

$L = 6.0 \text{ m.}$

$$h = \frac{L}{14} = \frac{6.0}{14} = 0.42 \text{ m}$$

La losa de entrepiso tendrá un espesor **0.45 m**

Espesor de placa: 0.4 m

Espesor de torta: 0.05 m

Ancho vigueta: 0.1m

Ancho del casetón de icopor: 0.7m

Altura del casetón de icopor: 0.4m

Vigas Cargueras

Ambos apoyos continuos

$L = 4.0 \text{ m}$

$$h = \frac{L}{14} = \frac{4.0}{14} = 0.28 \text{ m} \approx 0.30 \text{ m}$$

Cuando se cuenta con luces cortas (6 – 7.5mt) la relación h/b debe estar entre:

$$\frac{h}{b} \approx 1.5 - 2$$

$$b = \frac{h}{2} = \frac{0.3}{2} = 0.15m$$

Luego las vigas cargueras tendrán la siguiente sección igualando la altura a la de la losa de entrepiso:

$$\mathbf{h=0.45m}$$

$$\mathbf{b=0.30m}$$

Vigas sísmicas

Ambos apoyos continuos

$$L= 6.0 \text{ m}$$

$$h = \frac{L}{14} = \frac{6.0}{14} = 0.42m$$

$$\frac{h}{b} \approx 1.5 - 2$$

$$b = \frac{h}{2} = \frac{0.45}{2} \cong 0.25m$$

Luego las vigas sísmicas tendrán la siguiente sección:

$$\mathbf{h=0.45 \text{ m}}$$

$$\mathbf{b=0.25 \text{ m}}$$

5.4 ANALISIS DE CARGA

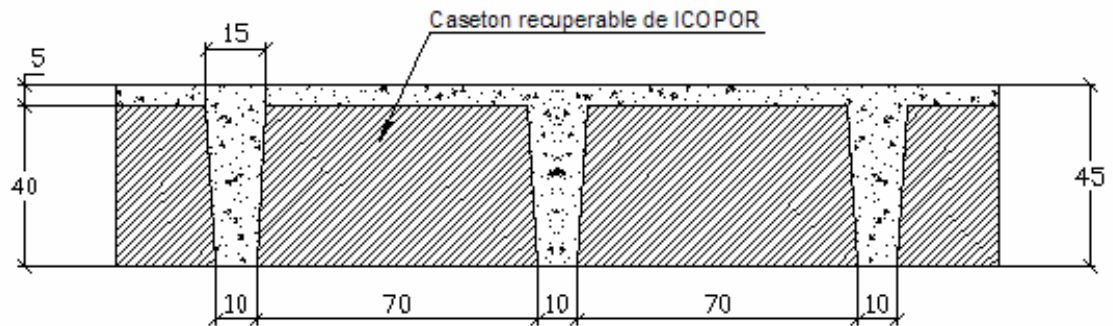


Figura 32. Corte transversal placa de entrepiso

5.4.1 CARGA MUERTA

Es la carga vertical debida a los efectos gravitacionales de la masa, o peso, de todos los elementos permanentes ya sean estructurales o no estructurales (muros, pisos, cubiertas, cielos rasos, escaleras, equipos fijos) y todas aquellas cargas que no son causadas por la ocupación y uso de la edificación.⁴

Para el análisis de carga se utilizarán las densidades de los materiales establecidas en las tablas B.3.2, B.3.3, B.3.4 de la NSR-98.

⁴ NSR-98

Carga Muerta Por Panel de entrepiso

Elementos	Peso (tonf)
Loseta (0.05 m)	2.54
Acabados (NSR-98 B.3.6)	3.6
Viguetas (0.1*0.45) aferencia 0.8 m	2.71
Divisiones (NSR-98 B.3.4.2)	7.2
Cielo Razo (NSR-98 B.3.3)	0.6
Total	16.652

Tabla 2. Carga muerta por panel de entrepiso

Carga Por Metro Cuadrado De Entrepiso

$$W_{cm} = \frac{16.652}{L \times L_{21}} = \frac{16.652}{4 \times 6}$$

L_1 = longitud corta del panel

L_2 = longitud Larga del panel

$$W_{cm} = 0.69 \frac{tonf}{m^2}$$

Carga Muerta Por Panel de Cubierta

Elementos	Peso (tonf)
Loseta (0.05 m)	2.54
Acabados (NSR-98 B.3.6)	3.6
Viguetas (0.1*0.45) aferencia 0.8 m	2.71
Cielo Razo (NSR-98 B.3.3)	0.6
Total	9.45

Tabla 3. Carga muerta por panel de entrepiso

Carga Muerta Por Metro Cuadrado De Cubierta

$$W_{cmCubierta} = \frac{9.45tonf}{L_1 \times L_2} = \frac{9.45tonf}{4 \times 6}$$

L_1 = longitud corta del panel

L_2 = longitud Larga del panel

$$W_{cmCubierta} = 0.39 \frac{tonf}{m^2}$$

5.4.2 CARGA VIVA

La carga viva que se utiliza en el diseño de la estructura deben ser las máximas cargas que se espera ocurran en la edificación debido al uso que esta va ha tener.

En el proyecto la edificación esta destinada a uso Institucional (Escuela), de acuerdo con la NSR-98 numeral B.4.2.1 establece que las cargas vivas requerida para Escuela es:

$$W_{CV} = 0.20 \frac{tonf}{m^2}$$

5.5 COMBINACIONES DE CARGA

De acuerdo con la NSR-98 **(B.2.4.2)** para estructuras de concreto reforzado o mampostería estructural las combinaciones básicas de carga con las que se diseñaran los modelos son:

- 1.4 D + 1.7 L
- 1.05 D + 1.28 L + E_x
- 1.05 D + 1.28 L - E_x
- 1.05 D + 1.28 L + E_y
- 1.05 D + 1.28 L - E_y
- 0.9 D + 1.0 E_x
- 0.9 D - 1.0 E_x
- 0.9 D + 1.0 E_y
- 0.9 D - 1.0 E_y

5.6 REQUISITOS MÍNIMOS DE DISEÑO

5.6.1 CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA MODERADA (DMO)

5.6.1.1 Vigas

Las vigas se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98.

Requisitos geométricos

De acuerdo con **C.21.4.1 de la NSR-98** estos son las dimensiones de la base en las vigas:

$b > 0.20 \text{ m}$

Sistema	Carguera(m)	Viga sísmica(m)
Pórticos	0.30	0.25
Dual	0.30	0.25
Aisladores	0.30	0.25

Tabla 4. Base escogidas de las vigas

Requisitos refuerzo longitudinal

De acuerdo a lo estipulado en la sección **(c.21.3.2)** de la NSR-98

En cualquier sección de la viga el refuerzo superior e inferior no debe tener una cuantía, ρ , inferior a la que se obtiene con la ecuación C.10-3, ni debe exceder 0.025.

En todos los modelos se trabajaron con cuantías que oscilan entre $0.0033 \leq \rho \leq 0.025$

Requisitos refuerzo transversal

Se trabajó con lo estipulado en la sección **(c.21.3.3)**

Deben colocarse estribos de confinamiento al menos de diámetro N° 3 (3/8").

El primer estribo de confinamiento debe colocarse al menos a 50 mm de la cara del apoyo. El máximo espaciamiento de los estribos de confinamiento no puede exceder $d/4$.

5.6.1.2 Columna

Las Columnas se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98.

Requisitos geométricos

De acuerdo con **C.21.4.1** de la NSR-98:

Sistema	Dimensión mínima de columna
Pórticos	0.30
Dual	0.30
Aisladores	0.30

Tabla 5. Secciones mínimas de columnas

Requisitos refuerzo longitudinal

De acuerdo a lo estipulado en la sección **(c.21.3.2)** de la NSR-98

En todos los modelos se trabajaron con cuantías que oscilan entre

$$0.01 \leq \rho \leq 0.06$$

Requisitos refuerzo transversal

Se trabajó con lo estipulado en la sección (c.21.3.3), La barra utilizada para el refuerzo a cortantes es la de 3/8"

El refuerzo transversal de confinamiento debe espaciarse a lo largo del eje del elemento a una separación s que no exceda:

- 8db de la barra longitudinal más pequeña que abrace.
- 16db del diámetro de barra del estribo,
- 1/3 de la dimensión mínima de la sección del elemento.

- 150 mm.

El primer estribo debe colocarse a una distancia al menos igual a 50 mm de la cara del nudo.

5.6.1.3 SISTEMA PORTICO $A_a = 0.15$

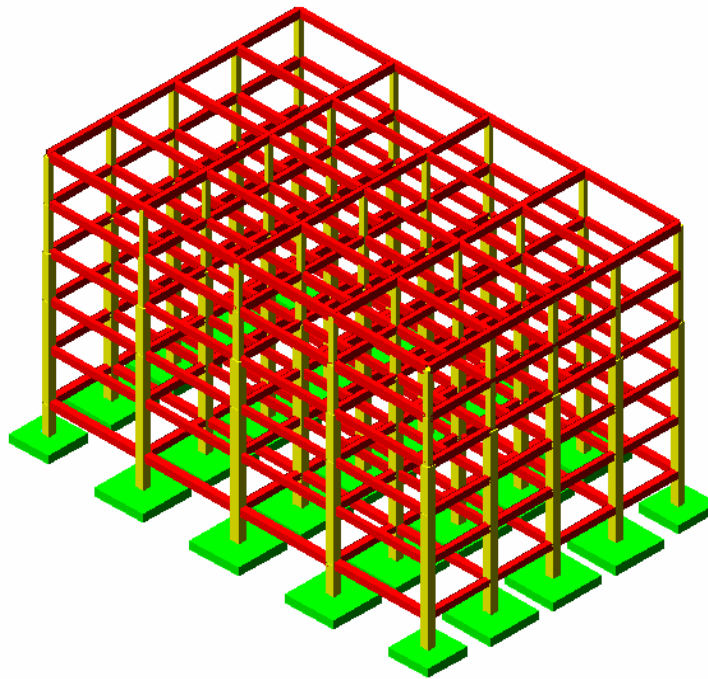


Figura 33. Modelo típico sistema de resistencia sísmica tipo pórtico

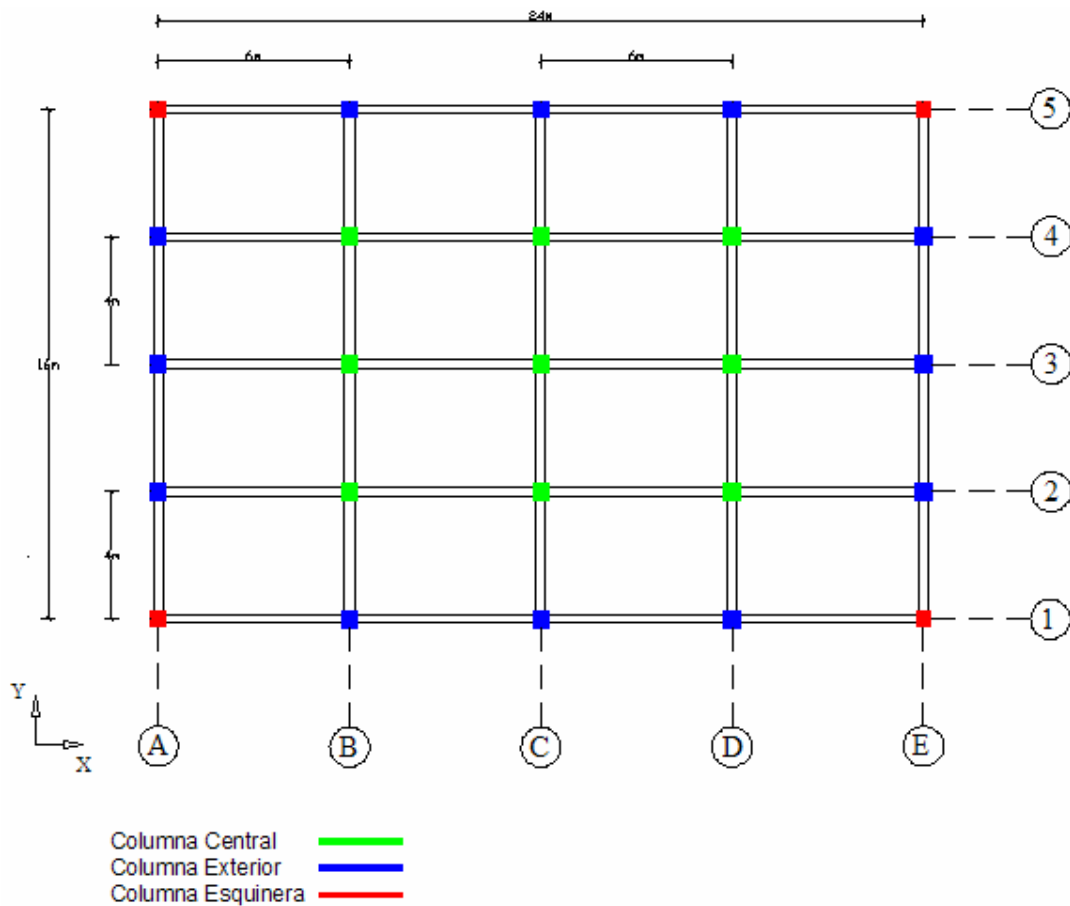


Figura 34. Tipificación de columnas

Las secciones del sistema pòrtico que cumplen derivas son las siguientes:

VIGAS	SECCIONES	
	Base(m)	Altura(m)
Carguera	0.30	0.45

Sísmica	0.20	0.45
---------	------	------

Tabla 6. Secciones finales de Vigas Zona Intermedia

COLUMNA	SECCIONES	
	Base (m)	Altura(m)
Col Central y Exterior, pisos 1-2-3	0.50	0.50
Col Central y Exterior, pisos 4	0.35	0.35
Col Central y Exterior, pisos 5	0.30	0.30
Columna Esquinera, pisos 1-2-3	0.45	0.45
Columna Esquinera, pisos 4-5	0.30	0.30

Tabla 7. Secciones finales de Columnas Zona Intermedia

Para tener en cuenta los efectos sísmicos en la modelación de las estructuras utilizamos en análisis modal espectral. El espectro usado para los modelos ubicados en la zona de amenaza sísmica Intermedia ($A_a=0.15$) fue construido con los parámetros establecidos por la NSR- 98 **(A.2.6)** y se muestra en la siguiente grafica.

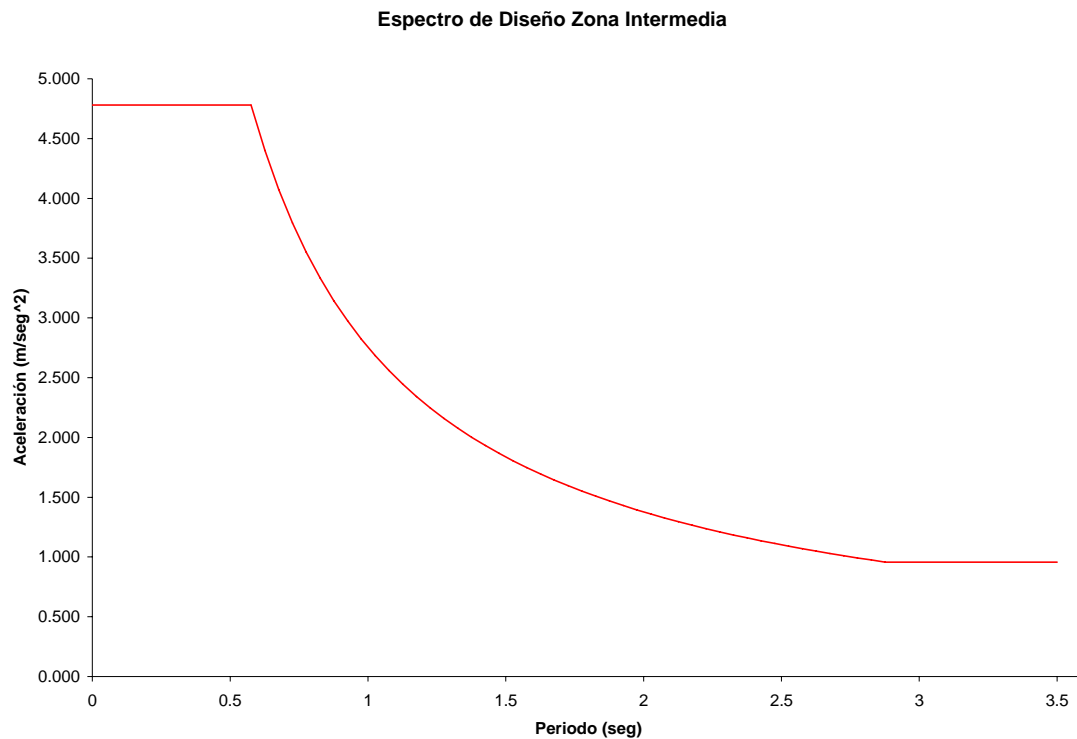


Figura 35. Espectro de diseño para zona intermedia $A_a = 0.15$

Para obtener las fuerzas sísmicas reducidas de diseño ($E = F_s / R$), es necesario determinar el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , correspondiente a cada sistema estructural de resistencia sísmica establecido en el proyecto.

El valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño se obtiene de las tablas A.3-3 para sistemas de pórticos y A.3-4 para sistemas dual, el cual corresponde al coeficiente de disipación de energía básico, R_o , que multiplicado por los coeficientes de

reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en altura y en planta se obtiene **R** ($R = \phi_a \phi_p R_o$).

Para pórticos de concreto resistentes a momentos con capacidad moderada de disipación de energía (DMO), el valor de **R_o** es de **5**.

$$R = (1) * (1) * (5) = 5$$

5.6.1.3.1 Diseño de elementos

Estos diseños se basaron en los requerimientos de la NSR-98, y en base a ellos se establecieron las cantidades de obra y presupuestos.

5.6.1.3.2 Derivas

Todos los Sistemas fueron diseñados para cumplir con los requerimientos de deriva estipulado en la NSR-98 (**A.6.4**).

Nivel	% Deriva
1	0.85
2	0.98
3	0.84
4	0.81
5	0.55

Tabla 8. Derivas en porcentaje para el sistema pórtico Zona Intermedia

5.6.1.4 SISTEMA DUAL $A_a = 0.15$

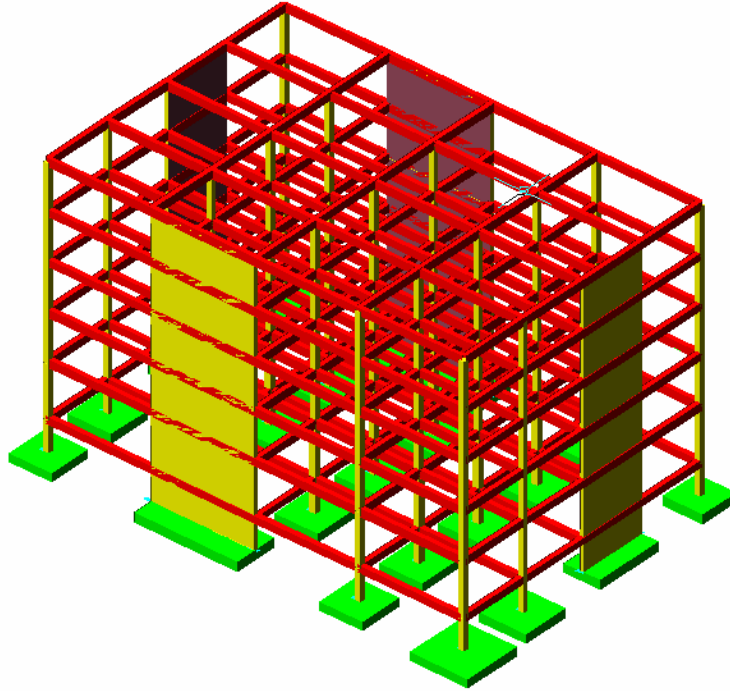


Figura 36. Modelo típico sistema de resistencia sísmica tipo dual

La secciones del sistema Dual que cumplen derivas:

VIGAS	SECCIONES	
	Base(m)	Altura(m)
Carguera	0.30	0.45
Sísmica	0.20	0.45

Tabla 9. Secciones finales de Vigas Zona Intermedia

COLUMNA	SECCIONES	
	Base (m)	Altura(m)
Col Central y Exterior, pisos 1	0.40	0.40
Col Central y Exterior, pisos 2-3-4-5	0.30	0.30
Columna Esquinera, pisos 1-2-3-4-5	0.30	0.30
Muro e=20 cm., pisos 1	6.0	3.4
Muro e=20 cm., pisos 2-3-4-5	6.0	2.65
Muro e=20 cm., pisos 1	4.0	3.4
Muro e=20 cm., pisos 2-3-4-5	4.0	2.65

Tabla 10. Secciones finales de Muro y columna Zona Intermedia

5.6.1.4.1 Derivas

Todos los Sistemas fueron diseñados para cumplir con los requerimientos de deriva estipulado en la NSR-98 **(A.6.4)**.

Nivel	% Deriva
1	0.98
2	0.80
3	0.77

4	0.73
5	0.69

Tabla 11. Derivas en porcentaje para el sistema dual Zona Intermedia

5.6.1.5 SISTEMA CON AISLADORES $A_a = 0.15$

Las secciones del sistema pórtico que cumplen derivas son las siguientes:

VIGAS	SECCIONES	
	Base(m)	Altura(m)
Carguera	0.25	0.45
Sísmica	0.25	0.45

Tabla 12. Secciones finales de Vigas Zona Intermedia

COLUMNA	SECCIONES	
	Base (m)	Altura(m)
Columna Central, pisos 1,2	0.35	0.35
Columna Central, pisos 3,4,5	0.30	0.30
Col Esquinera y Exterior, pisos 1	0.35	0.35
Col Esquinera y Exterior, pisos 2,3,4,5	0.30	0.30

Tabla 13. Secciones finales de Columnas Zona Intermedia Sistema con Aisladores

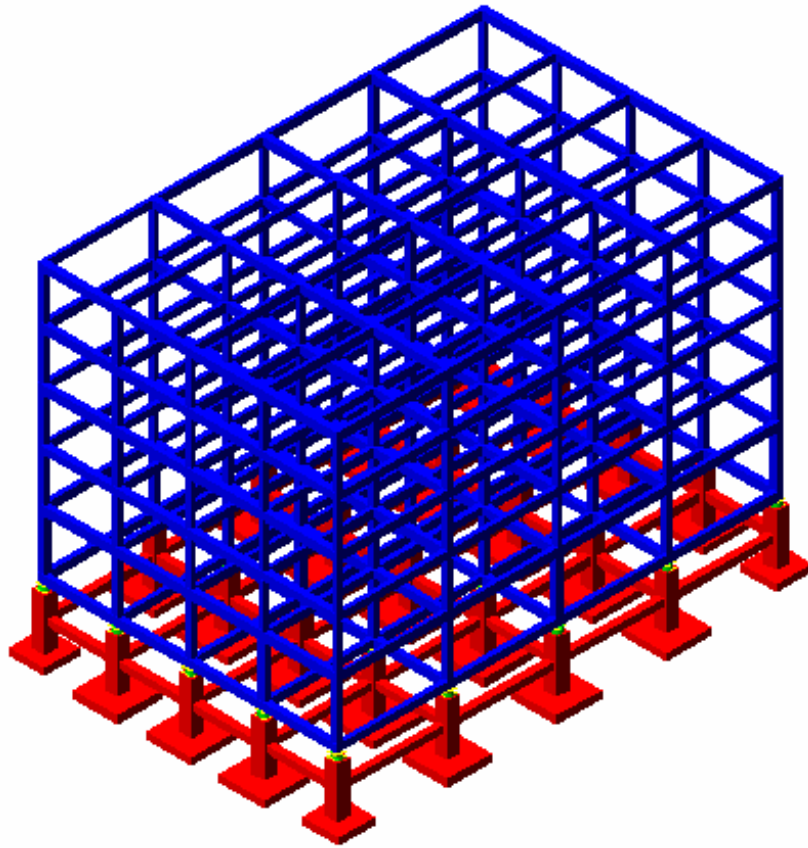


Figura 37. Sistema de resistencia sísmica con aisladores elastomericos.

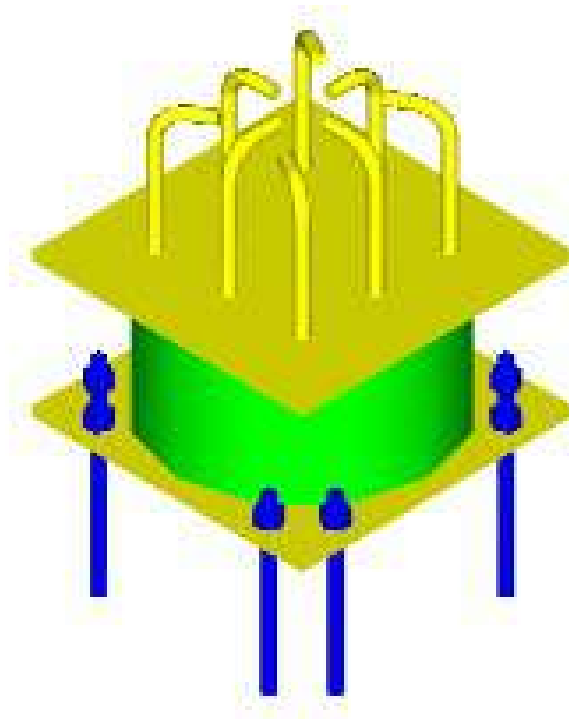


Figura 38. Detalle de aislador tipo.

Los elementos estructurales sobre el sistema de aislación deben diseñarse utilizando todos los requerimientos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas y las fuerzas obtenidas para el análisis dinámico reducidas por el factor R . El factor R debe basarse en el tipo de esquema resistente a fuerzas laterales utilizado en la superestructura para pórticos de concreto resistentes a momentos y una altura máxima de 35 metros Según lo estipulado en la Tabla 4 de la ACHISINA el valor de R es igual a **2**.

Para la modelación de la estructura con los Aisladores se utilizó un análisis modal cronológico en el tiempo.

El análisis de historia de respuesta el tiempo puede utilizarse para el diseño de cualquier estructura con aislación sísmica y debe utilizarse para el diseño de todas las estructuras con aislación sísmica que no cumplan con los criterios de la sección 4.53 de la ACHISINA.

Este método de análisis dinámico cronológico consiste en una evaluación paso a paso en el tiempo de la respuesta de la estructura, con respecto a la demanda que experimentan ocasionada por el sismo de análisis, usando un acelerograma o registros de un sismo artificial como base de entrada del movimiento, es decir, las fuerzas inerciales, fuerzas internas y desplazamientos de la estructura se evalúan para cada dato (o valor) del acelerograma proveniente del sismo utilizado en el análisis.

El registro sísmico usado fue el de un sismo artificial que tiene como propiedad particular, que al establecer un espectro de respuesta, a partir de dicho registro, es compatible con el espectro de respuesta que se construye con los parámetros establecidos por la NSR – 98. Este sismo artificial fue obtenido mediante un programa llamado **ACELEROS**, el cual con el espectro de respuesta genera un sismo compatible con este.

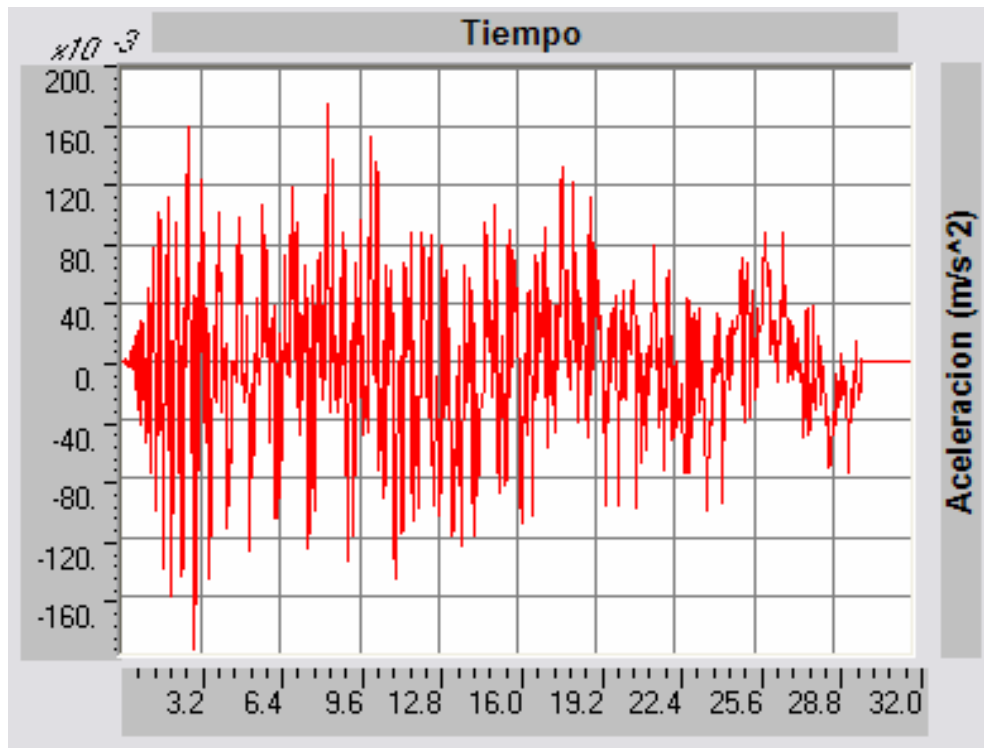


Figura 39. Registro Sísmico Artificial Zona Intermedia

5.6.1.5.1 Derivas

De acuerdo con la UBC-97, El desplazamiento máximo de entrepiso correspondiente a la fuerza lateral de diseño, incluyendo el desplazamiento horizontal debidos a los efectos de segundo orden del sistema de aislación no debe exceder el siguiente límite:

El cociente máximo entre el desplazamiento de entrepiso de la estructura y la altura del piso por sobre el sistema de aislación mediante análisis espectral, no debe exceder de **0.02 / R**

Nivel	% Deriva
1	0.30
2	0.27
3	0.22
4	0.15
5	0.07

Tabla 14. Derivas en porcentaje para el Sistema de Aisladores Zona Intermedia

5.6.2 CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ESPECIAL (DES)

5.6.2.1 Vigas

Las vigas se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98.

Requisitos geométricos

De acuerdo con **C.21.4.1 de la NSR-98** estos son las dimensiones de la base en las vigas:

$b > 0.20 \text{ m}$

Sistema	Carguera(m)	Viga sísmica(m)
Pórticos	0.30	0.25
Dual	0.30	0.25
Aisladores	0.30	0.25

Tabla 15. Secciones de las base escogidas de las vigas

Requisitos refuerzo longitudinal

De acuerdo a lo estipulado en la sección **(c.21.3.2)** de la NSR-98

En cualquier sección de la viga el refuerzo superior e inferior no debe tener una cuantía, ρ , inferior a la que se obtiene con la ecuación C.10-3, ni debe exceder 0.025.

En todos los modelos se trabajaron con cuantías que oscilan entre $0.0033 \leq \rho \leq 0.025$

Requisitos refuerzo transversal

Se trabajó con lo estipulado en la sección **(c.21.3.3)**

Deben colocarse estribos de confinamiento al menos de diámetro N° 3 (3/8").

El primer estribo de confinamiento debe colocarse al menos a 50 mm de la cara del apoyo. El máximo espaciamiento de los estribos de confinamiento no puede exceder $d/4$.

5.6.2.2 Columna

Las Columnas se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98.

Requisitos refuerzo longitudinal

De acuerdo a lo estipulado en la sección **(c.21.3.2)** de la NSR-98

En todos los modelos se trabajaron con cuantías que oscilan entre $0.01 \leq \rho \leq 0.06$

5.6.2.3 SISTEMA PORTICO $A_a = 0.30$

La secciones del sistema pórtico que cumplen derivas están a continuación:

VIGAS	SECCIONES	
	Base(m)	Altura(m)
Carguera	0.30	0.45
Sísmica	0.20	0.45

Tabla 16. Secciones finales de Vigas, Sistema pórtico Zona Intermedia

COLUMNA	SECCIONES	
	Base (m)	Altura(m)
Col Central y Exterior, pisos 1-2-3	0.90	0.90

Col Central y Exterior, pisos 4	0.75	0.75
Col Central y Exterior, pisos 5	0.60	0.60
Columna Esquinera, pisos 1-2-3	0.80	0.80
Columna Esquinera, pisos 4	0.65	0.65
Columna Esquinera, pisos 5	0.50	0.50

Tabla 17. Secciones finales de Columnas, Sistema Pórtico Zona Intermedia

Para tener en cuenta los efectos sísmicos en la modelación de las estructuras utilizamos en análisis modal espectral. El espectro usado para los modelos ubicados en la zona de amenaza sísmica Alta ($A_a=0.30$) fue construido con los parámetros establecidos por la NSR- 98 (A.2.6) y se muestra en la siguiente grafica.

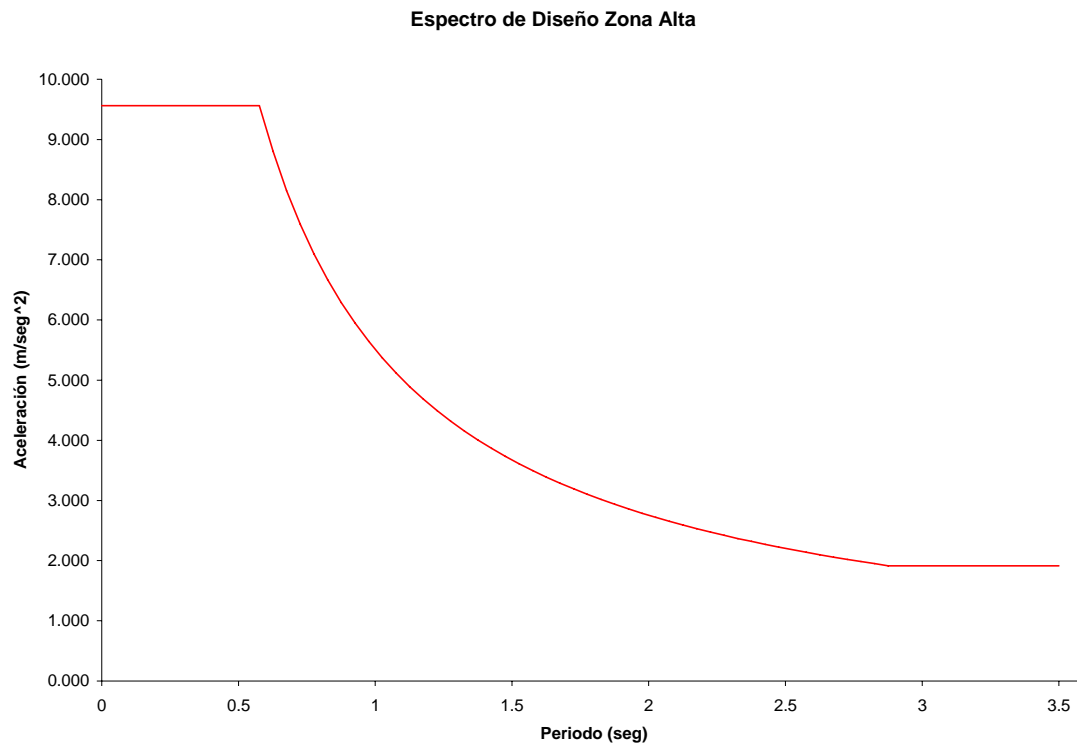


Figura 40. Espectro de diseño para zona intermedia $A_a = 0.30$

Para obtener las fuerzas sísmicas reducidas de diseño ($E = F_s / R$), es necesario determinar el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , correspondiente a cada sistema estructural de resistencia sísmica establecido en el proyecto. El valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño se obtiene de las tablas A.3-3 para sistemas de pórticos y A.3-4 para sistemas dual, el cual corresponde al coeficiente de disipación de energía básico, R_o , que

multiplicado por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en altura y en planta se obtiene **R** ($R = \phi_a \phi_p R_o$).

Para pórticos de concreto resistentes a momentos con capacidad moderada de disipación de energía (DES), el valor de **R_o** es de **7**.

$$R = (1) * (1) * (7) = 7$$

5.6.1.3.1 Diseño de elementos

Estos diseños se basaron en los requerimientos de la NSR-98, y en base a ellos se establecieron las cantidades de obra y presupuestos.

5.6.1.3.2 Derivas

Todos los Sistemas fueron diseñados para cumplir con los requerimientos de deriva estipulado en la NSR-98 (**A.6.4**).

Nivel	% Deriva
1	0.64
2	0.94
3	0.99
4	0.93
5	0.73

Tabla 18. Derivas en porcentaje para el sistema pórtico Zona Alta

5.6.2.4 SISTEMA DUAL $A_a = 0.30$

La secciones del sistema Dual que cumplen derivas:

VIGAS	SECCIONES	
	Base(m)	Altura(m)
Carguera	0.30	0.45
Sísmica	0.20	0.45

Tabla 19. Secciones finales de Vigas, Sistema Dual Zona Alta

COLUMNA	SECCIONES	
	Base (m)	Altura(m)
Col Central y Exterior, pisos 1-2-3	0.60	0.60
Col Central y Exterior, pisos 4	0.45	0.45
Col Central y Exterior, pisos 5	0.30	0.30
Columna Esquinera, pisos 1	0.60	0.60
Columna Esquinera, pisos 2-3	0.55	0.55
Columna Esquinera, pisos 4	0.40	0.40
Columna Esquinera, pisos 5	0.30	0.30
Muro 1e=20 cm., pisos 1	6.0	3.4
Muro 1 e=20 cm., pisos 2-3-4-5	6.0	2.65

Muro 2 e=20 cm., pisos 1	4.0	3.4
Muro 2 e=20 cm., pisos 2-3-4-5	4.0	2.65

Tabla 20. Secciones finales de Muros y columnas zona alta

5.6.2.4.1 Derivas

Todos los Sistemas fueron diseñados para cumplir con los requerimientos de deriva estipulado en la NSR-98 (A.6.4).

Nivel	% Deriva
1	0.87
2	0.85
3	0.82
4	0.83
5	0.81

Tabla 21. Derivas en porcentaje para el sistema dual Zona alta

5.6.2.5 SISTEMA CON AISLADORES $A_a = 0.30$

Las secciones del sistema pórtico que cumplen derivas son:

VIGAS	SECCIONES	
	Base(m)	Altura(m)
Carguera	0.30	0.45
Sísmica	0.25	0.45

Tabla 21. Secciones finales de Vigas para Sistema con Aisladores Zona Alta

COLUMNA	SECCIONES	
	Base (m)	Altura(m)
Col Central y Exterior, pisos 1	0.45	0.45
Col Central y Exterior, pisos 2	0.40	0.40
Col Central y Exterior, pisos 3	0.35	0.35
Col Central y Exterior, pisos 4,5	0.30	0.30
Columna Esquinera, pisos 1	0.35	0.35
Columna Esquinera, pisos 2,3,4,5	0.30	0.30

Tabla 22. Secciones finales de Columnas para el Sistema con Aisladores Zona Alta

Los elementos estructurales sobre el sistema de aislación deben diseñarse utilizando todos los requerimientos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas y las fuerzas obtenidas para el

análisis dinámico reducidas por el factor R . El factor R debe basarse en el tipo de esquema resistente a fuerzas laterales utilizado en la superestructura para pórticos de concreto resistentes a momentos y una altura máxima de 35 metros Según lo estipulado en la Tabla 4 de la ACHISINA el valor de R es igual a **2**.

Para la modelación de la estructura con los Aisladores se utilizó un análisis modal cronológico en el tiempo. Este método de análisis dinámico cronológico consiste en una evaluación paso a paso en el tiempo de la respuesta de la estructura, con respecto a la demanda que experimentan ocasionada por el sismo de análisis, usando un acelerograma o registros de un sismo artificial como base de entrada del movimiento, es decir, las fuerzas inerciales, fuerzas internas y desplazamientos de la estructura se evalúan para cada dato (o valor) del acelerograma proveniente del sismo utilizado en el análisis.

El registro sísmico usado fue el de un sismo artificial que tiene como propiedad particular, que al establecer un espectro de repuesta, a partir de dicho registro, es compatible con el espectro de respuesta que se construye con los parámetro establecidos por la NSR – 98. Este sismo artificial fue obtenido mediante un programa llamado **ACELEROS**, el cual con el espectro de respuesta genera un sismo compatible con este.

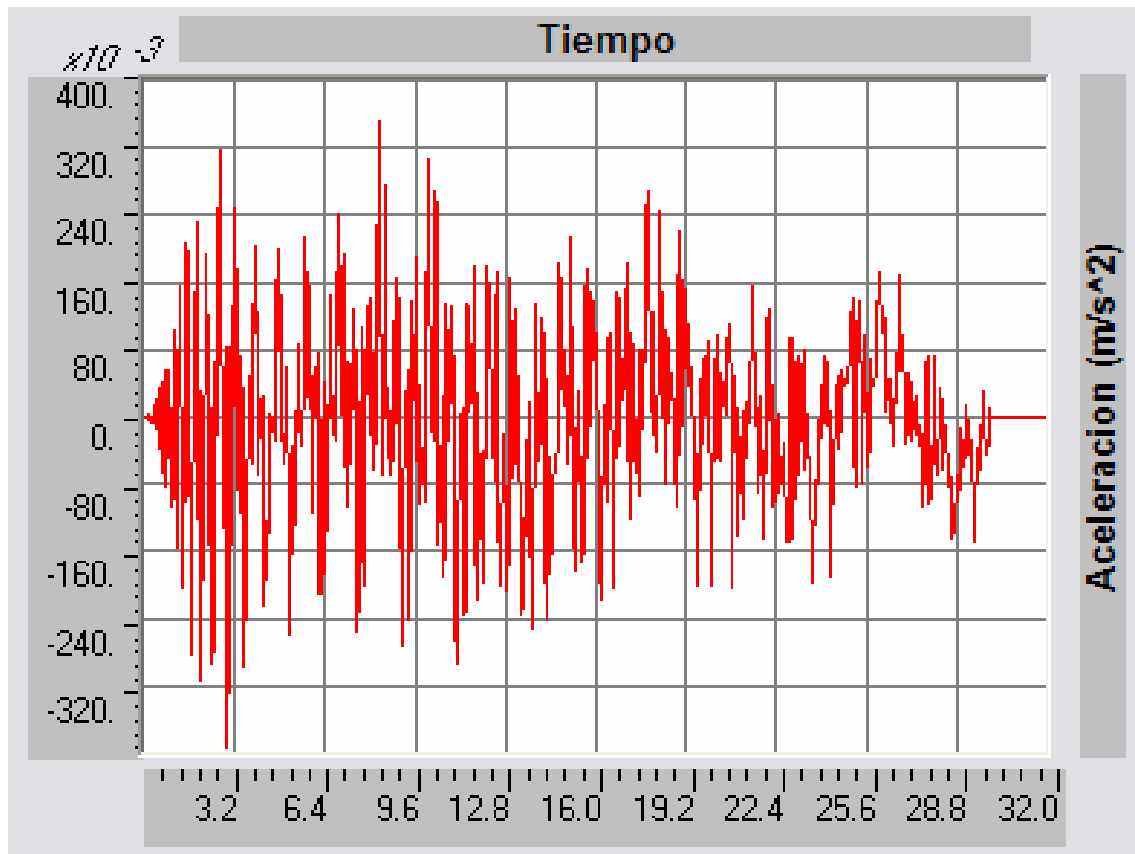


Figura 41. Registro Sísmico Artificial Zona Alta

5.6.2.5.1 Derivas

De acuerdo con UBC-97, El desplazamiento máximo de entrepiso correspondiente a la fuerza lateral de diseño, incluyendo el desplazamiento horizontal debido a los efectos de segundo orden del sistema de aislamiento, no debe exceder el siguiente límite:

El cociente máximo entre el desplazamiento de entrepiso de la estructura y la altura del piso por sobre el sistema de aislación mediante análisis espectral, no debe exceder de **0.02 / R**.

Nivel	% Deriva
1	0.43
2	0.42
3	0.36
4	0.29
5	0.14

Tabla 23. Derivas en porcentaje para el sistema con Aisladores Zona Alta

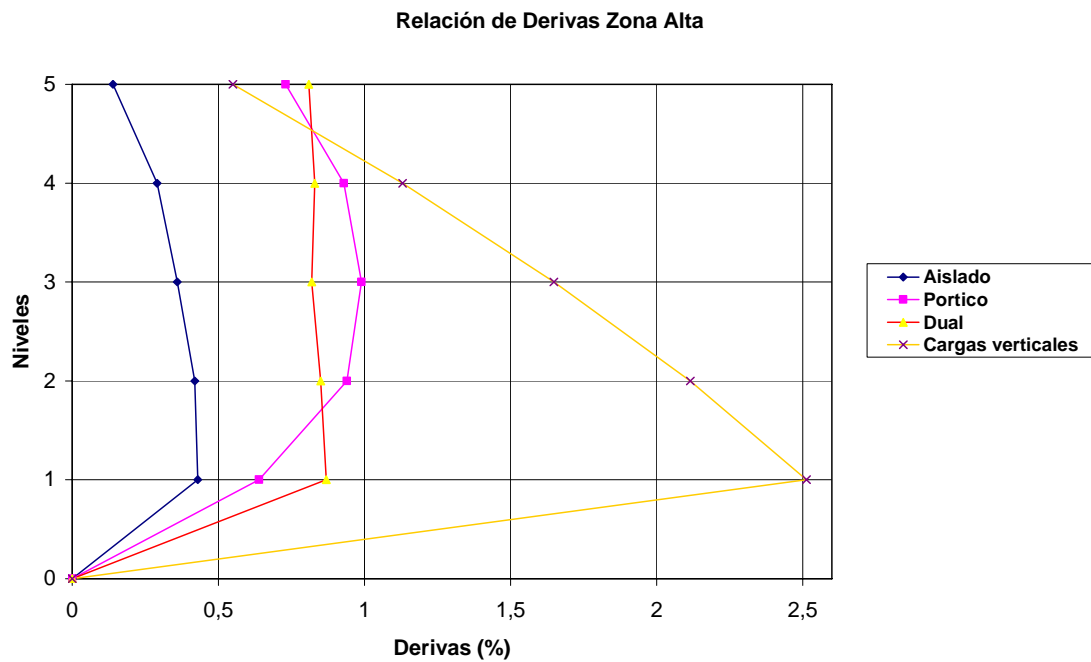


Figura 42. Relación de derivas ZA

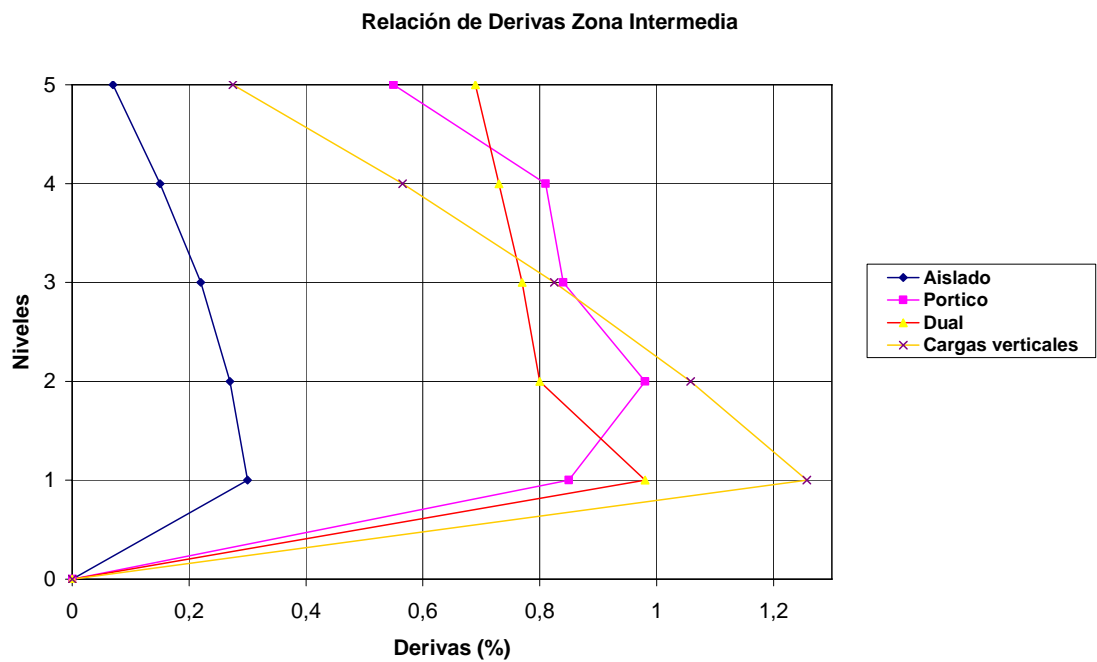


Figura 43. Relación de derivas ZI

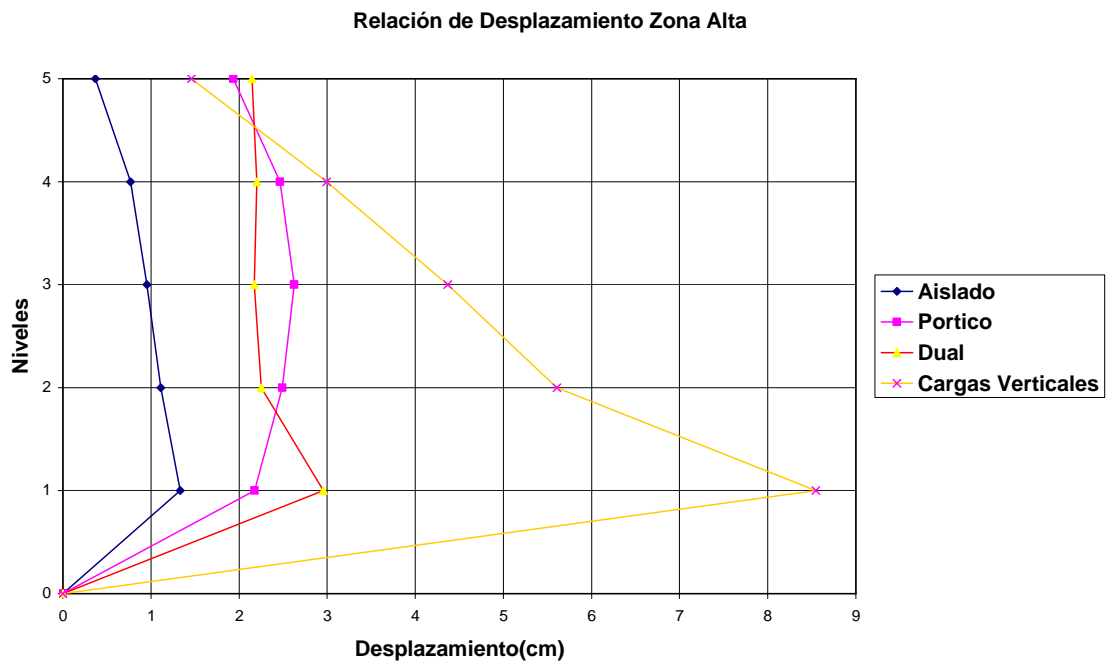


Figura 44. Relación de desplazamientos ZA

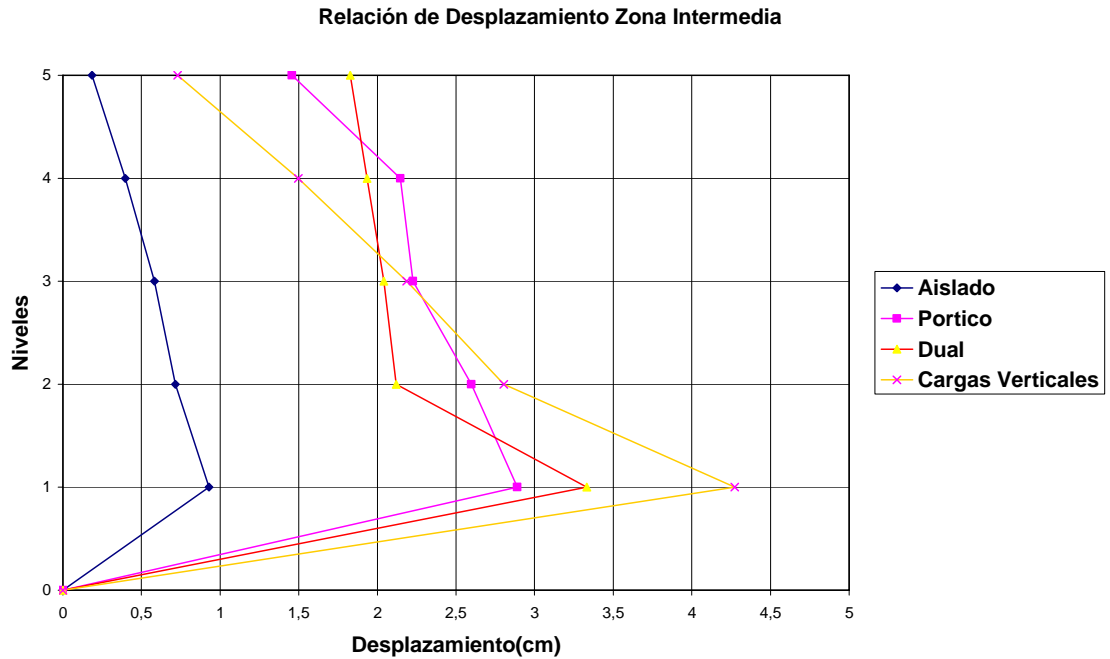


Figura 45. Relación de desplazamiento ZI

5.6.2.6. COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS (Curvas de histéresis)

Dependiendo del tipo de goma y demás elementos utilizados en la fabricación de los aisladores, la relación fuerza aplicada vs deformación del dispositivo se vera afectada en lo que respecta a la capacidad de disipación de energía del dispositivo; fenómeno que esta totalmente ligado al área que encierran las curvas de histéresis que desarrolla un aislador durante un evento sísmico.

A continuación se muestran las curvas de histéresis típicas desarrolladas por cada tipo de aislador en los modelos enmarcados en las dos zonas de amenaza sísmica.

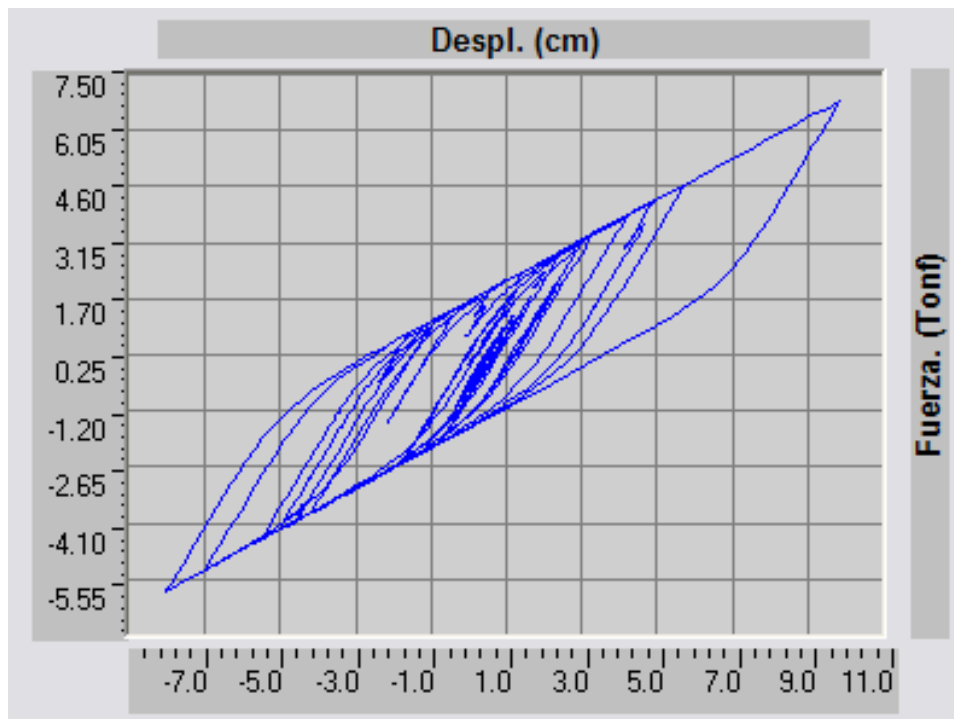


Figura 46. Curva de histéresis aislador en zona intermedia

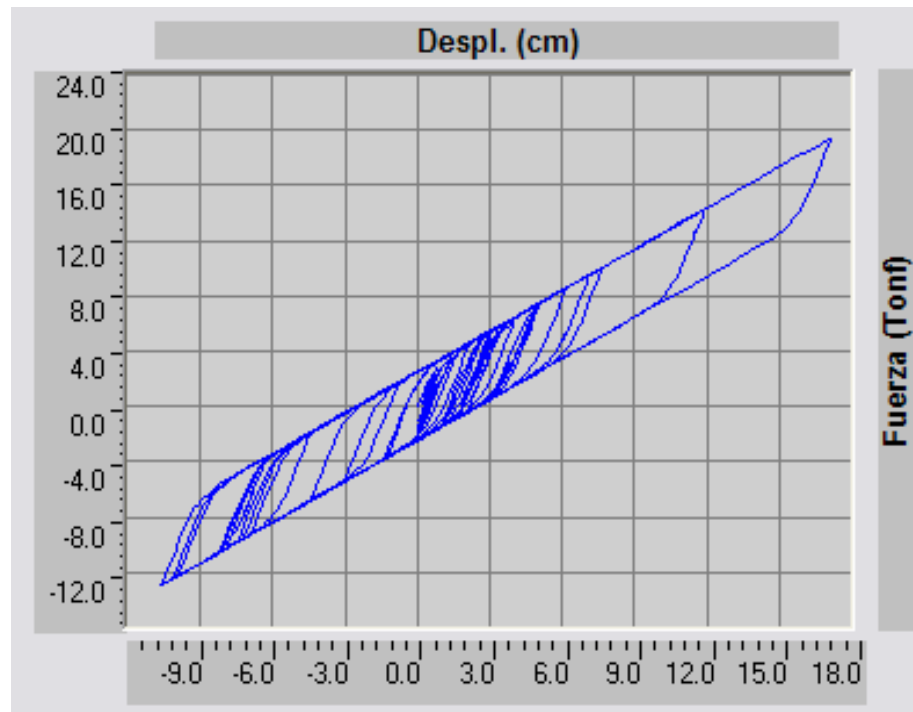


Figura 47. Curva de histéresis aislador en zona alta

5.6.3. CÁLCULO DE LOS AISLADORES ESLASTOMERICOS

Para la modelación de las estructuras con los aisladores elastoméricos se utilizó el programa estructural SAP2000 y para el cálculo de las propiedades mecánicas y geométricas de los aisladores se utilizó el programa matemático MATHCAD.

5.6.3.1 Procedimiento para el análisis y diseño de los Aisladores

Inicialmente calculamos las secciones de los elementos que cumplan con las especificaciones mínimas de las normas NSR-98, para resistir demanda de las cargas verticales. Luego hacemos un análisis dinámico de la estructura, mediante un análisis de historia en el tiempo (time history) con un registro sísmico artificial que es compatible con el espectro de respuesta construido a partir de las condiciones supuestas (ubicación, tipo de suelo, etc.).

Una vez Hecho el análisis calculamos las derivas por piso y teniendo en cuenta la máxima, definimos el factor de reducción, es decir, cuanto hay que reducir las derivas existentes en la estructura para cumplir las especificaciones de la NSR-98, llevarla a ser menor o igual al 1% del desplazamiento relativo entre piso.

Luego se calcularon las propiedades de los aisladores mediante una hoja de cálculo en MATCAD, calculados los parámetros, se introducen los valores de estos parámetros en el programa estructural utilizado (Sap2000), analizamos y comparamos los desplazamientos de diseño que den dar igual a los utilizados en el diseño de los aisladores.

Después de analizado el modelo se procede al calculo estructural de cada uno de los elementos del este, este calculo se hizo a través de un programa

de calculo llamado SISMICAD, el cual facilita la obtención de las cantidades de obra.

En el modelo de SISMICAD se realizó un análisis sísmico de la estructura haciendo uso del método de la fuerza horizontal equivalente, teniendo en cuenta que las aceleraciones sufridas por la estructura debían ser las mismas que las que experimenta la superestructura del modelo aislado en sap2000.

El procedimiento descrito en el párrafo anterior se logró usando como aceleración basal para la estructura en SISMICAD aquella que coincidiera en el espectro de aceleraciones de diseño con el periodo fundamental de vibración de la superestructura del modelo aislado en sap2000.

Debido a que el análisis de los aisladores se hizo en sap2000 el diseño de los elementos estructurales fue verificado, esto es; se corroboró que las cuantías utilizadas a partir del diseño con SISMICAD coincidieran con las obtenidas en el modelo aislado en sap2000.

A continuación se muestra el cálculo de las características mecánicas y geométricas de los aisladores de zona de amenaza sísmica intermedia y alta.

DISEÑO DE AISLADORES TIPO A ZONA DE RIESGO SISMICO INTERMEDIO

Desplazamientos según proposición del código:

Datos:

Zona Sísmica Intermedia

$$Z := \frac{5}{8} \quad M_M := 1.2$$

$$B_D := 1.77 \quad B_M := 1.77$$

Desplazamientos de diseño (D_D, D_{TD}):

$$C_D := 300 \text{mm} \cdot Z \quad C_D = 187.5 \text{mm}$$

$$D_D := \frac{C_D}{B_D} \quad D_D = 10.6 \text{cm}$$

$$D_{TD} := 1.1 \cdot D_D \quad D_{TD} = 11.6 \text{cm}$$

Desplazamientos máximos (D_M, D_{TM}):

$$C_M := 300 \text{mm} \cdot M_M \cdot Z \quad C_M = 22.5 \text{cm}$$

$$D_M := \frac{C_M}{B_M} \quad D_M = 12.7 \text{cm}$$

$$D_{TM} := 1.1 \cdot D_M \quad D_{TM} = 14 \text{cm}$$

2. Cargas sobre Aisladores:

$$D := 97.47 \text{Tonf}$$

$$I_o := 24.5 \text{Tonf} \quad \text{Live} := 0.6 I_o \quad \text{Live} = 14.7 \text{Tonf}$$

$$E := 2.35 \text{Tonf}$$

3. Combinaciones de carga:

Largo Plazo	$D + \text{Live}$
Corto Plazo	$1.2 \cdot D + \text{Live} + E $
	$0.8D - E $

4. Compresión para carga a largo plazo

$$P_{LT} := D + \text{Live} \quad P_{LT} = 112.2 \text{Tonf}$$

Se utilizará un compuesto H6 (Bridgestone Manual):

$$\sigma_{LT} := 100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Tensión admisible en compresión para cargas a largo plazo.}$$

Se utilizará un aislador circular de diametro exterior D_e

Considerando

$$D_e := \sqrt{\frac{4P_{LT}}{\pi \sigma_{LT}}} \quad D_e = 37.79 \text{cm}$$

Se escoge un diametro de 50 cm:

$$D_e := 50 \text{cm}$$

$$\text{Area} := \frac{\pi}{4} \cdot D_e^2 \quad \text{Area} = 1963 \text{cm}^2$$

5. Periodo Aislado

Se halla el peso sísmico sobre el aislador:

$$w := D + 0.25 I_o \quad w = 103.6 \text{Tonf}$$

El periodo aislado de una estructura aislada queda determinado por la siguiente expresión:

Fijando $T_D := 2.5s$ se obtiene la rigidez necesaria del aislador para alcanzar dicho periodo.

$$K_{Dmax} := \left(\frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \cdot \frac{w}{g} \quad K_{Dmax} = 66.73 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Luego la rigidez lateral de un aislador es:

Para: $\gamma := 1.3$ Deformación angular del elastomero

$$G_{\text{aislador}} := (21.89 - 41.68\gamma + 45.05\gamma^2 - 25.33\gamma^3 + 7.068\gamma^4 - 0.7675\gamma^5) \cdot 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\beta := 0.1669 + 0.00539\gamma - 0.002358\gamma^2 - 0.002169\gamma^3 \quad \text{Relación de amortiguamiento}$$

$$\beta = 0.165$$

$$U := .3484 + .002307\gamma - .01261\gamma^2 - .002846\gamma^3 \quad \text{Constante de la carga de fluencia}$$

$$U = 0.324$$

$$G_{\text{aislador}} = 5.528 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Modulo de rigidez a cortante para el material de goma}$$

$$H_R := \frac{D_D}{\gamma} \quad H_R := 16\text{cm} \quad \text{Altura de goma requerida para alcanzar el periodo}$$

$$K_h := \frac{G_{\text{aislador}} \cdot \text{Area}}{H_R} \quad K_h = 67.84 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

$$\text{Verificación2} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } K_h \geq K_{Dmax} \\ \text{"NO, iterar con la Def. angular"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Verificación2} = \text{"OK"}$$

6. Deformacion angular máxima:

$$\gamma_s := \frac{D_{TM}}{H_R} \quad \gamma_s = 0.872 \quad \text{Def. Angular por corte}$$

$$P_{ST} := 1.2D + \text{Live} + |E| \quad P_{ST} = 134.014\text{Tonf} \quad \text{Carga máx.possible sobre el aislador}$$

$$A_{ef} := \frac{1}{2} \cdot \left(D_e^2 \cdot \text{asin} \left(\frac{\sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2}}{D_e} \right) - D_{TM} \cdot \sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2} \right)$$

$$A_{ef} = 1275 \text{ cm}^2$$

Area de la columna efectiva sobre la cual actua
P_{ST} Para la cond. de sismo máx.

$$E_o := 25 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para compuesto H-6

$$k := 1$$

Para un aislador circular

Asumiendo un FS de 1.5:

$$FS := 1.5$$

$$S' := 15$$

Factor de forma.

$$\epsilon_b := 6.35$$

$$\gamma_o := \gamma_s + 6S' \cdot \frac{\frac{P_{ST}}{A_{ef}}}{E_o \cdot (1 + 2 \cdot k \cdot S'^2)} \quad \gamma_o = 1.712$$

$$\text{verificacion} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \gamma_o \leq \frac{0.85\epsilon_b}{FS} \\ \text{"No, Cambiar } S' & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{verificacion} = \text{"OK"}$$

Calculo del espesor de las laminas de neopreno:

$$t_r := \frac{D_e}{4 \cdot S'} \quad t_r = 0.833 \text{ cm}$$

$$t_R := 0.8 \text{ cm}$$

Espesor escogido

Calculo del número de capas de goma:

$$n_r := \frac{H_R}{t_R} \quad n_r = 20$$

Parametros definitivos:

$$S' := \frac{D_e}{4 \cdot t_R} \quad S' = 15.6$$

$$\gamma_o := \gamma_s + 6S' \cdot \frac{\frac{P_{ST}}{A_{ef}}}{E_o \cdot (1 + 2 \cdot k \cdot S'^2)} \quad \gamma_o = 1.68$$

$$FS := 0.85 \frac{\epsilon_b}{\gamma_o} \quad FS = 3.22$$

Resumen:

$$n_r = 20 \quad t_R = 0.8 \text{ cm} \quad H_R = 16 \text{ cm}$$

7. Tensión en placas intermedias de acero:

Se determinará el espesor de las placas intermedia del acero de modo que la tebsión por tracción en dichas placas sea menor que la admisible:

$$\sigma_c := \frac{P_{ST}}{\text{Area}} \quad \sigma_c = 0.068 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Compresión en el aislador}$$

Se asume que la tensión en las laminas de acero no debe ser mayor que el 75% del esfuerzo de fluencia.

La tensión máxima en las placas de acero se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$t_s := 0.5 \text{ mm} \quad \text{Espesor de las laminas de acero}$$

$$\sigma_y := 2.53 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Esfuerzo de fluencia de acero A-36}$$

$$\sigma_s := 1.5 \cdot \frac{t_R}{t_s} \cdot \sigma_c \quad \sigma_s = 1.64 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Comprobación} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_s \leq 0.75 \sigma_y \\ \text{"No, cambiar t.s"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Comprobación} = \text{"OK"}$$

$$\text{Usar} \quad t_s := 5 \text{ mm}$$

8. Verificacion de frecuencia de vibración vertical:

La frecuencia de vibración vertical de un aislador puede ser calcula por la siguiente expresión:

$$k_g := 20000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Módulo volumétrico de la goma}$$

$$E_c := \frac{1}{\frac{1}{E_o \cdot (1 + 2k \cdot S^2)} + \frac{4}{3k_g}} \quad E_c = 6737.7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Módulo elasticidad a compresión del aislador}$$

$$k_v := \frac{\text{Area} \cdot E_c}{H_R}$$

$$k_v = 82683.7 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Rigidez vertical del aislador

$$f_v := \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{k_v}{w}}$$

$$f_v = 14.1 \text{ Hz}$$

Frecuencia de vibración vertical

$$\text{comprobación} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_v > 10 \text{ Hz} \\ \text{"No, Cambiar Características del aislador"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{comprobación} = \text{"OK"}$$

9. Verificación de estabilidad:

$$e_{\text{placas.exteriores}} := 2 \text{ cm}$$

$$H := n_r \cdot t_R + (n_r - 1) t_S + 2 \cdot e_{\text{placas.exteriores}}$$

Altura del aislador

$$H = 0.3 \text{ m}$$

$$R := \frac{G_{\text{aislador}} \cdot \text{Area}}{H_R} \cdot H$$

$$R = 20.01 \text{ Tonf}$$

$$E_b := E_o \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot S^2 \right)$$

$$E_b = 4.09 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$I := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_e}{2} \right)^4$$

$$I = 306796.2 \text{ cm}^4$$

$$K_\theta := \frac{E_b \cdot I}{H_R}$$

$$K_\theta = 78501.7 \text{ Tonf} \cdot \text{cm}$$

$$T := K_\theta \cdot H$$

$$T = 2315799.2 \text{ Tonf} \cdot \text{cm}^2$$

$$P_E := \frac{\pi^2 T}{H^2}$$

$$P_E = 26263.7 \text{ Tonf}$$

Finalmente:

$$P_{cr} := \frac{R}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{P_E}{R}} - 1 \right) \cdot \frac{A_{ef}}{\text{Area}}$$

$$P_{cr} = 464.2 \text{ Tonf}$$

El factor de seguridad calculado es:

$$F_S := \frac{P_{cr}}{P_{ST}}$$

$$F_S = 3.46$$

Calculo de los parámetros de diseño para la modelacion de la estructura con aisladores

$$F_o := K_h \cdot D_D$$

Fuerza necesaria para llevar el aislador a su desplazamiento de diseño.

$$F_o = 7.17 \text{Tonf}$$

$$F_u := U \cdot F_o$$

Fuerza necesaria para que el aislador fluya o alcance su deformación de fluencia.

$$F_u = 2.32 \text{Tonf}$$

$$K_1 := \frac{U - \pi \cdot \frac{\beta}{2} + U \cdot \pi \cdot \frac{\beta}{2}}{U - \pi \cdot \frac{\beta}{2}} \cdot K_h$$

Rigidez lateral del aislador antes de la fluencia (modelación no-lineal).

$$K_1 = 156.32 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

$$K_2 := (1 - U) \cdot K_h$$

Rigidez lateral del aislador después de la fluencia (modelación no-lineal).

$$K_2 = 45.87 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

$$K_h = 67.84 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Rigidez lateral efectiva del aislador para modelación lineal.

$$k_v = 82684 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Rigidez vertical del aislador.

DISEÑO DE AISLADORES TIPO A ZONA DE RIESGO SISMICO ALTO

Desplazamientos según proposición del código:

Datos:

Zona Sísmica Alta

$$Z := 1 \quad M_M := 1.2$$

$$B_D := 1.62\xi \quad B_M := 1.62\xi$$

Desplazamientos de diseño (D_D, D_{TD}):

$$C_D := 300\text{mm}Z \quad C_D = 300\text{mm}$$

$$D_D := \frac{C_D}{B_D} \quad D_D = 18.4\text{cm}$$

$$D_{TD} := 1.1 \cdot D_D \quad D_{TD} = 20.3\text{cm}$$

Desplazamientos máximos (D_M, D_{TM}):

$$C_M := 300\text{mm}M_M \cdot Z \quad C_M = 36\text{cm}$$

$$D_M := \frac{C_M}{B_M} \quad D_M = 22.1\text{cm}$$

$$D_{TM} := 1.1 \cdot D_M \quad D_{TM} = 24.3\text{cm}$$

2. Cargas sobre Aisladores:

$$D := 97.47\text{Tonf}$$

$$I_o := 24.5\text{Tonf} \quad \text{Live} := 0.6I_o \quad \text{Live} = 14.7\text{Tonf}$$

$$E := 3.07\text{Tonf}$$

3. Combinaciones de carga:

Largo Plazo	$D + \text{Live}$
Corto Plazo	$1.2 \cdot D + \text{Live} + E $
	$0.8D - E $

4. Compresión para carga a largo plazo

$$P_{LT} := D + \text{Live} \quad P_{LT} = 112.2 \text{Tonf}$$

Se utilizará un compuesto **H8** (Bridgestone Manual):

$$\sigma_{LT} := 120 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Tensión admisible en compresión para cargas a largo plazo.}$$

Se utilizará un aislador circular de diametro exterior D_e

Considerando

$$D_e := \sqrt{\frac{4P_{LT}}{\pi \sigma_{LT}}} \quad D_e = 34.5 \text{cm}$$

Se escoge un diametro de 50 cm:

$$D_e := 50 \text{cm}$$

$$\text{Area} := \frac{\pi}{4} \cdot D_e^2 \quad \text{Area} = 1963 \text{cm}^2$$

5. Periodo Aislado

Se halla el peso sísmico sobre el aislador:

$$w := D + 0.25 I_o \quad w = 103.6 \text{Tonf}$$

El periodo aislado de una estructur aislada queda determinado por la siguiente expresión:

Luego fijando $T_D := 2.64s$ se obtiene la rigidez necesaria del aislador para alcanzar dicho periodo.

$$K_{Dmax} := \left(\frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \cdot \frac{w}{g} \quad K_{Dmax} = 59.84 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Luego la rigidez lateral de un aislador es:

Para: $\gamma := 2$ Deformación angular del elastomero

Teniendo en cuenta las curvas para el compuesto, se tiene lo siguiente:

$$G_{\text{aislador}} := (35.99 - 91.53\gamma + 124.9\gamma^2 - 86.87\gamma^3 + 29.67\gamma^4 - 3.915\gamma^5) \cdot 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\beta := 0.1562 + 0.02277\gamma - 0.01435\gamma^2 - 0.0009072\gamma^3 \quad \text{Relación de amortiguamiento}$$

$$\beta = 0.137$$

$$U := 0.3345 + 0.01264\gamma - 0.0287\gamma^2 - 0.002419\gamma^3 \quad \text{Constante de la carga de fluencia}$$

$$U = 0.226$$

$$G_{\text{aislador}} = 7.01 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Modulo de rigidez a cortante para el material de goma}$$

$$H_R := \frac{D_D}{\gamma} \quad H_R := 18\text{cm} \quad \text{Altura de goma requerida para alcanzar el periodo}$$

$$K_h := \frac{G_{\text{aislador}} \cdot \text{Area}}{H_R} \quad K_h = 76.47 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

$$\text{Verificación2} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } K_h \geq K_{Dmax} \\ \text{"NO, iterar con la Def. angular"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Verificación2} = \text{"OK"}$$

6. Deformacion angular máxima:

$$\gamma_s := \frac{D_{TM}}{H_R} \quad \gamma_s = 1.351 \quad \text{Def. Angular por corte}$$

$$P_{ST} := 1.2 \cdot D + \text{Live} + |E| \quad P_{ST} = 134.734 \text{Tonf} \quad \text{Carga máx.posible sobre el aislador}$$

$$A_{ef} := \frac{1}{2} \cdot \left(D_e^2 \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2}}{D_e} \right) - D_{TM} \cdot \sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2} \right)$$

$$A_{ef} = 797 \text{ cm}^2$$

Area de la columna efectiva sobre la cual actua
P_{ST} Para la cond. de sismo máx.

$$E_o := 35 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para compuesto H-8

$$k := 1$$

Para un aislador circular

Asumiendo un FS de 1.5:

$$FS := 1.5$$

$$S' := 17$$

Factor de forma.

$$\epsilon_b := 6.35$$

$$\gamma_o := \gamma_s + 6S' \cdot \frac{\frac{P_{ST}}{A_{ef}}}{E_o \cdot (1 + 2 \cdot k \cdot S'^2)} \quad \gamma_o = 2.202$$

$$\text{verificacion} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \gamma_o \leq \frac{0.85\epsilon_b}{FS} \\ \text{"No, Cambiar S'"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{verificacion} = \text{"OK"}$$

Calculo del espesor de las laminas de neopreno:

$$t_R := \frac{D_e}{4 \cdot S'} \quad t_R = 0.735 \text{ cm}$$

$$t_R := 0.8 \text{ cm} \quad \text{Espesor escogido}$$

Calculo del número de capas de goma:

$$n_r := \frac{H_R}{t_R} \quad n_r = 23$$

Parametros definitivos:

$$S' := \frac{D_e}{4 \cdot t_R} \quad S' = 15.6$$

$$\gamma_o := \gamma_s + 6S' \cdot \frac{\frac{P_{ST}}{A_{ef}}}{E_o \cdot (1 + 2 \cdot k \cdot S'^2)} \quad \gamma_o = 2.28$$

$$FS := 0.85 \frac{\varepsilon_b}{\gamma_o} \quad FS = 2.37$$

Resumen:

$$n_r = 23 \quad t_R = 0.8 \text{ cm} \quad H_R = 18 \text{ cm}$$

7. Tensión en placas intermedias de acero:

Se determinará el espesor de las placas intermedia del acero de modo que la tebsión por tración en dichas placas sea menor que la admisible:

$$\sigma_c := \frac{P_{ST}}{\text{Area}} \quad \sigma_c = 0.069 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Compresión en el aislador}$$

Se asume que la tensión en las laminas de acero no debe ser mayor que el 75% del esfuerzo de fluencia.

La tensión máxima en las placas de acero se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$t_s := 0.5 \text{ mm} \quad \text{Espesor de las laminas de acero}$$

$$\sigma_y := 2.53 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Esfuerzo de fluencia de acero A-36}$$

$$\sigma_s := 1.5 \cdot \frac{t_R}{t_s} \cdot \sigma_c \quad \sigma_s = 1.65 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Comprobación} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_s \leq 0.75 \sigma_y \\ \text{"No, cambiar t.s"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Comprobación} = \text{"OK"}$$

$$\text{Usar} \quad t_s := 5 \text{ mm}$$

8. Verificación de frecuencia de vibración vertical:

La frecuencia de vibración vertical de un aislador puede ser calcula por la siguiente expresión:

$k_g := 20000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Módulo volumétrico de la goma
$E_c := \frac{1}{\frac{1}{E_o \cdot (1 + 2k \cdot S^2)} + \frac{4}{3k_g}}$	$E_c = 7996.1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ Módulo elasticidad a compresión del aislador
$k_v := \frac{\text{Area} \cdot E_c}{H_R}$	$k_v = 87223.6 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$ Rigidez vertical del aislador
$f_v := \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{k_v}{w}}$	$f_v = 14.5\text{Hz}$ Frecuencia de vibración vertical
$\text{comprobación} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } f_v > 10\text{Hz} \\ \text{"No,Cambiar Caracteristicas del aislador"} & \text{otherwise} \end{cases}$	
comprobación = "OK"	

9. Verificación de estabilidad:

$e_{\text{placas.exteriores}} := 2.\text{cm}$	
$H := n_r \cdot t_R + (n_r - 1)t_S + 2 \cdot e_{\text{placas.exteriores}}$	Altura del aislador
$H = 0.33 \text{ m}$	
$R := \frac{G_{\text{aislador}} \cdot \text{Area}}{H_R} \cdot H$	$R = 25.04 \text{ Tonf}$
$E_b := E_o \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot S^2\right)$	$E_b = 5.73 \frac{\text{Tonf}}{\text{cm}^2}$
$I := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_e}{2}\right)^4$	$I = 306796.2 \text{ cm}^4$
$K_\theta := \frac{E_b \cdot I}{H_R}$	$K_\theta = 97691 \text{ Tonf} \cdot \text{cm}$

$$T := K_{\theta} \cdot H$$

$$T = 3199379 \text{Tonf} \cdot \text{cm}^2$$

$$P_E := \frac{\pi^2 T}{H^2}$$

$$P_E = 29440.3 \text{Tonf}$$

Finalmente:

$$P_{cr} := \frac{R}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{P_E}{R}} - 1 \right) \cdot \frac{A_{ef}}{\text{Area}}$$

$$P_{cr} = 343.5 \text{Tonf}$$

El factor de seguridad calculado es:

$$F_S := \frac{P_{cr}}{P_{ST}} \quad F_S = 2.55$$

Calculo de los parámetros de diseño para la modelacion de la estructura con aisladores

$$F_O := K_h \cdot D_D$$

Fuerza necesaria para llevar el aislador a su desplazamiento de diseño.

$$F_O = 14.09 \text{Tonf}$$

$$F_u := U \cdot F_O$$

Fuerza necesaria para que el aislador fluya o alcance su deformación de fluencia.

$$F_u = 3.18 \text{Tonf}$$

$$K_1 := \frac{U - \pi \cdot \frac{\beta}{2} + U \cdot \pi \cdot \frac{\beta}{2}}{U - \pi \cdot \frac{\beta}{2}} \cdot K_h$$

Rigidez lateral del aislador antes de la fluencia (modelación no-lineal).

$$K_1 = 437.17 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

$$K_2 := (1 - U) \cdot K_h$$

Rigidez lateral del aislador después de la fluencia (modelación no-lineal).

$$K_2 = 59.21 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

$$K_h = 76.47 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Rigidez lateral efectiva del aislador para modelación lineal.

$$k_v = 87224 \frac{\text{Tonf}}{\text{m}}$$

Rigidez vertical del aislador.

5.6.3.2. Detalles De La Geometría De Los Aisladores

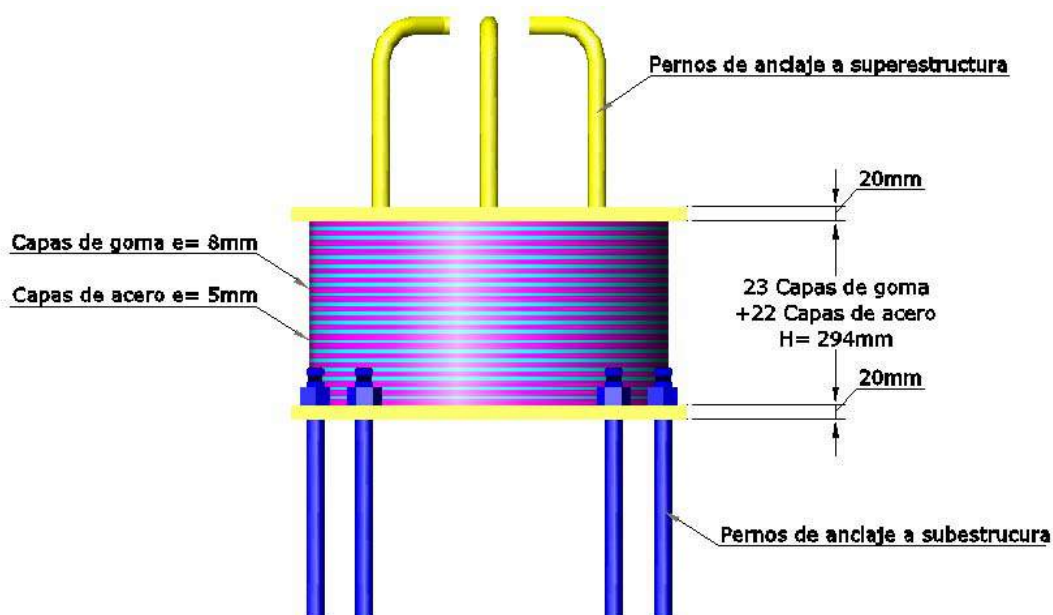


Figura 48. Propiedades geométricas de aislador Zona Alta

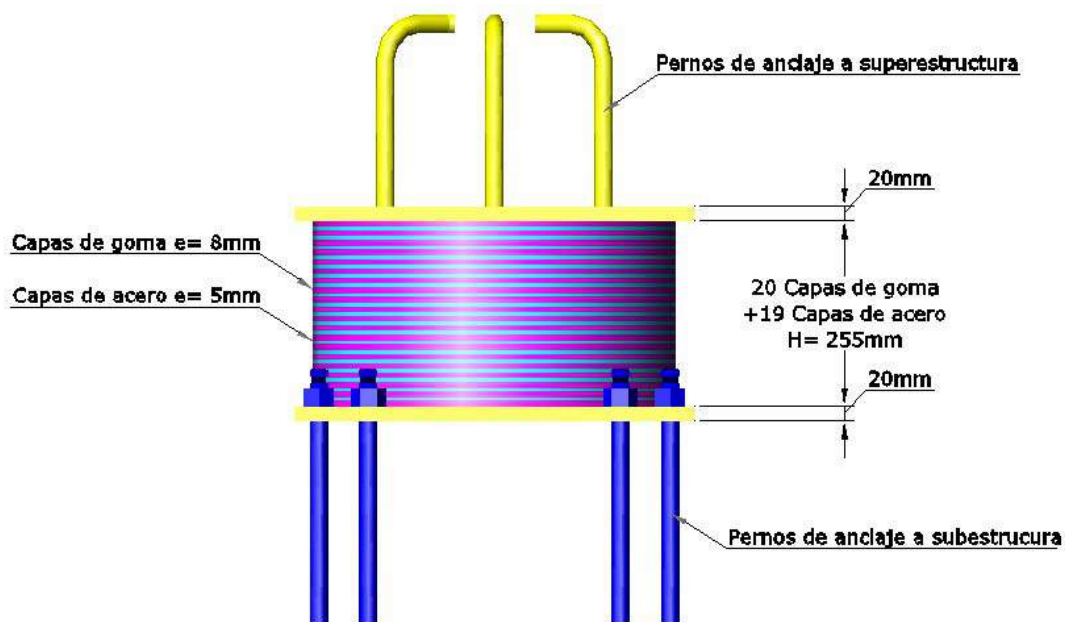


Figura 49. Propiedades geométricas de aislador Zona Intermedia

5.6.4. Presupuestos.

Material	Costo (Pesos)
Concreto 3000 Psi (m ³)	238000
Concreto 4000 Psi (m ³)	280500
Acero (kg)	2500

Tabla 24. Precios de los Materiales

Para el precio de los dispositivos de reducción de vibraciones se hizo una cotización por medio de una empresa chilena (Sirve) asociada a la multinacional WEIR-VULCO fabricantes de estos dispositivos.

El precio estimado por los ingenieros de la compañía es de \$ 65.000/m² de construcción.

Con base a los precios de los materiales y de los dispositivos se hizo un análisis de costos (sin tener en cuenta aspectos arquitectónicos tales como muros divisorios y demás) según cada sistema de resistencia sísmica y para el sistema de control de vibraciones para cada una de las zonas de riesgo sísmico, el cual arrojó los siguientes resultados.

MODELO SISTEMA DE PÓRTICOS Aa=0,15									
ITEMS	Elemento tipo	Losa	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor Total Acero	Valor Total Concreto
1	VIGAS								
1.1	Viga carguera central VCC1	1,2,3	9	355.29	1.92	3197.61	17.28	7,994,025	4,112,640
1.2	Viga carguera Exterior VCE1	1,2,3	6	339.2	1.92	2035.2	11.52	5,088,000	2,741,760
1.3	Viga sismica central VSC1	1,2,3	9	416.16	2.25	3745.44	20.25	9,363,600	4,819,500
1.4	Viga sismica Exterior VSE1	1,2,3	6	423.39	2.25	2540.34	13.5	6,350,850	3,213,000
1.5	Viga carguera central VCC2	4	3	281.73	1.92	845.19	5.76	2,112,975	1,370,880
1.6	Viga carguera Exterior VCE2	4	2	243.35	1.92	486.7	3.84	1,216,750	913,920
1.7	Vigas sismica Central VSC2	4,5	6	323.69	2.25	1942.14	13.5	4,855,350	3,213,000
1.8	Viga sismica Exterior VSE2	4,5	4	323.69	2.25	1294.76	9	3,236,900	2,142,000
1.9	Viga carguera central VCC3	5	3	245.6	1.92	736.8	5.76	1,842,000	1,370,880
1.10	Viga carguera Exterior VCE3	5	2	239.43	1.92	478.86	3.84	1,197,150	913,920
1.11	Viga de Cimentacion VC1	-	5	200.92	1.92	1004.6	9.6	2,511,500	2,284,800
1.12	Viga de Cimentacion VC2	-	5	290.46	1.92	1452.3	9.6	3,630,750	2,284,800
SUBTOTAL						19759.94	123.45	49,399,850	29,381,100
2	VIGUETAS								
2.1	Entrepiso	1,2,3,4	64	136	0.9	8,704	57.6	21,760,000	13,708,800
2.2	Cubierta	5	16	112	0.9	1,792	14.4	4,480,000	3,427,200
SUBTOTAL						10496	72	26,240,000	17,136,000
3	LOSETA								
3.1	Loseta (5 cm)	1,2,3,4,5	5		19.2	-	96	-	22,848,000
SUBTOTAL						0	96	-	22,848,000
4	COLUMNAS								
4.1	Columna Esquinera		4	456.57	1.95	1826.28	7.8	4,565,700	2,187,900
4.2	Columna Centrales		21	557.62	3	11710.02	63	29,275,050	17,671,500
SUBTOTAL						13536.3	70.8	33,840,750	19,859,400
5	ZAPATAS								
5.1	Zapata 2,5*2,5		4	193.92	3.13	775.68	12.52	1,939,200	2,979,760
5.2	Zapata 3,1*3,1		12	290.4	4.81	3484.8	57.72	8,712,000	13,737,360
5.3	Zapata 3,4*3,4		9	345.84	5.78	3112.56	52.02	7,781,400	12,380,760
SUBTOTAL						7373.04	122.26	18,432,600	29,097,880
TOTAL COSTO DIRECTO								127,913,200	118,322,380

SISTEMA DUAL Aa=0,15									
ITEMS	Elemento tipo	Losas	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor Total Acero	Valor Total Concreto
1	VIGAS								
1.1	Viga carguera central VCC1	1,2,3	9	312.11	1.92	2808.99	17.28	7,022,475	4,112,640
1.2	Viga carguera Exterior VCE1	1,2,3	6	341.73	1.92	2050.38	11.52	5,125,950	2,741,760
1.3	Viga sismica central VSC1	1,2,3	9	314.01	2.4	2826.09	21.6	7,065,225	5,140,800
1.4	Viga sismica Exterior VSE1	1,2,3	6	310.28	2.4	1861.68	14.4	4,654,200	3,427,200
1.5	Viga carguera central VCC2	4	3	284.75	1.92	854.25	5.76	2,135,625	1,370,880
1.6	Viga carguera Exterior VCE2	4	2	294.97	1.92	589.94	3.84	1,474,850	913,920
1.7	Vigas sismica Central VSC2	4.5	6	343.85	2.4	2063.1	14.4	5,157,750	3,427,200
1.8	Viga sismica Exterior VSE2	4.5	4	343.85	2.4	1375.4	9.6	3,438,500	2,284,800
1.9	Viga carguera central VCC3	5	3	252.97	1.92	758.91	5.76	1,897,275	1,370,880
1.10	Viga carguera Exterior VCE3	5	2	236.65	1.92	473.3	3.84	1,183,250	913,920
1.11	Viga de Cimentacion VC1	-	5	200.92	1.92	1004.6	9.6	2,511,500	2,284,800
1.12	Viga de Cimentacion VC2	-	5	290.46	1.92	1452.3	9.6	3,630,750	2,284,800
SUBTOTAL						18118.94	127.2	45,297,350	30,273,600
2	VIGUETAS								
2.1	Entrepiso	1,2,3,4	64	136	0.9	8,704	57.6	21,760,000	13,708,800
2.2	Cubierta	5	16	112	0.9	1,792	14.4	4,480,000	3,427,200
SUBTOTAL						10496	72	26,240,000	17,136,000
3	LOSETA								
3.1	Loseta (5 cm)	1,2,3,4,5	5		19.2	-	96	-	22,848,000
SUBTOTAL						0	96	-	22,848,000
4	MUROS								
4.1	Muro e=0.20 B=6.0m		2	1034.5	17.40	2069	34.8	5,172,500	8,282,400
4.2	Muro e=0.20 B=4.0m		2	612.45	12.3	1224.9	24.6	3,062,250	5,854,800
SUBTOTAL						3294	59.4	8,234,750	14,137,200
5	COLUMNAS								
5.1	Columna Exteriores		16	305.68	1.09	4890.88	17.44	12,227,200	4,891,920
5.2	Columna Interiores		9	356.78	1.32	3211.02	11.88	8,027,550	3,332,340
SUBTOTAL						8101.9	29.32	20,254,750	8,224,260
6	ZAPATAS								
6.1	Zapata 2,3*2,3		2	200.5	2.65	401	5.3	1,002,500	1,261,400
6.2	Zapata 2,7*2,7		12	245.38	3.65	2944.56	43.8	7,361,400	10,424,400
6.3	Zapata 2,5*2,5		2	200.4	3.13	400.8	6.26	1,002,000	1,489,880
6.4	Zapata 3,35*3,35		9	500	5.62	4500	50.58	11,250,000	12,038,040
6.5	Zapata Muro 7.2X2.0		2	589.46	10	1178.92	20	2,947,300	4,760,000
6.6	Zapata Muro 6.0X3.0		2	325.76	6.5	651.52	13	1,628,800	3,094,000
SUBTOTAL						8246.36	105.94	25,192,000	33,067,720
TOTAL COSTO DIRECTO								125,218,850	125,686,780

SISTEMA CON AISLADORES Aa=0,15									
ITEMS	Elemento	Losa	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor Total Acero	Valor Total Concreto
1	VIGAS								
1.1	Viga carguera central VCC1	2,3	6	331.86	1.6	1991.16	9.6	4,977,900	2,284,800
1.2	Viga carguera Exterior VCE1	2,3	4	284.25	1.6	1137	6.4	2,842,500	1,523,200
1.3	Viga sismica central VSC1	2,3	6	517.79	2.25	3106.74	13.5	7,766,850	3,213,000
1.4	Viga sismica Exterior VSE1	2,3	4	354.86	2.25	1419.44	9	3,548,600	2,142,000
1.5	Viga carguera central VCC2	1,4,5	9	322.06	1.6	2898.54	14.4	7,246,350	3,427,200
1.6	Viga carguera Exterior VCE2	1,4,5	6	252.89	1.6	1517.34	9.6	3,793,350	2,284,800
1.7	Vigas sismica Central VSC2	1,4,5	9	302.89	2.25	2726.01	20.25	6,815,025	4,819,500
1.8	Viga sismica Exterior VSE2	1,4,5	6	332.02	2.25	1992.12	13.5	4,980,300	3,213,000
1.9	Viga carguera central VCC3	6	3	238.93	1.6	716.79	4.8	1,791,975	1,142,400
1.10	Viga carguera Exterior VCE3	6	2	212.92	1.6	425.84	3.2	1,064,600	761,600
1.11	Vigas sismica Central VSC3	6	3	298.43	2.25	895.29	6.75	2,238,225	1,606,500
1.12	Viga sismica Exterior VSE3	6	2	298.43	2.25	596.86	4.5	1,492,150	1,071,000
SUBTOTAL						19423.13	115.5	48,557,825	27,489,000
2	VIGUETAS								
2.1	Vigueta de entepiso	1,2,3,4,5	80	136	0.9	10,880	72	27,200,000	17,136,000
2.2	Vigueta de cubierta	6	16	112	0.9	1,792	14.4	4,480,000	3,427,200
SUBTOTAL						12672	86.4	31,680,000	20,563,200
3	LOSETA								
3.1	Loseta	1,2,3,4,5	6		19.2	-	115.2	-	27,417,600
SUBTOTAL						0	115.2	-	27,417,600
4	AISLADORES								
4.1	Aislador Tipo		25						134,784,000
SUBTOTAL									
5	COLUMNAS								
5.1	Columna Esquinera		4	260.79	1.1	1043.16	4.4	2,607,900	1,234,200
5.2	Columna Exterior		12	260.6	1.1	3127.2	13.2	7,818,000	3,702,600
5.3	Columna Central		9	255.72	1.17	2301.48	10.53	5,753,700	2,953,665
SUBTOTAL						6471.84	28.13	16,179,600	7,890,465
6	PEDESTAL								
6.1	Pedestal tipo		25	50.5	0.22	1262.5	5.56875	3,156,250	1,325,363
SUBTOTAL						1262.5	5.56875	3,156,250	1,325,363
6	ZAPATAS								
6.1	Zapata Esquinera		4	100.6	1.76	402.4	7.056	1,006,000	1,679,328
6.2	Zapata Intermedia		12	224.1	3.03	2689.2	36.3	6,723,000	8,639,400
6.3	Zapata Central		9	491.5	4.76	4423.5	42.849	11,058,750	10,198,062
SUBTOTAL						7515.1	86.205	18,787,750	18,837,462
TOTAL COSTO DIRECTO								118,361,425	238,307,090

MODELO SISTEMA DE PÓRTICOS Aa=0,30									
ITEMS	Elemento tipo	Pisos	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor Total Acero	Valor Total Concreto
1	VIGAS								
1.1	Viga carguera central VCC1	1,2,3	9	324.83	1.92	2923.47	17.28	7,308,675	4,112,640
1.2	Viga carguera Exterior VCE1	1,2,3	6	357.42	1.92	2144.52	11.52	5,361,300	2,741,760
1.3	Viga sísmica central VSC1	1,2,3	9	347.11	2.25	3123.99	20.25	7,809,975	4,819,500
1.4	Viga sísmica Exterior VSE1	1,2,3	6	337.47	2.25	2024.82	13.5	5,062,050	3,213,000
1.5	Viga carguera central VCC2	4	3	280.76	1.92	842.28	5.76	2,105,700	1,370,880
1.6	Viga carguera Exterior VCE2	4	2	275.63	1.92	551.26	3.84	1,378,150	913,920
1.7	Vigas sísmica Central VSC2	4.5	6	319.08	2.25	1914.48	13.5	4,786,200	3,213,000
1.8	Viga sísmica Exterior VSE2	4.5	4	342.33	2.25	1369.32	9	3,423,300	2,142,000
1.9	Viga carguera central VCC3	5	3	237.59	1.92	712.77	5.76	1,781,925	1,370,880
1.10	Viga carguera Exterior VCE3	5	2	213.39	1.92	426.78	3.84	1,066,950	913,920
1.11	Viga de Cimentacion VC1	-	5	200.92	1.92	1004.6	9.6	2,511,500	2,284,800
1.12	Viga de Cimentacion VC2	-	5	290.46	1.92	1452.3	9.6	3,630,750	2,284,800
SUBTOTAL						18491	123.45	46,226,475	29,381,100
2	VIGUETAS								
2.1	Entrepiso	1,2,3,4	64	136	0.9	8,704	57.6	21,760,000	13,708,800
2.2	Cubierta	5	16	112	0.9	1,792	14.4	4,480,000	3,427,200
SUBTOTAL						10496	72	26,240,000	17,136,000
3	LOSETA								
3.1	Loseta (5 cm)	1,2,3,4,5	5		19.2	-	96	-	22,848,000
SUBTOTAL						0	96	-	22,848,000
4	COLUMNAS								
4.1	Columna Esquinera		4	1626.05	6	6504.2	24	16,260,500	6,732,000
4.2	Columna Intermedia y central		21	1982.96	7.76	41642.16	162.96	104,105,400	45,710,280
SUBTOTAL						48146.36	186.96	120,365,900	52,442,280
5	ZAPATAS								
5.1	Zapata Esquinera		4	330.14	5.61	1320.56	22.44	3,301,400	5,340,720
5.2	Zapata Intermedia		12	377.68	8.23	4532.16	98.76	11,330,400	23,504,880
5.3	Zapata Central		9	500.04	8.69	4500.36	78.21	11,250,900	18,613,980
SUBTOTAL						10353.08	199.41	25,882,700	47,459,580
TOTAL COSTO DIRECTO								218,715,075	169,266,960

SISTEMA DUAL Aa=0,30									
ITEMS	Elemento tipo	Losas	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor Total Acero	Valor Total Concreto
1	VIGAS								
1.1	Viga carguera central VCC1	1,2,3	9	423.43	1.92	3810.87	17.28	9,527,175	4,112,640
1.2	Viga carguera Exterior VCE1	1,2,3	6	617.2	1.92	3703.2	11.52	9,258,000	2,741,760
1.3	Viga sismica central VSC1	1,2,3	9	299.96	2.25	2699.64	20.25	6,749,100	4,819,500
1.4	Viga sismica Exterior VSE1	1,2,3	6	328.76	2.25	1972.56	13.5	4,931,400	3,213,000
1.5	Viga carguera central VCC2	4	3	310.98	1.92	932.94	5.76	2,332,350	1,370,880
1.6	Viga carguera Exterior VCE2	4	2	410.94	1.92	821.88	3.84	2,054,700	913,920
1.7	Vigas sismica Central VSC2	4.5	6	313.11	2.4	1878.66	14.4	4,696,650	3,427,200
1.8	Viga sismica Exterior VSE2	4.5	4	313.11	2.4	1252.44	9.6	3,131,100	2,284,800
1.9	Viga carguera central VCC3	5	3	270.05	1.92	810.15	5.76	2,025,375	1,370,880
1.10	Viga carguera Exterior VCE3	5	2	284.77	1.92	569.54	3.84	1,423,850	913,920
1.11	Viga de Cimentacion VC1	-	5	253.21	1.92	1266.05	9.6	3,165,125	2,284,800
1.12	Viga de Cimentacion VC2	-	5	370.29	1.92	1851.45	9.6	4,628,625	2,284,800
SUBTOTAL						21569	124.95	53,923,450	29,738,100
2	VIGUETAS								
2.1	Eentrepiso	1,2,3,4	64	136	0.9	8,704	57.6	21,760,000	13,708,800
2.2	Cubierta	5	16	112	0.9	1,792	14.4	4,480,000	3,427,200
SUBTOTAL						10496	72	26,240,000	17,136,000
3	LOSETA								
3.1	Loseta (5 cm)	1,2,3,4,5	5		19.2	-	96	-	22,848,000
SUBTOTAL						0	96	-	22,848,000
4	MUROS								
4.1	Muro e=0.20 B=6.0m		2	813	16.40	1626	32.8	4,065,000	7,806,400
4.2	Muro e=0.20 B=4.0m		2	564.51	11.13	1129.02	22.26	2,822,550	5,297,880
SUBTOTAL						2755	55.06	6,887,550	13,104,280
5	COLUMNAS								
5.1	Columna Esquinera		4	748.68	3.06	2994.72	12.24	7,486,800	3,433,320
5.2	Columna Centrales y Exterior		21	774.26	3.41	16259.46	71.61	40,648,650	20,086,605
SUBTOTAL						19254.18	83.85	48,135,450	23,519,925
6	ZAPATAS								
6.1	Zapata 3.3*3.3		4	326.76	5.44	1307.04	21.76	3,267,600	5,178,880
6.2	Zapata 4.7*3.6		9	500	8.6	4500	77.4	11,250,000	18,421,200
6.3	Zapata 4.7*3.4		12	477.68	8	5732.16	96	14,330,400	22,848,000
6.4	Zapata Muro 7.2X2.0		2	380.74	7.2	761.48	14.4	1,903,700	3,427,200
6.5	Zapata Muro 6.0X3.0		2	482.93	9	965.86	18	2,414,650	4,284,000
SUBTOTAL						13266.54	227.56	33,166,350	54,159,280
7	PILOTE								
7.1	Pilote tipo		6	36.42	0.14	218.52	0.84	546,300	199,920
SUBTOTAL						218.52	0.84	546,300	199,920
TOTAL COSTO DIRECTO								168,899,100	160,705,505

SISTEMA CON AISLADORES Aa=0,30									
ITEMS	Elemento	Losas	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor Total Acero	Valor Total Concreto
1	VIGAS								
1.1	Viga carguera central VCC1	2,3	6	352.52	1.92	2115.12	11.52	5,287,800	2,741,760
1.2	Viga carguera Exterior VCE1	2,3	4	334.61	1.92	1338.44	7.68	3,346,100	1,827,840
1.3	Viga sismica central VSC1	2,3	6	425.69	2.25	2554.14	13.5	6,385,350	3,213,000
1.4	Viga sismica Exterior VSE1	2,3	4	427.41	2.25	1709.64	9	4,274,100	2,142,000
1.5	Viga carguera central VCC2	1,4,5	9	309.53	1.92	2785.77	17.28	6,964,425	4,112,640
1.6	Viga carguera Exterior VCE2	1,4,5	6	284.77	1.92	1708.62	11.52	4,271,550	2,741,760
1.7	Vigas sismica Central VSC2	1,4,5	9	353.35	2.25	3180.15	20.25	7,950,375	4,819,500
1.8	Viga sismica Exterior VSE2	1,4,5	6	381.99	2.25	2291.94	13.5	5,729,850	3,213,000
1.9	Viga carguera central VCC3	6	3	253.08	1.92	759.24	5.76	1,898,100	1,370,880
1.10	Viga carguera Exterior VCE3	6	2	216.66	1.92	433.32	3.84	1,083,300	913,920
1.11	Vigas sismica Central VSC3	6	3	298.49	2.25	895.47	6.75	2,238,675	1,606,500
1.12	Viga sismica Exterior VSE3	6	2	298.49	2.25	596.98	4.5	1,492,450	1,071,000
SUBTOTAL						20369	125.1	50,922,075	29,773,800
2	VIGUETAS								
2.1	Entrepiso	1,2,3,4,5	80	136	0.9	10,880	72	27,200,000	17,136,000
2.2	Cubierta	6	16	112	0.9	1,792	14.4	4,480,000	3,427,200
SUBTOTAL						12672	86.4	31,680,000	20,563,200
3	LOSETA								
3.1	Loseta (5 cm)	1,2,3,4,5,6	6		19.2	-	115.2	-	27,417,600
SUBTOTAL						0	115.2	-	27,417,600
4	AISLADORES								
4.1	Aislador Tipo		25						149,760,000
SUBTOTAL									
5	COLUMNAS								
5.1	Columna Esquinera		4	276.98	1.1	1107.92	4.4	2,769,800	1,234,200
5.2	Columna Medianera		12	372.42	1.54	4469.04	18.48	11,172,600	5,183,640
5.3	Columna Central		9	392.16	1.63	3529.44	14.67	8,823,600	4,114,935
SUBTOTAL						9106.4	37.55	22,766,000	9,298,575
6	PEDESTAL								
6.1	Pedestal tipo		25	50.5	0.22	1262.5	5.5	3,156,250	1,309,000
SUBTOTAL						1262.5	5.5	3,156,250	1,309,000
7	ZAPATAS								
7.1	Zapata Esquinera		4	107.6	1.68	430.4	6.724	1,076,000	1,600,312
7.2	Zapata Intermedia		12	266.7	3.03	3200.4	36.3	8,001,000	8,639,400
7.3	Zapata Central		9	474.5	4.90	4270.5	44.1	10,676,250	10,495,800
SUBTOTAL						7901.3	87.124	19,753,250	19,135,200
TOTAL COSTO DIRECTO								128,277,575	257,257,375

RESUMEN DE COSTOS ZONA INTERMEDIA				
SISTEMAS	ACERO	CONCRETO	AISLADORES	TOTAL
Pórticos	127,913,200	118,322,380	-	246,235,580
Dual	125,218,850	125,686,780	-	250,905,630
Aislado	118,361,425	103,523,090	134,784,000	356,668,515

RESUMEN DE COSTOS ZONA ALTA				
SISTEMAS	ACERO	CONCRETO	AISLADORES	TOTAL
Pórticos	218,715,075	169,266,960	-	387,982,035
Dual	168,899,100	160,705,505	-	329,604,605
Aislado	128,277,575	107,497,375	149,760,000	385,534,950

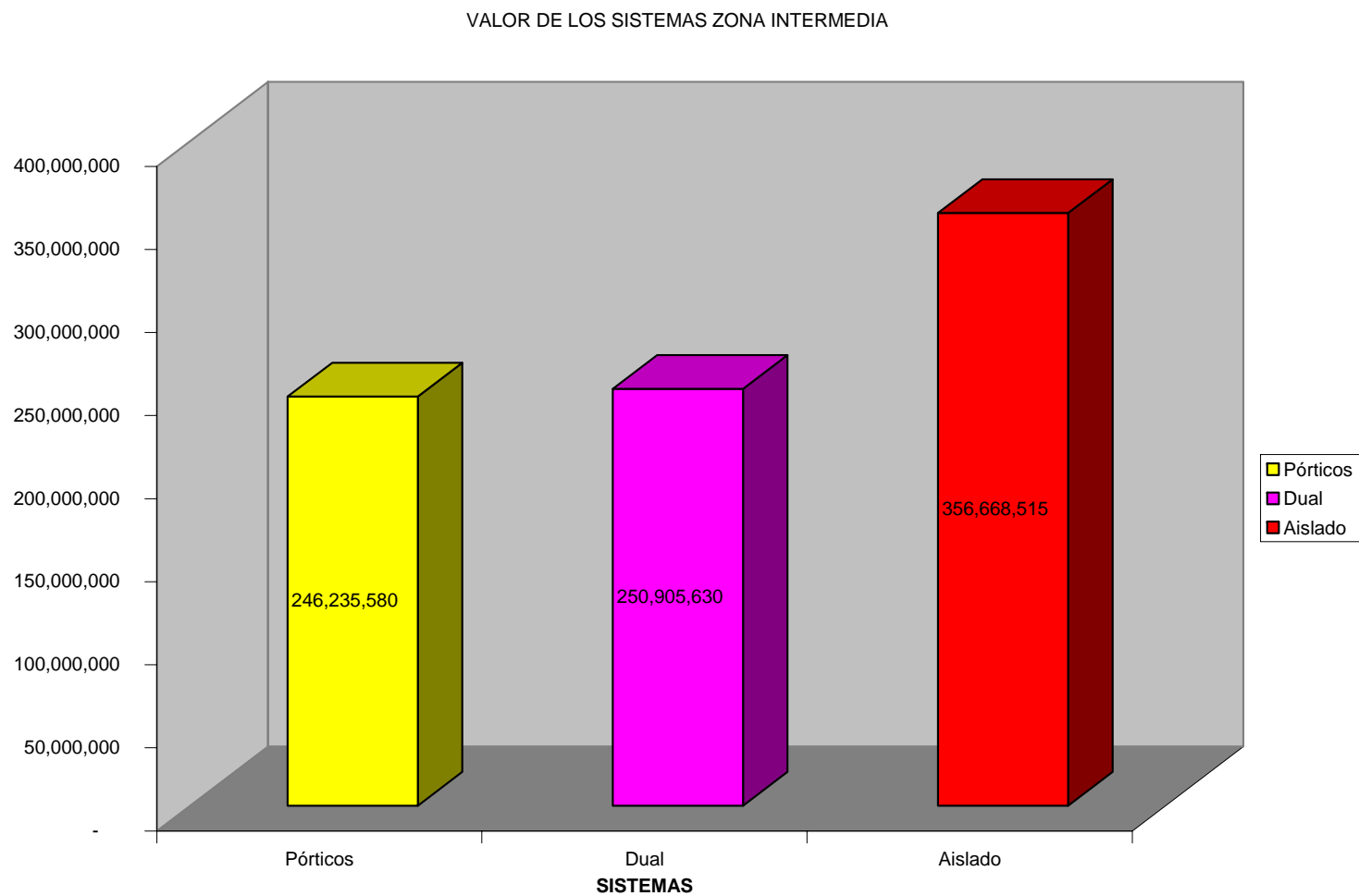


Figura 50. Resumen de costos Zona Intermedia

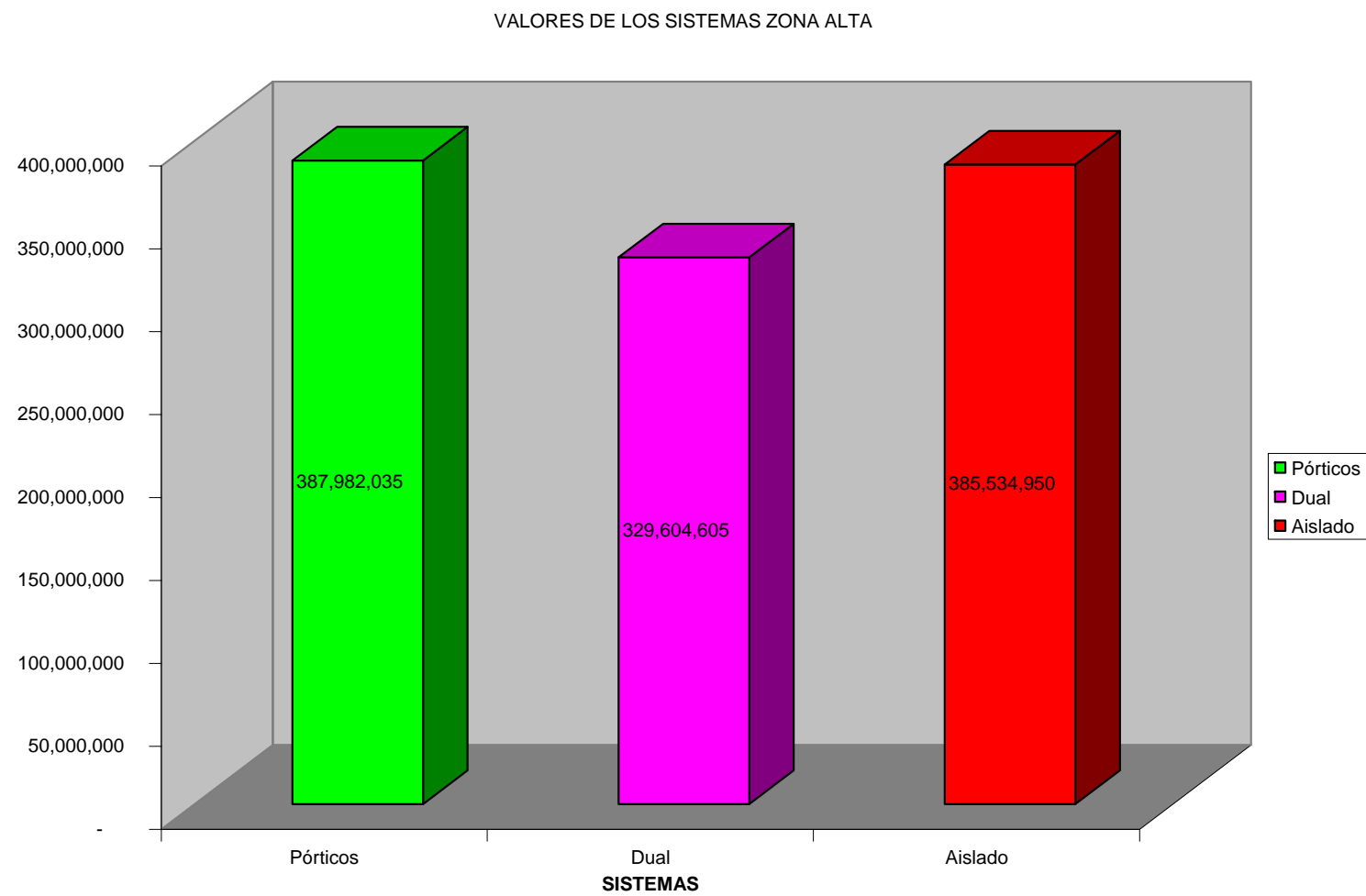


Figura 51. Resumen de costos Zona Alta

CONCLUSIONES

De acuerdo con costos obtenidos para cada una de los sistemas de resistencia sísmica planteados Vs el Sistema de reducción de vibraciones con el uso de Aisladores Elastomericos es posible exponer la no factibilidad del uso de este tipo de sistema de reducción de vibraciones en el diseño de edificaciones en Colombia.

En la zona de amenaza sísmica intermedia se puede observar la pequeña diferencia que existe entre los costos de las edificaciones diseñadas con los sistemas de resistencia sísmica tipo pórtico y dual, caso que no se presenta en la diferencia que tienen los costos para dichas edificaciones comparados con los obtenidos para la edificación diseñada con un sistema de reducción de vibraciones con dispositivos del tipo Aisladores Elastomericos los cuales superan ampliamente los costos obtenidos para los sistemas convencionales.

En la zona de amenaza sísmica alta se pudo observar que las edificaciones diseñadas con el sistema de resistencia sísmica tipo pórtico no son muy versátiles debido a que para cumplir con los requisitos de derivas y otros establecidos por la NSR-98 es necesario, utilizar secciones de columnas demasiado grandes lo cual conlleva a una elevación en los costos debidos a los grandes volúmenes de concreto a utilizar y por ende un aumento significativo en

las cantidades de acero. Por el contrario el sistema de resistencia sísmica tipo Dual resulta muy útil y se acomoda casi perfectamente a los requisitos de resistencia, norma y de costos debido a las grandes cantidades de energía sísmica que son capaces de absorber los muros de cortante; fenómeno que se ve reflejado en la disminución de las secciones en las columnas. En el caso del sistema de reducción de vibraciones aunque la diferencia en costos fue mucho menor a la obtenida en la zona de amenaza sísmica intermedia no es la mejor alternativa para el diseño de edificaciones.

Durante la elaboración del presente estudio, después de haber indagado y estudiado acerca del sistema de reducción de vibraciones con aisladores elastoméricos es notorio para nosotros que dicho sistema posee una gran ventaja con respecto a los sistemas convencionales de diseño y construcción; esto es, debido a que la estructura como tal se encuentra desacoplada del suelo de fundación las aceleraciones que sufre esta durante un evento sísmico son muy bajas respecto a las de una estructura acoplada a su suelo de fundación. Este hecho se ve reflejado en el poco desplazamiento relativo de entre piso (deriva) desarrollado durante un sismo manteniendo la integridad de la estructura y de sus componentes no estructurales, toda esta información que en un principio fue consultada sólo en bibliografía se vio reflejada en el comportamiento del modelo desarrollado en el software estructural sap2000.

7. BIBLIOGRAFÍA

- NSR-98. Norma Sismo Resistente. Bogotá. Asociación de Ingeniería Sísmica, Bogotá, Colombia. 1998.
- System Dynamics, Ogata Katshuiko, Prentice Hall Inc, New Jersey. Third edition 1998.
- Yao-Hung Yang & Peng Li, (2003). Triangular Added Damping And Stiffness (Tadas), Department Of Civil And Environmental Engineering Stanford University.
- ACHISINA. Asociación Chilena de Ingeniería Sísmica
- “*Uniform Building Code - 1997*”, UBC-97, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, USA, April 1997.
- Chais, X. (2000). Desarrollo de un Nuevo Disipador de Energía para el Diseño Sismo-Resistente, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- CSI Computers and Structures (1997), Inc., “SAP2000 – Integrated Structural Analysis & Design Software”, Berkeley, USA.
- FEMA-273. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council. USA. 1997.

- Base Isolation Manual, Bridgestone Engineered Products Company, Inc