

FACTIBILIDAD DEL USO DE AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADOS (AMS) EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES EN COLOMBIA



Presentado por:

CARLOS ALFONSO IGUARÁN LÓPEZ

JOSE FERNANDO MORENO RUIDIAZ

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

SANTA MARTA, D.T.C.H.

2006

**FACTIBILIDAD DEL USO DE AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADOS
(AMS) EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES EN COLOMBIA**

Presentado por:

CARLOS ALFONSO IGUARÁN LÓPEZ

JOSE FERNANDO MORENO RUIDIAZ

Director del proyecto:

VICTOR FRANCISCO CEBALLOS

Ing. Civil M .I .C.

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

SANTA MARTA, D.T.C.H.

2006

AGRADECIMIENTOS

Atendiendo a nuestra marcada política de brevedad, precisión y concisión; agradecemos de corazón a todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la consecución de este proyecto; en especial al Ingeniero Victor Ceballos. Personaje idóneo para la dirección de este proyecto, puesto que fue el que nos guió hasta el final de este mismo con su admirable conocimiento en el área estructural.

Adicionalmente dedicamos este proyecto a todos nuestros seres queridos en general.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
1. PRESENTACIÓN	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3. ANTECEDENTES	19
4. MARCO TEÓRICO	24
4.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES	24
4.1.1 Capacidad de disipación de energía.	24
4.1.2 Deriva.	25
4.1.3 Coeficiente de capacidad de disipación de energía, R.	27
4.1.4 Espectro de diseño.	27
4.1.5 Espectro artificial.	28
4.1.6 Compatibilización de espectros.	28
4.2 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL SÍSMICOS	28
4.2.1 Clasificación de los sistemas de control estructural sísmicos	29
4.2.1.1 Sistemas de control pasivos	30
4.2.1.1.1 Sistemas de control pasivo con aislamiento sísmico	31
4.2.1.1.2 Sistemas de control pasivo con disipadores de energía	34

4.2.1.1.3 Sistemas de control pasivo con amortiguadores de masa sintonizados (AMS)	37
4.2.1.2 SISTEMAS ACTIVOS	37
4.2.1.3 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS	39
4.2.1.4 SISTEMAS HÍBRIDOS	40
4.2.2 AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADOS (AMS)	42
4.2.2.1 Amortiguadores de Líquido Sintonizados (ALS)	44
4.2.2.2 Configuraciones típicas de AMS	46
4.2.2.3 Parámetros de diseño del AMS.	47
4.2.2.4 Aplicación de los Amortiguadores De Masa Sintonizados (AMS) ó Tuned Mass Dampers (TMD) alrededor del mundo	48
4.2.2.4.1 Amortiguadores de Masa Sintonizados transnacionales	49
4.2.2.4.2 John Hancock Tower (Engineering News, Oct. 1975)	50
4.2.2.4.3 Citicorp Center	50
4.2.2.5 Teoría dinámica de los AMS	51
5. JUSTIFICACIÓN	57
6. OBJETIVOS	61
6.1. General	61
6.2. Específicos	61
7. FORMULACIÓN Y GRAFICACIÓN DE HIPÓTESIS.	63

8. ALCANCE Y LIMITACIONES	64
9. DELIMITACIÓN DEL ESPACIO TEMPORAL Y GEOGRÁFICO.	65
10. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.	66
11. MATERIALES Y MÉTODOS	66
11.1 Materiales	66
11.2 Diseño Metodológico según la Naturaleza del Proyecto	67
11.3 Selección y Medición de las Variables del Análisis	68
12. MEMORIAS DE CÁLCULO.	70
12.1 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO	70
12.2 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN	71
12.3 NORMAS Y ESPECIFICACIONES	73
12.4 Predimensionamiento de los Elementos Estructurales	74
12.5 ANÁLISIS DE CARGA	76
12.6 COMBINACIONES DE CARGA	79
12.7 REQUISITOS MÍNIMOS DE DISEÑO	80
12.7.1 MODELOS capacidad de disipación de energía (DMO)	80
12.7.1.1 Vigas	80
12.7.1.2 Columnas	81

12.7.1.3 Diafragma	81
12.7.1.4 MODELO SISTEMA DE PÓRTICOS (Zona Intermedia)	82
12.7.1.4.1 Secciones de elementos	82
12.7.1.4.2 Diseño de elementos	86
12.7.1.4.3 Derivas	86
12.7.1.5 MODELO SISTEMA DUAL (Zona Sísmica Intermedia)	88
12.7.1.5.1 Secciones de elementos	88
12.7.1.5.2 Derivas	90
12.7.1.6 MODELO SISTEMA DE CONTROL SÍSMICO (AMS)	92
(Zona Sísmica Intermedia)	
12.7.1.6.1 Secciones de elementos	92
12.7.1.6.2 Derivas	94
12.7.2 CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ESPECIAL (DME)	96
12.7.2.1 Vigas	96
12.7.2.2 Columnas	97
12.7.2.3 Diafragma	97
12.7.2.4 MODELO SISTEMA PÓRTICO (Zona Sísmica Alta)	98
12.7.2.4.1 Secciones de elementos	98

12.7.2.4.2 Derivas	100
12.7.2.5 MODELO SISTEMA DUAL (Zona Sísmica Alta)	101
12.7.2.5.1 Secciones de elementos	101
12.7.2.5.2 Derivas	102
12.7.2.6 MODELO SISTEMA DE CONTROL SÍSMICO (AMS) (Zona Sísmica Alta)	103
12.7.2.6.1 Secciones de elementos	103
12.7.2.6.2 Derivas	104
12.7.3 CALCULO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL CON UN AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADO (AMS)	105
12.7.3.1 Procedimiento para el análisis y diseño del sistema estructural con AMS	105
12.7.3.1.1 Cálculo de los parámetros de diseño del AMS	109
12.7.3.1.2 Modelación del dispositivo AMS en SAP 2000	110
13. PRESUPUESTO	111
13.1 Presupuesto sistema estructural zona de amenaza intermedia	
13.2 Presupuesto sistema estructural zona de amenaza alta	
14. CONCLUSIONES	120
15. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	124

LISTADO DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Secciones de la base de las vigas escogidas	80
Tabla 2. Secciones mínimas de columnas escogidas	81
Tabla 3. Secciones de los elementos estructurales sistema pórticos	82
Tabla 4. Derivas relativas para estructura con sistema de pórticos	87
Tabla 5. Secciones de los elementos estructurales sistema dual	88
Tabla 6. Derivas relativas estructura con sistema dual	90
Tabla 7. Secciones de los elementos estructurales AMS	92
Tabla 8. Derivas relativas estructura con AMS	94
Tabla 9. Secciones de la base de las vigas	96
Tabla 10. Secciones mínimas de columnas	97
Tabla 11. Secciones de los elementos estructurales sistema de pórticos	98
Tabla 12. Derivas relativas estructura con sistema de pórticos	100
Tabla 13. Secciones de los elementos estructurales sistema dual	101
Tabla 14. Derivas relativas estructura sistema dual	102
Tabla 15. Secciones de los elementos estructurales, sistema AMS	103
Tabla 16. Derivas relativas estructura con AMS	104

LISTADO DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Comparación de sismos registrados entre los siglos XIX y XX.	17
Figura 2. Aplicaciones de AMS	21
Figura 3. Implementación de sistemas de control pasivo en Norteamérica	22
Figura 4. Energía Disipada	25
Figura 5. Definición de Deriva	26
Figura 6. Clasificación de los sistemas de control estructural sísmicos.	30
Figura 7. Aislador elastomérico de caucho natural	32
Figura 8. Esquema del sistema pendular friccionante (FPS)	32
Figura 9. Dispositivo ADAS, disposición en paralelo	36
Figura 10. Disipador fluido viscoso	36
Figura. 11 Estructura con sistema de control activo	38
Figura 12. Kyobashi Seiwa Building, Tokio. Edificio e instalación del sistema activo.	39
Figura 13. Estructura con sistema de control semi-activo	40
Figura 14. Estructura con sistema de control híbrido	41
Figura 15. Amortiguadores de masa: a) AMS b) ALS	43
Figura 16. Estructura con amortiguadores de líquido sintonizados	45

Figura 17. Configuraciones usuales de AMS	46
Figura18. Diagrama esquemático de las aplicaciones del TMD	48
Figura 19. Diagrama esquemático de un AMS transnacional	49
Figura 20. John Hancock Building	50
Figura 21. Citicorp Center, New York y el TMD instalado	51
Figura 22. Sistema SDOF amortiguado con un sistema AMS acoplado	53
Figura 23. Relación de frecuencia óptima f_{opt} para el AMS	54
Figura 24. Relación de amortiguamiento óptima ξ_d para el AMS	55
Figura 25. Configuración en planta (edificio 20 pisos)	83
Figura 26. Esquema del modelo de pórtico	84
Figura 27. Espectro de diseño zona de amenaza sísmica intermedia	85
Figura 28. Esquema del modelo de muros	89
Figura 29. Derivas por piso de sistemas convencionales	91
Figura 30. Registro sísmico introducido al programa sap2000^[17]	93
Figura 31. Derivas por piso de sistemas DMO	95
Figura 32. Desplazamientos máximos por piso de sistemas DMO	95
Figura 33. Espectro de diseño zona de amenaza sísmica alta	99
Figura 34. Relación de frecuencia óptima f_{opt} para el AMS	107
Figura 35. Relación de amortiguamiento óptima ξ_d para el AMS	108

RESUMEN DEL PROYECTO

En la actualidad se puede observar en el ámbito del diseño y construcción de estructuras sismorresistentes, la cada vez más fehaciente necesidad de proporcionar un sistema estructural lo suficientemente económico, pero a la vez seguro y estable. Tal es el caso, que en las últimas décadas se ha insistido en desarrollar sistemas para el control y reducción de vibraciones en las estructuras causadas por cargas dinámicas, tratando de cambiar los hábitos de diseño por medio de sistemas convencionales. Tales sistemas se clasifican en cuatro grandes grupos: Sistemas de control pasivo (**SCP**), sistemas de control activo (**SCA**), sistemas de control híbrido (**SCH**) y sistemas de control semiactivo (**SCSA**). Los dispositivos denominados “Amortiguadores de masa sintonizados” (**AMS**) hacen parte de los sistemas de control pasivo (**SCP**), los cuales presentan como ventaja apreciable, su bajo costo y su materialización sencilla, al compararse con los demás sistemas de control. Estos dispositivos serán adicionados a edificios de 20 pisos con el objetivo de comparar su costo con relación a los sistemas convencionales (sistema pórtico y dual)

1. PRESENTACIÓN

La ingeniería civil desde sus inicios hasta la actualidad, ha venido desarrollando nuevas técnicas y ensayando nuevos materiales que le permitan a los distintos campos que la componen presentar estructuras de cada vez mayor resistencia, durabilidad, y a un costo que este al alcance de los inversionistas de un determinado proyecto. Este desarrollo implica nuevos materiales, nuevas herramientas de diseño y construcción, nuevas técnicas constructivas y un alto nivel de ingenio para superar los obstáculos que tratan de impedir los avances en la ingeniería.

Gran parte de los avances que se han desarrollado en la ingeniería civil, han sido inspirados en los diferentes obstáculos y fenómenos naturales que forman parte del medio; es decir, en la medida en que el hombre desarrolla su ingeniería y se vive en un mundo cada vez mas globalizado, surgen las necesidades de poder tener al alcance los medios suficientes para competir en la sociedad. Por ello es que cada vez en el mundo se están desarrollando grandes proyectos que van mucho más allá de suplir una simple necesidad y son proyectados hacia un futuro altamente competitivo.

Determinar en que momento se presentara un sismo para prevenirlo y evitar catástrofes, desarrollar nuevos modelos sismorresistentes y antisísmicos, mejorar la calidad de vida disminuyendo los niveles de contaminación,

proporcionar un flujo de tránsito normal en las grandes metrópolis, comunicar grandes ciudades en el menor tiempo posible para aumentar el nivel económico, suplir las necesidades hidráulicas y evitar inundaciones que acaben con las cosechas de las regiones; son varios de los factores y áreas que han impulsado a la ingeniería a desarrollar nuevas técnicas en los distintos campos de trabajo.

Durante la historia son muchos los terremotos que han azotado gran parte del mundo dejando como consecuencia un número incalculable de víctimas humanas, en gran parte debido al colapso de diversas estructuras de origen ingenieril como edificios y puentes. Motivo por el cual en los últimos años se ha tratado de plantear soluciones a semejante problemática. Como primera medida surgió la necesidad de crear normas sismorresistentes de construcción en el mundo, y posteriormente se fueron implementando diversas alternativas entre las cuales encontramos los denominados sistemas de control estructural; los cuales tienen como objetivo esencial el control y reducción de las vibraciones causadas por las cargas dinámicas. Tales sistemas en la actualidad se clasifican en cuatro grupos: sistemas de **control pasivo (SCP)**, sistemas de **control semiactivo (SCSA)**, sistemas de **control híbrido (SCH)** y sistemas de **control activo (SCA)**.

Los sistemas de control pasivo (**SCP**) son dispositivos de una materialización sencilla y económica, y por ende, de mayor aplicación. Adicionalmente al ser

mecánicamente simples los edificios que los utilizan tienen un costo competitivo, en relación con edificaciones construidas en base a los sistemas convencionales.

En el presente proyecto se encaminará a evaluar un mecanismo de control que proporcione una opción a la hora de combatir la amenaza sísmica en el diseño de estructuras en Colombia, y la posibilidad de usar este como medida de control en edificios ya construidos. Este particular mecanismo de control conocido en la literatura mundial como **“Tuned Mass Dampers” (TMD)**, ó traducido al español como **“Amortiguadores de masa sintonizados” (AMS)**; será el dispositivo a estudiar para determinar el comportamiento de diversas estructuras (edificios) al agregarle un AMS, evaluando así principalmente la factibilidad económica de los sistemas conformados y por ultimo determinar el tipo de edificio en el cual se presente un óptimo funcionamiento para ser recomendado en el país. Todo esto soportado en base a programas computacionales como MATHCAD y SAP 2000.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los fenómenos más destructivos que se puede experimentar de la naturaleza en el planeta es un terremoto (sismo) con sus terribles consecuencias (como por ejemplo, el colapso de las estructuras), las cuales representan una verdadera amenaza en todos los estamentos de la vida (cultural, político, económico, social, etc.) para cualquier entorno, ya que este afecta de forma directa la vida cotidiana de cualquier sociedad que lo experimente. Razón por la cual desde hace tiempo se inició la creación de normas sismorresistentes capaces de contrarrestar el impacto que ocasiona tal fenómeno en las estructuras.

El incremento en el número de eventos sísmicos en el siglo XX con respecto al siglo XIX (Figura 1) ha sido bastante notorio y ha llevado a que hoy en día la implementación de un sistema de control antisísmico eficiente en las diferentes clases de edificaciones, se convierta en especie de una medida necesaria tanto en el diseño como en la rehabilitación de estas mismas con el fin de prever catástrofes futuras.

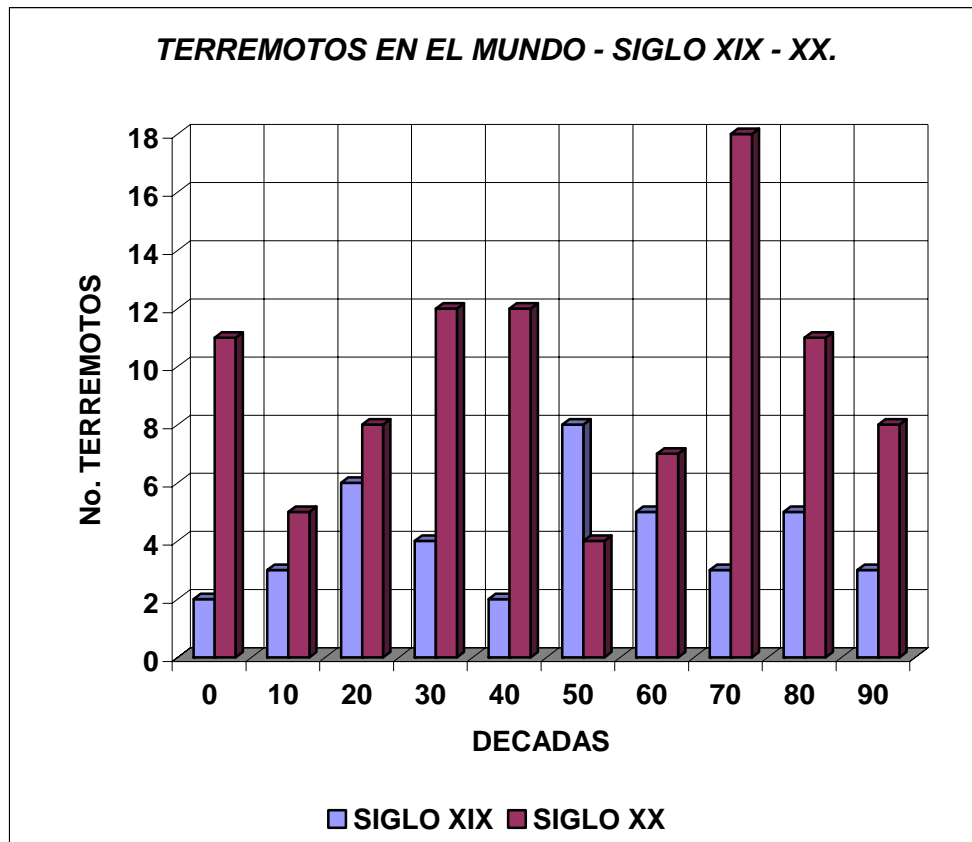


Figura 1. Comparación de sismos registrados entre los siglos XIX y XX.

Actividades sísmicas recientes, como las acaecidas en Northridge (Estados Unidos) en 1994 y el de Kobe (Japón) en 1995; demostraron la ineficiencia de los sistemas rígidos convencionales ante sismos intensos; dando paso a la masificación del uso de sistemas que proporcionen mejores propiedades sismorresistentes a las estructuras.

En la actualidad el control estructural por medio de sistemas de protección se realizan con el fin de contrarrestar la actividad sísmica, erigiéndose como una

alternativa de diseño sismorresistente efectiva y económica. Estos sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de los desplazamientos haciendo uso de uno (o varios) de los siguientes recursos descritos a continuación:

- ✓ La modificación de las propiedades dinámicas del edificio de modo que esta evite actitudes resonantes.
- ✓ La disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos, ubicándolos en la parte interna o externa de la edificación.
- ✓ El control de dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

Tales sistemas presentan una variedad de aplicaciones, basadas en las propiedades dinámicas de los edificios que se deseen modificar para obtener una adecuada respuesta estructural.

3. ANTECEDENTES

En el mundo existen lugares más propensos a que se presenten estos tipos de fenómenos debido a su ubicación. A través de la historia se han consignado numerosos registros de estos tipos de fenómenos. Japón, India y China constituyen potencias mundiales las cuales han sido azotadas en varias ocasiones. Colombia no ha sido ajena a estos tipos de fenómenos sísmicos. Se registran durante la historia eventos sísmicos que han marcado la vida de todo un país, entre estos se encuentran:

Pamplona 1644, Popayán 1736, Bogota 1827, Cúcuta 1875, Pereira 1995, Armenia 1999 (Eje cafetero); esta última constituye una de las más catastróficas en la historia del país, dejando alrededor de 1000 víctimas humanas; debido quizás a la ubicación de esta zona en el emplazamiento en la que convergen tres placas tectónicas. Rocha ^[8]

Por todos los hechos anteriormente mencionados se ha librado una maratón a nivel mundial en la búsqueda por medio de la investigación, de nuevas tecnologías capaces de contrarrestar catástrofes futuras. Una de estas tecnologías son los sistemas de control estructural ante acciones sísmicas.

Tales sistemas se comenzaron a desarrollar en un principio para ser aplicados en la industria automotriz, y 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 (ambos sistemas de control pasivo), inician la evolución de este proceso. Es por esta razón que se puede afirmar que los sistemas de control activo, sistemas de control híbridos y sistemas de control semiactivo son la evolución natural de los sistemas de control pasivo.

Una de las primeras formas para disipar energía en edificios fue a través de la adhesión de material visco-elástico. La forma de uso de este tipo de material consistía en colocar una capa de visco-elástico sobre la base de la estructura. Cuando se presentaban deformaciones este material se calentaba y a través de este calor se disipaba la energía. El problema era la gran cantidad de material visco-elástico que se necesitaba para llegar a niveles aceptables de amortiguamiento para la disipación. De esta forma el uso de sistemas de control estructural sísmicos se ha difundido poco a poco, siendo los de mayor aplicación los sistemas de control pasivo. Los Amortiguadores de Masa Sintonizados (AMS) hacen parte de estos. Rocha^[8]

En cuanto al inicio de los Amortiguadores de Masa Sintonizados (AMS), después de su invención por Frahm en 1909, el concepto de estos ha atraído la atención de investigadores de diferentes campos y nacionalidades para su aplicación en el control de las vibraciones causadas por diferentes tipos de fuerzas. Ambrosini^[6]

En la siguiente figura se muestran algunos tipos de estructura en el mundo en el cual se encuentra el sistema de AMS como sistema de prevención antisísmica.

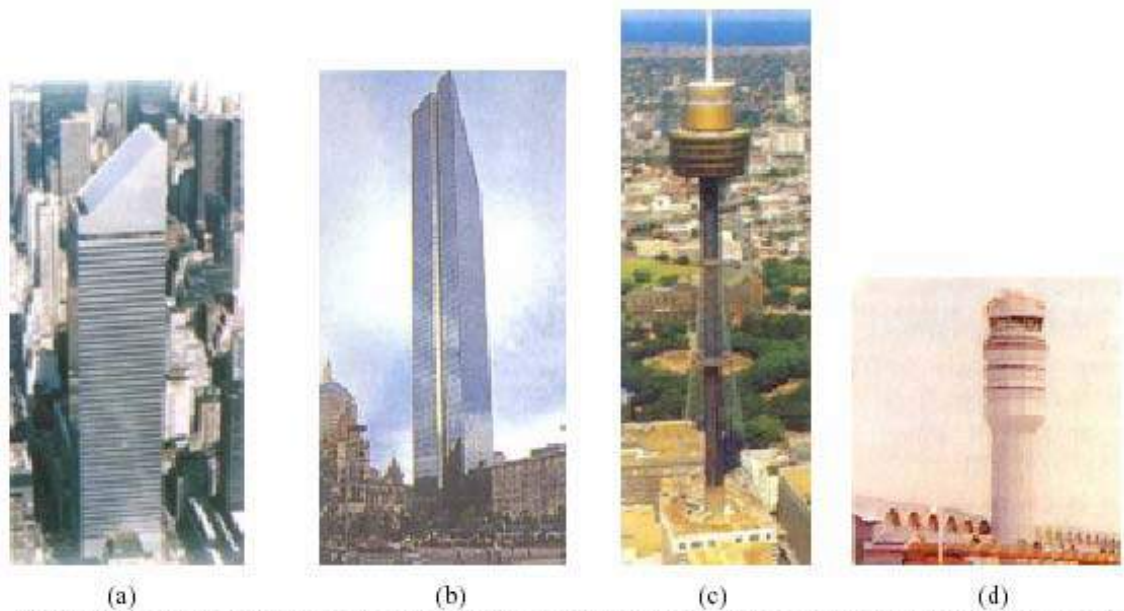


Figura 2. Aplicaciones AMS: a) Citicorp Center. New York b) Boston's Hancock Tower c) Sydney Tower d) Torre control aeropuerto Washington

Actualmente en el mundo existen miles de estructuras con los sistemas de control estructural ante acciones sísmicas. Países considerados potencias mundiales como Estados Unidos, Francia, Inglaterra, Japón, China presentan un 80% de estos como sistemas de control pasivo. Esto como consecuencia de los eventos sísmicos acaecidos en Northridge (1994) y en Kobe (1995), a partir de los cuales se obtuvo un aumento considerable como se muestra en la Figura 3.

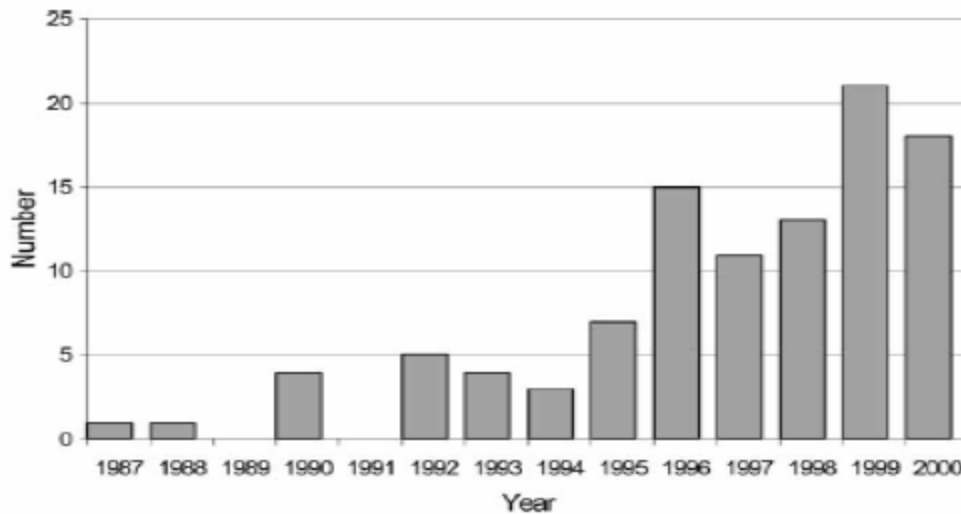


Figura 3. Implementación de sistemas de control pasivo en Norteamérica

Por otra parte se podría afirmar que Latinoamérica no ha estado exenta de los estudios basados en estos sistemas de control pasivos. A continuación se citarán algunos de los estudios más recientes realizados, los cuales a su vez fueron hechos con el conocimiento recopilado de autores pioneros a través de la historia en el ámbito de este tipo de investigación como Den Hartog ^[1], Sadek ^[2], Soong y Dargush ^[3], Navid Bin Saleh ^[4], Genda Chen ^[5], entre otros.

En Argentina se trabajó recientemente una investigación encabezada por el ingeniero Daniel Ambrosini ^[6] en la cual se realizó un estudio numérico de la eficiencia de los AMS en la respuesta sísmica en edificios. Los modelos en cuanto al tipo de edificación utilizado, consistieron en edificios de

configuración estructural típica (hormigón reforzado), ubicados en distintas zonas de amenaza sísmicas de Argentina.

También en el mismo país y continuando con el mismo tema de investigación trabajó el ingeniero Ricardo Bassotti ^[7] (con la colaboración de Daniel Ambrosini) en la influencia de los AMS en la disminución de los efectos torsionales de estructuras sismorresistentes.

En cuanto a Colombia, no se encontró ningún trabajo relacionado directamente con los Amortiguadores de Masa Sintonizados (AMS). Pero igual se han modelado edificios proponiendo el uso de aisladores sísmicos para el diseño y la rehabilitación de estructuras. Tema desarrollado por las Universidades de los Andes, de Medellín y del Valle. Además existe una sola estructura diseñada con dispositivos disipadores de energía (sistema de control pasivo) tipo visco elástico ubicado en Bogotá. Se trata del edificio CAD en propiedad del gobierno canadiense.

A nivel local, específicamente en la Universidad del Magdalena, es importante mencionar que ya se han desarrollado y se vienen desarrollando estudios afines, acerca de la factibilidad económica en el uso de aisladores o disipadores de energía en el diseño y rehabilitación de edificaciones en el país.

4. MARCO TEORICO

En el marco de la modelación de estructuras con sistemas inerciales acoplados (AMS), es indispensable tener en cuenta diversos conceptos y principios dinámicos, los cuales serán expuestos a continuación con la respectiva teoría asociada al diseño de Amortiguadores de Masa Sintonizados (AMS).

4.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

4.1.1 Capacidad de disipación de energía. Es la capacidad que tiene un sistema estructural, un elemento estructural, o una sección del 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 sistema, elemento dentro del rango inelástico es capaz de disipar en ciclos de histeréticos consecutivos. Cuando se hace referencia al sistema de resistencia sísmica como un todo, se define por medio del coeficiente de capacidad de disipación de energía **R**. El grado de capacidad de disipación de energía se clasifica como especial (DES), moderado (DMO) y mínimo (DMI).

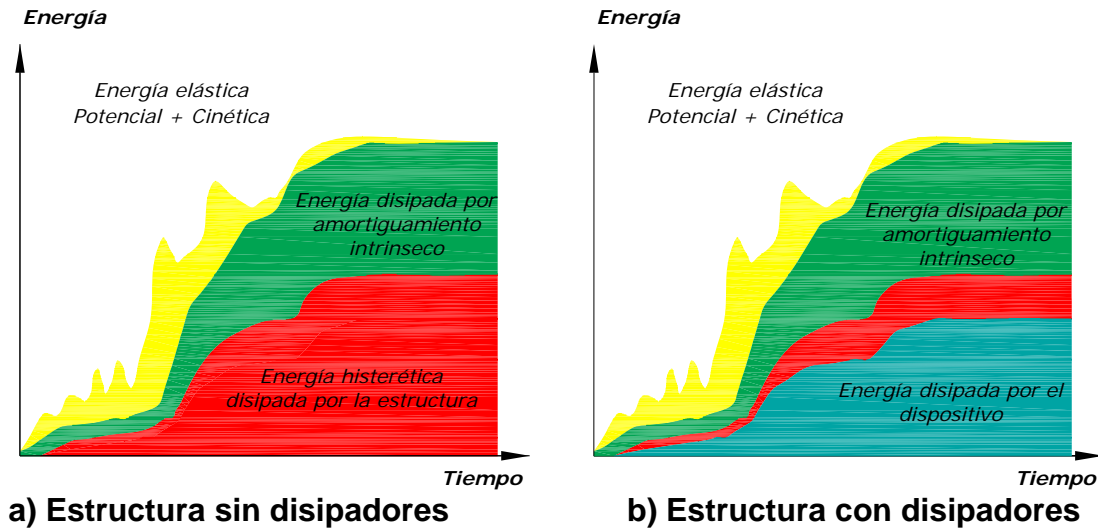


Figura 4. Energía Disipada

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 (figura 4), 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.

4.1.2 Deriva. Generalmente cuando se presentan un sismo, algunos de los efectos asociados a los altos 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 de las personas dentro de la edificación, inestabilidad global de la estructura y en algunos casos colapso total.

Debido a las razones anteriores estos altos desplazamientos se consideran indeseables dentro 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 que no superen el uno por ciento de la altura libre entre pisos.

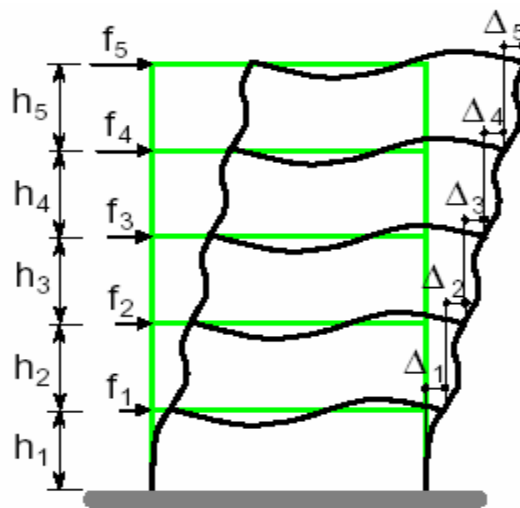


Figura 5. Definición de Deriva

4.1.3 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.

4.1.4 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.

4.1.5 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.

4.1.6 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 respecto al espectro guía de donde se inició el estudio.

4.2 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL SÍSMICOS

Con el pasar de los años en la Ingeniería sismorresistente se han establecido diversos parámetros que contribuyen a una mejor respuesta estructural de edificios en presencia de cargas dinámicas. Todo esto manteniendo un cierto equilibrio en la relación costo-seguridad, la cual debe ser acorde con la importancia del proyecto a realizar.

Una de estas opciones son los denominados “**sistemas de control estructural ante sismos**”. Tales sistemas en la actualidad presentan una variedad de aplicaciones, basadas en las propiedades dinámicas de los edificios que se deseen modificar para obtener una adecuada respuesta estructural.

4.2.1 Clasificación de los Sistemas de Control Estructural Sísmicos.

Los sistemas de control sísmicos empleados en la actualidad abarcan desde relativamente simples dispositivos de control pasivo hasta avanzados sistemas completamente activos. Los sistemas pasivos son tal vez los más conocidos e incluyen los sistemas de aislamiento sísmico, los sistemas mecánicos de disipación de energía y los sistemas inerciales acoplados (en esta última categoría reside el Amortiguador de Masa Sintonizado (AMS)). El aislamiento sísmico es el sistema más desarrollado de la familia, con continuos avances en dispositivos, aplicaciones y especificaciones de diseño. Como se muestra en la Figura 6, los sistemas de control sísmicos pueden ser clasificados en cuatro grupos: sistemas pasivos, activos, híbridos y semi-activos.



Figura 6. Clasificación de los sistemas de control estructural sísmicos. El AMS aparece en la primera columna con sus siglas en ingles (TMD).

Como se pudo observar en el esquema anterior el TMD “Tuned Mass Damper” o “Amortiguador de Masa Sintonizado” (AMS) constituye un sistema de control pasivo. Motivo por el cual se hará una reseña mas profunda de tales sistemas.

4.2.1.1 SISTEMAS DE CONTROL PASIVOS

Los sistemas de control pasivo emplean dispositivos bastante simples que reducen la respuesta dinámica por medios totalmente mecánicos. Los sistemas pasivos más comunes son los aisladores sísmicos, los disipadores de energía y los osciladores resonantes (TMD) o amortiguadores de masa sintonizados (AMS). Cada sistema emplea diferentes enfoques para el control de la respuesta estructural y son más efectivos para diferentes tipos de estructuras.

4.2.1.1.1 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO CON AISLAMIENTO SISMICO.

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 (Farzard ^[9]). Existen básicamente dos tipos de sistemas de aislamiento: los apoyos elastoméricos y los apoyos deslizantes. Los apoyos elastoméricos emplean un elastómero de caucho natural o neopreno reforzado con finas láminas de acero. La notable flexibilidad lateral en el elastómero permite el desplazamiento lateral de los extremos del aislador, mientras que las láminas de refuerzo evitan el abultamiento del elastómero y le proporcionan una gran rigidez vertical.

Existen tres tipos de apoyos elastoméricos ampliamente usados: apoyos de caucho natural (NRB, Figura 7), apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB), y apoyos de caucho de alta disipación de energía (HDR). Los apoyos deslizantes poseen una superficie de deslizamiento que permite la disipación de energía por medio de las fuerzas de rozamiento. Uno de los dispositivos más innovadores es el sistema pendular friccionante que combina la acción

del deslizamiento con la generación de una fuerza restitutiva debido a la geometría del deslizador (Fig. 8).



Figura 7. Aislador elastomérico de caucho natural

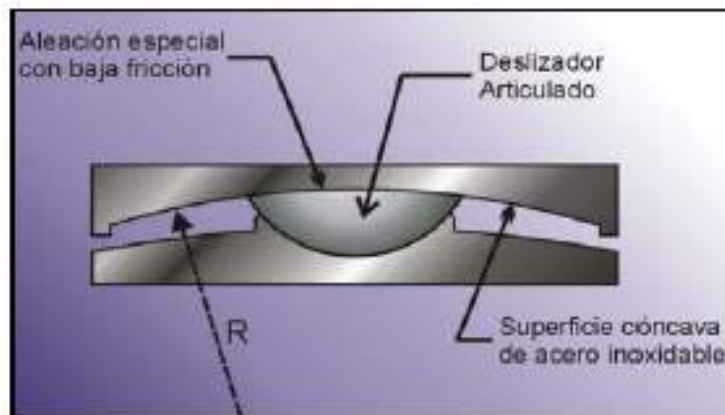


Figura 8. Esquema del sistema pendular friccionante (FPS)

El aislamiento sísmico es un sistema ampliamente usado para la protección sísmica de diversos tipos de estructuras. Numerosos estudios teóricos, análisis numéricos y ensayos de laboratorio demuestran el excelente comportamiento que puede lograr este sistema en la protección de

estructuras sometidas a eventos sísmicos moderados y severos. Adicionalmente, la efectividad de este sistema fue evidenciada por los registros de la respuesta dinámica de los edificios con aislamiento de base sacudidos por los sismos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995.

Actualmente existen numerosas aplicaciones de sistemas de aislamiento de base en países como Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda e Italia. Estas aplicaciones corresponden principalmente a la construcción de nuevos edificios y el mejoramiento sísmico de estructuras existentes. Uno de los edificios en los que se demostró la factibilidad de los sistemas de aislamiento sísmico es el FIRE Command and Control Facility en Los Angeles. Este edificio es una central de emergencias que debe permanecer en operación incluso después de un sismo extremo. Para su construcción se realizó una comparación entre los esquemas de diseño convencional y de aislamiento sísmico para proveer el mismo grado de protección. En estos términos se estimó que el costo del edificio con aislamiento sísmico era un 6% menor que el correspondiente al edificio con un diseño convencional (Farzard ^[9]). La prueba más severa a la que fue sometido un edificio con aislamiento sísmico hasta la fecha corresponde al hospital de docencia de la Universidad de Southern California. El edificio está ubicado a 36 km del epicentro del terremoto de Northridge, ocurrido en 1994 con una magnitud de 6.8 MW.

Durante el terremoto el terreno bajo el edificio alcanzó una aceleración máxima de 0.49 g, mientras que las aceleraciones en el interior del edificio estuvieron entre 0.10 g y 0.13 g. Esto significa que la estructura fue aislada en forma efectiva de los movimientos del suelo, teniendo en cuenta que estos movimientos fueron lo suficientemente intensos como para provocar daños importantes en edificios adyacentes (Kelly [11]). A diferencia de las técnicas convencionales de reforzamiento de edificios existentes, con el aislamiento sísmico se busca reducir la demanda a niveles en los que la capacidad existente en la estructura sea suficiente para resistir las cargas. Esta técnica es particularmente apropiada para la protección de edificios con valor histórico.

4.2.1.1.2 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO CON DISIPADORES DE ENERGÍA.

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que ésta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Pueden ser clasificados como histeréticos o viscoelásticos.

Los disipadores histeréticos incluyen los disipadores metálicos y los disipadores friccionantes, y dependen esencialmente de los desplazamientos de la estructura. Los disipadores metálicos están basados en la fluencia de

los metales debido a flexión, corte, torsión, o extrusión. Uno de los dispositivos metálicos más reconocidos es el ADAS, que está compuesto por placas de acero con sección transversal en forma de X (Fig. 9) instaladas en paralelo sobre los arriostres. Los disipadores friccionantes son dispositivos que disipan la energía mediante las fuerzas de fricción que se presentan por el desplazamiento relativo entre dos placas en contacto. Son diseñados para deslizarse a una carga determinada, y permanecen inactivos mientras no existe una demanda sísmica importante sobre el edificio. Soong and Dargush [3]

Los disipadores viscoelásticos incluyen los sistemas de sólidos viscoelásticos, fluidos viscoelásticos, y los disipadores fluido-viscosos. Los dispositivos viscoelásticos dependen esencialmente de la velocidad (Buckle [9]). Los disipadores viscoelásticos sólidos están constituidos por una capa de material viscoelástico ubicada entre dos placas de acero, usualmente acopladas a los arriostres que conectan los extremos del entrepiso. Los dispositivos viscoelásticos líquidos disipan la energía por medio de las deformaciones inducidas por un pistón en una sustancia altamente viscosa. Los disipadores fluido-viscosos (Fig. 10) son dispositivos que disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio. Estos dispositivos son similares a los amortiguadores de un automóvil, pero operan con un mayor

nivel de fuerzas y son fabricados con materiales más durables para lograr un mayor tiempo de vida útil.

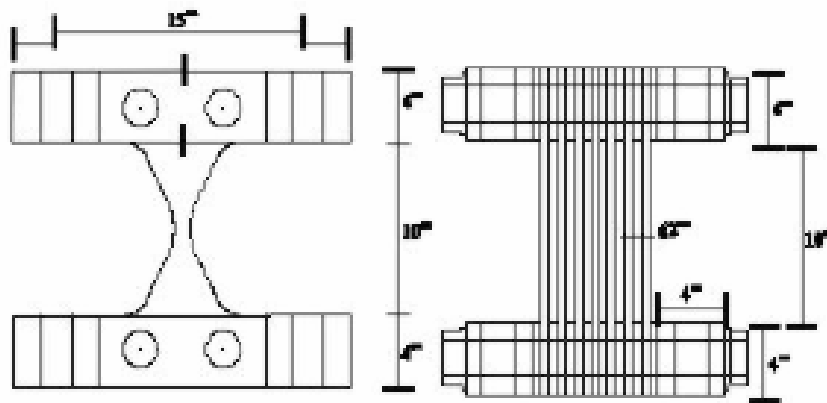


Figura 9. Dispositivo ADAS, disposición en paralelo.

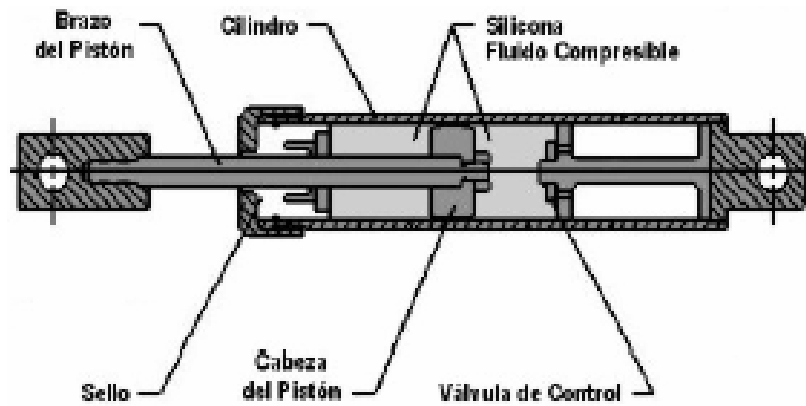


Figura 10. Disipador fluido viscoso.

4.2.1.1.3 Sistemas de control pasivo con Amortiguadores de Masa Sintonizados (AMS).

Dado que la presente tesis se desarrolla bajo el ámbito de control con amortiguadores de masa sintonizados (AMS), es conveniente desarrollar su estado del arte de forma más amplia en el apartado posterior. **4.2.2**

4.2.1.2 SISTEMAS ACTIVOS

Estos sistemas son dispositivos que generan fuerzas de control para modificar la respuesta dinámica de la estructura. Las fuerzas de control son aplicadas mediante mecanismos actuadores integrados a un conjunto de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real. La Fig. 11 describe esquemáticamente el proceso. Los sensores instalados en la estructura miden las excitaciones 4 externas y la respuesta dinámica de la estructura; los dispositivos de procesamiento en tiempo real procesan la información proveniente de los sensores y calculan las fuerzas de control necesarias para estabilizar la estructura; finalmente los actuadores generan las fuerzas necesarias para contrarrestar los movimientos sísmicos (Soong and Spencer ^[12]).

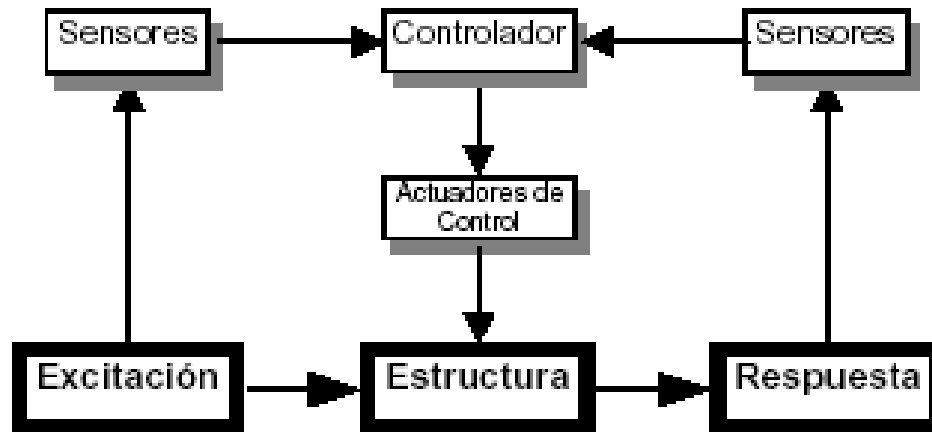


Figura. 11 Estructura con sistema de control activo

Las fuerzas de control pueden ser aplicadas a la estructura mediante una masa activa (AMD), arriostres activos (ABS), o tendones activos. Los osciladores de masa activa (AMD) proporcionan la forma más simple y compacta de aplicar las fuerzas de control a una estructura. Los arriostres y tendones activos requieren un diseño más complicado y se encuentran actualmente en nivel experimental.

El edificio Kyobashi Seiwa (Fig. 12) es la primera aplicación a escala natural de la tecnología del control activo. Este edificio ubicado en Tokio, Japón, se terminó de construir en 1989. El sistema activo está conformado por dos osciladores AMD, uno principal para controlar el movimiento transversal, y otro secundario para reducir los movimientos torsionales. El objetivo del sistema instalado en el edificio es reducir las vibraciones producidas por

vientos fuertes y solicitaciones sísmicas moderadas, con el fin de incrementar el confort de sus ocupantes (Soong and Spencer [12]).

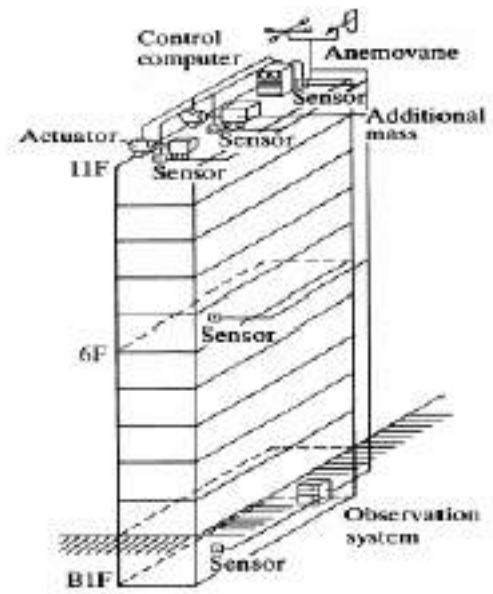


Figura 12. Kyobashi Seiwa Building, Tokio. Edificio e instalación del sistema activo.

4.2.1.3 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS

Los sistemas semi-activos no aplican fuerzas de control en el sistema estructural, pero poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir óptimamente la respuesta del sistema estructural. La Fig.13 muestra la configuración de estos sistemas.

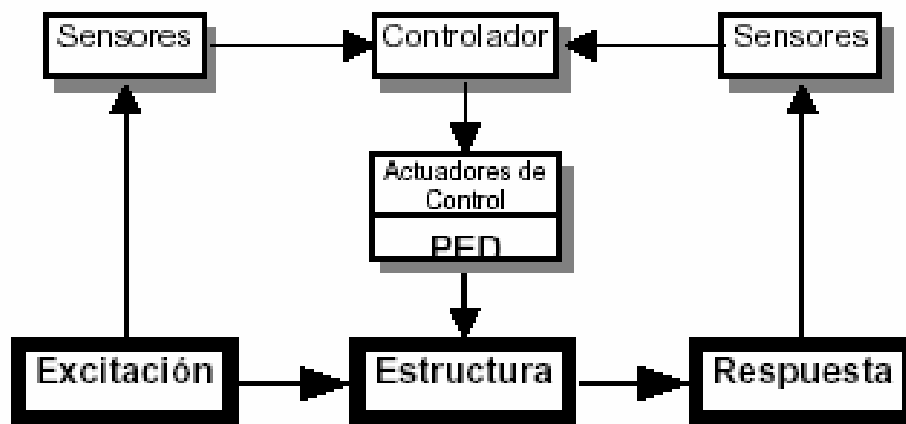


Figura 13. Estructura con sistema de control semi-activo

La atención recibida por estos sistemas en los últimos años puede ser atribuida al hecho de que los dispositivos de control semi-activo ofrecen la adaptabilidad de los sistemas de control activo sin la demanda de grandes fuentes de energía. (Spencer Jr. and Sain ^[13])

4.2.1.4 SISTEMAS HÍBRIDOS

Los sistemas híbridos emplean una combinación de dispositivos pasivos y activos con el fin de incrementar la confiabilidad y eficiencia del control estructural. Algunas de las restricciones que presenta un sistema completamente activo pueden ser superadas por los sistemas de control híbrido debido a que estos operan múltiples dispositivos de control, logrando mayores niveles de rendimiento (Spencer Jr. and Sain ^[13]).

Las investigaciones en el campo de los sistemas de control híbrido han sido enfocadas principalmente en dos tipos de sistemas: osciladores híbridos (HMD) y aislamiento activo. Todos los sistemas híbridos funcionan según la configuración mostrada en el esquema mostrado en la Fig. 14.

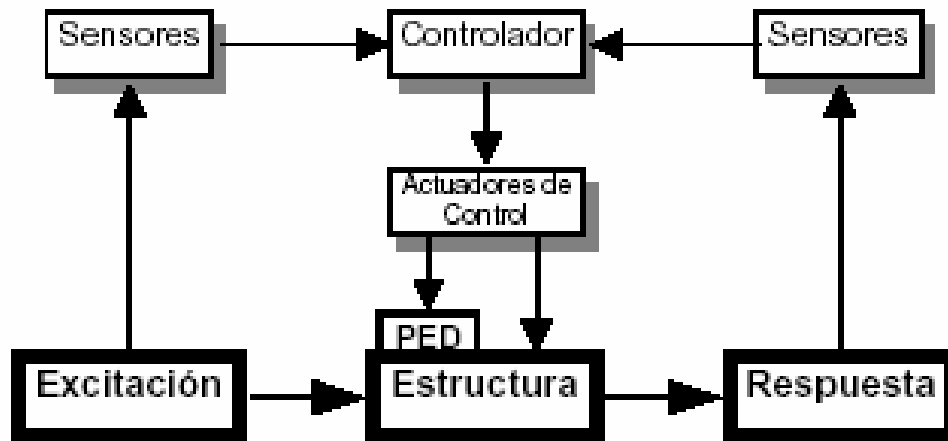


Figura 14. Estructura con sistema de control híbrido.

El oscilador híbrido HMD (*Hybrid Mass Damper*) es el resultado de la combinación de un oscilador resonante (TMD) y un actuador de control activo. La capacidad de este dispositivo para reducir la respuesta estructural radica principalmente en el movimiento natural del oscilador resonante. Las fuerzas de control generadas por el actuador son empleadas sólo para mejorar el desempeño del oscilador resonante, incrementando la eficiencia del sistema y permitiendo su adaptabilidad a los cambios en las características dinámicas de la estructura.

Diversos investigadores han realizado importantes contribuciones para lograr osciladores híbridos más compactos, eficientes y fáciles de implementar. El sistema TRIGON, por ejemplo, está constituido por un oscilador en forma de V con periodo fundamental ajustable. Este sistema está diseñado para controlar la respuesta estructural producida por vientos fuertes y sismos moderados. Cuando las solicitaciones son leves el actuador se mantiene inactivo y el sistema se comporta como un TMD. Otro sistema conocido como HMD pendular multi-nivel (*multi-step pendulum HMD*) requiere de un menor espacio para su instalación y ha sido empleado en muchas estructuras, incluyendo el edificio más grande del Japón: la torre Landmark en Yokohama (Spencer Jr. and Sain ^[13])

4.2.2 AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADOS (AMS).

Son sistemas de carácter pasivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo (o de contorno) en que se encuentren. Además intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural.

El amortiguador de masa sintonizado es una herramienta ingenieril clásica, la cual consiste en una masa, un resorte y un amortiguador viscoso colocados en el sistema vibrante principal para atenuar la vibración no deseada a una

frecuencia determinada. La frecuencia natural del amortiguador se *sintoniza* con la frecuencia natural del sistema principal provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos de amortiguamiento del AMS.

Este sistema puede ser a través de sistemas convencionales (Ver Fig.15): amortiguadores de masa sintonizados (AMS) o amortiguadores de líquido sintonizados. Una variante de éstos últimos, especialmente utilizable en estructuras de puente son los amortiguadores de columna de líquido sintonizados (ACLS). Ambrosini [6]

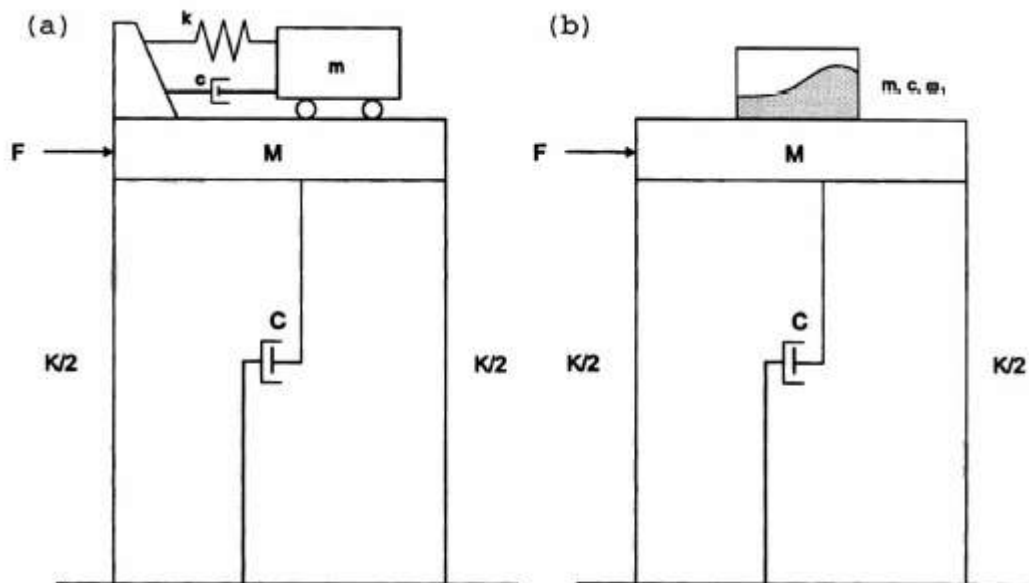


Figura 15. Amortiguadores de masa: a) AMS b) ALS

4.2.2.1 Amortiguadores de Líquido Sintonizados (ALS)

Los ALS absorben la energía de la vibración por el movimiento oscilante del líquido contenido en el recipiente y la disipan a través de la fricción intrínseca del líquido y la fricción con la superficie de las paredes. Se ha utilizado para aumentar la disipación de energía piezas cilíndricas de polietileno que flotan en el líquido. El comportamiento de los ALS es altamente no lineal debido al movimiento del fluido, cuando se produce el “rompimiento” de las olas. Su estudio involucra el conocimiento de la respuesta de capas de fluido oscilantes sujetas a excitaciones horizontales. La frecuencia del ALS se sintoniza con la frecuencia natural del edificio, que se ajusta con la altura del agua y la dimensión de los recipientes (Tamura et. al. 1995) ^[14]. Los ALS son utilizados principalmente para disminuir las vibraciones producidas por el viento en estructuras muy altas. Si el viento tiene una dirección predominante es adecuado el uso de ALS rectangulares con el lado mayor en la dirección del viento, en caso contrario conviene el uso de recipientes circulares. También dentro de este grupo podemos citar los ACLS (amortiguadores de columna de líquido sintonizados), que pueden tener forma de V o U, sección horizontal diferente a la vertical y en algunos casos una sección transversal con orificios en la sección horizontal que proporciona el amortiguamiento necesario (Gao et. al. 1997) ^[15]. Sus principales ventajas son: su bajo costo inicial, además no necesitan ningún mecanismo de activación y el bajo

mantenimiento requerido. La cantidad de recipientes, sus dimensiones, números de capas y la altura del líquido cambian enormemente de acuerdo al edificio que se analice. Los ALS no sólo se utilizan para edificios de viviendas, hoteles y oficinas, sino también para torres de control de los aeropuertos y observatorios; tanto en estructuras metálicas como de hormigón armado.

Como ilustración de la aplicación de estos dispositivos se presenta en la Figura 16 la Yokohama Marine Tower en Japón.

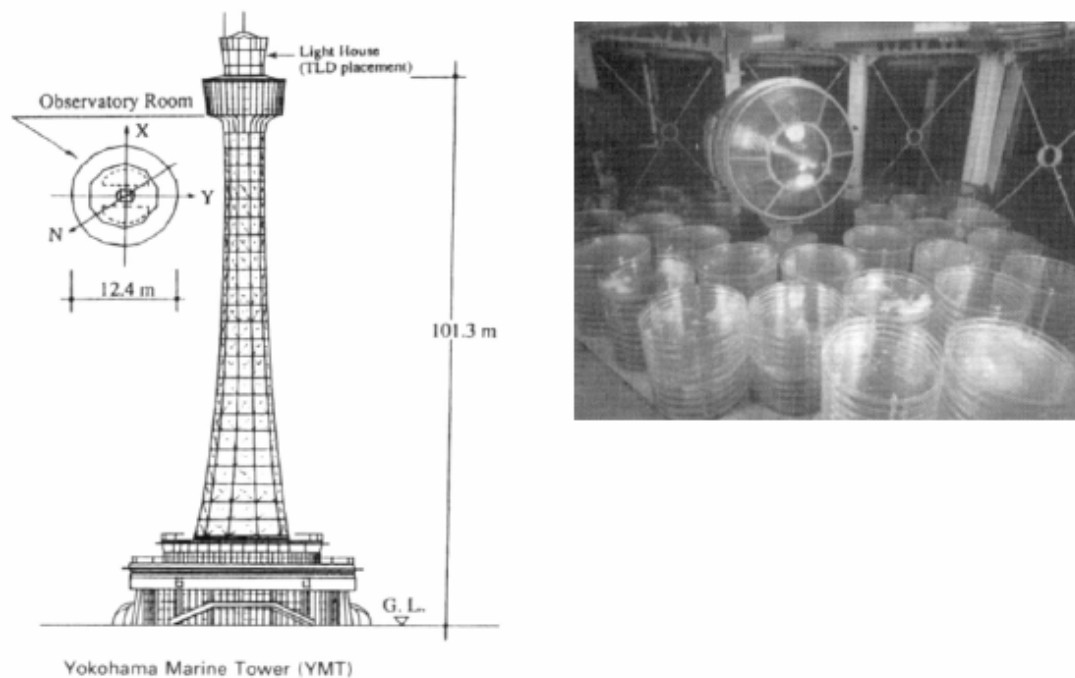


Figura 16. Estructura con amortiguadores de líquido sintonizados (ALS).

4.2.2.2 Configuraciones típicas de AMS

Los AMS instalados en edificios pueden ser de diferentes formas, en la figura 17 se muestran las implementaciones más usuales. En el caso a) es un simple péndulo, cuyo período de vibración depende solo del largo del mismo. Su desventaja es el gran espacio requerido para su instalación. En el caso b), c) y d) la cuerda del péndulo es una barra rígida y se utilizan dos masas, una de las cuales esta apoyada en el piso. Cuando hay limitaciones de espacio se puede utilizar un amortiguador de péndulo de rodillo (caso e). Otra solución es el péndulo múltiple etapas como el mostrado en la figura f), que reduce el espacio vertical necesario a la mitad (Soong and Dargush ^[3]).

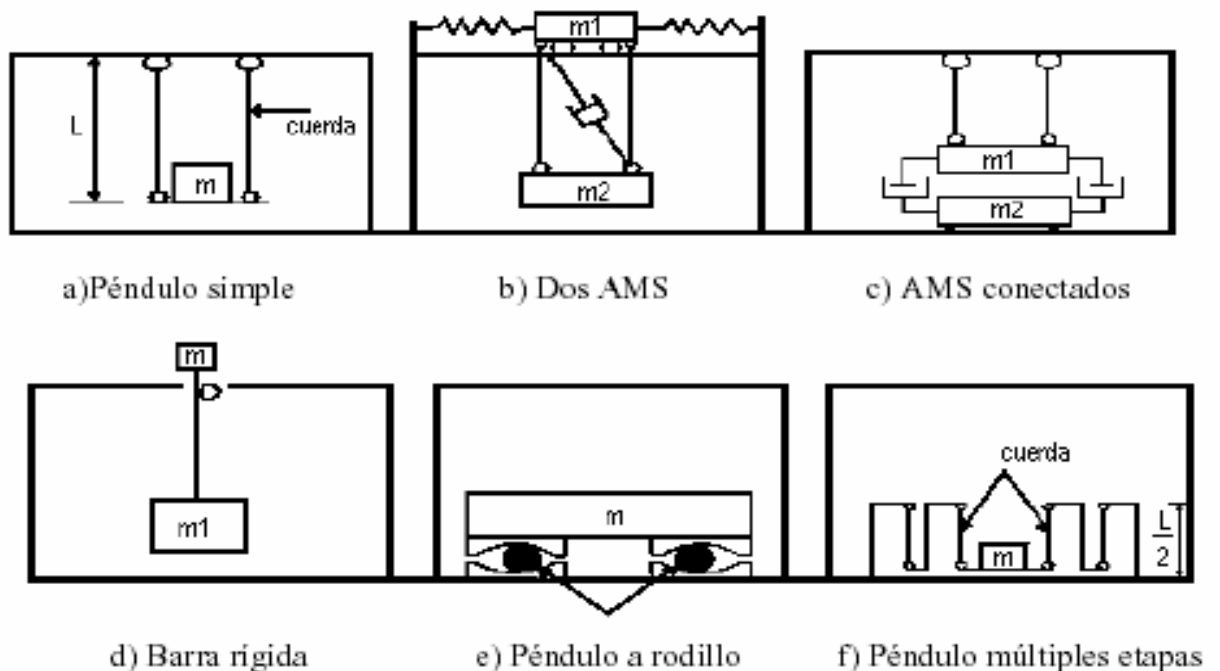


Figura 17. Configuraciones usuales de AMS

4.2.2.3 Parámetros de diseño del AMS.

Desde hace aproximadamente cien años el concepto de amortiguadores de masa sintonizada ha atraído la atención de investigadores en diferentes campos para su aplicación con el propósito de controlar vibraciones causadas por diferentes tipos de fuerzas. Aunque en un principio fue comprobado su excelente funcionamiento en la reducción de vibraciones provenientes de acciones de viento; se cuestionó la eficiencia de los AMS en relación con acciones sísmicas. Empero, con el pasar de los años también se ha podido corroborar su excelente comportamiento ante acciones sísmicas.

Los parámetros de diseño del AMS que se deben hallar para lograr la máxima eficiencia del mismo, son la relación de frecuencia (frecuencia del amortiguador/frecuencia de la estructura), la relación de amortiguamiento y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Algunos criterios de optimización de los parámetros son:

- ✓ Desplazamiento mínimo de la estructura principal (seguridad estructural).
- ✓ Rigidez dinámica máxima de la estructura principal.
- ✓ Mínima trayectoria de la masa amortiguada con respecto a la estructura principal.
- ✓ Mínima aceleración de la estructura principal (confort y funcionalidad).

El AMS es aplicable en muchas estructuras para el control estructural. Hay algunas áreas generalizadas donde el AMS se puede instalar con gran éxito. Estas áreas generalizadas del uso de AMS se representan en el diagrama esquemático en la figura 18. Este es representado con sus sigas en ingles TMD (Tuned Mass Dampers).

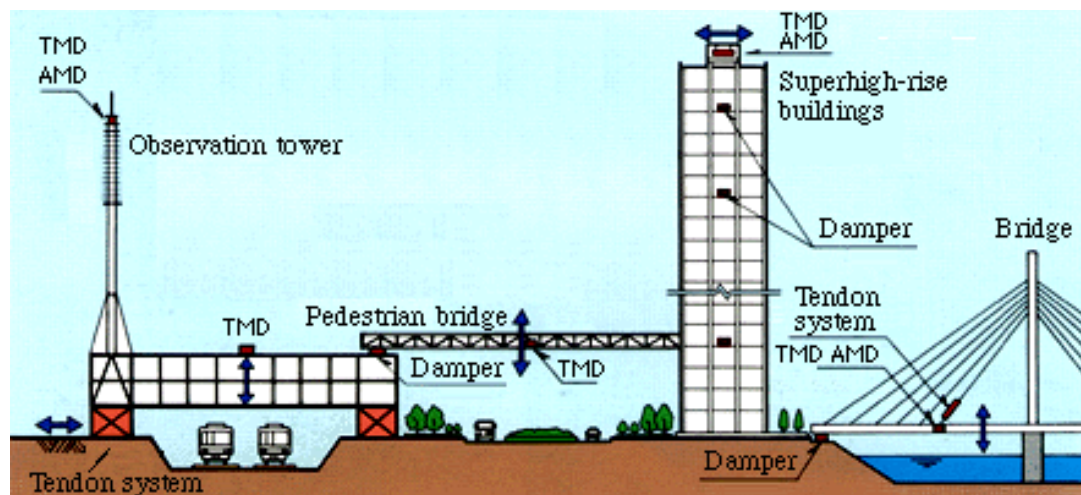


Figura18. Diagrama esquemático de las aplicaciones del TMD

4.2.2.4 Aplicación de los Amortiguadores De Masa Sintonizados (AMS) ó Tuned Mass Dampers (TMD) alrededor del mundo.

Aunque son pocos los edificios construidos con esta tecnología, en los últimos años el uso de los AMS se ha manifestado como una alternativa atractiva tanto para el control de las acciones del viento como para el de las acciones sísmicas. Países como Japón y Estados Unidos son líderes en el uso de los AMS. Y en menor medida se encuentran Australia, Canadá, Arabia Saudita, Pakistán, Alemania, Bélgica e Inglaterra. A continuación se

muestran detalles de algunos de los más importantes edificios que tengan un AMS adicionado a su sistema estructural.

4.2.2.4.1 Amortiguadores de Masa Sintonizados translacionales.

La figura 19 ilustra la configuración típica de un amortiguador de masa sintonizado translacional bidireccional. La masa descansa sobre soportes que funcionan como rodillos y acoplan la masa al desplazamiento relativo del piso. Resortes y amortiguadores son insertados entre la masa y los miembros verticales adyacentes mientras transmiten la fuerza externa que actúan sobre los elementos estructurales. Amortiguadores bidireccionales translacionales son configurados con resortes/amortiguadores en dos direcciones ortogonales y proveen la capacidad para el control del movimiento estructural en dos planos ortogonales. Algunos ejemplos de este tipo de amortiguador son descritas a continuación.

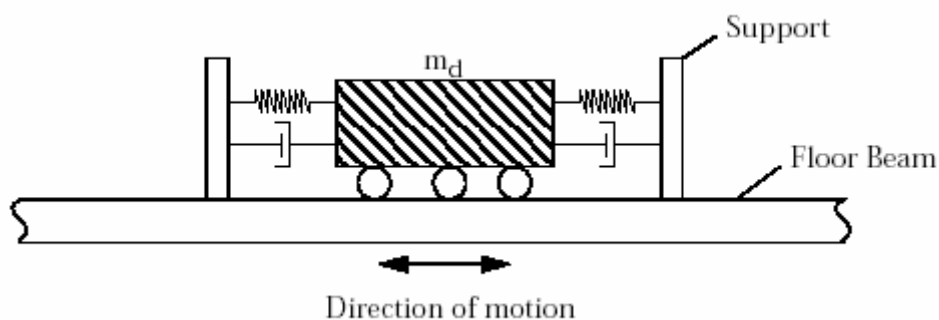


Figura 19. Diagrama esquemático de un AMS translacional.

4.2.2.4.2 John Hancock Tower (Engineering News Record, Oct. 1975)

El sistema comprende dos AMS adicionados a los 60 pisos del John Hancock Tower en Boston para reducir la respuesta a las cargas de viento. Cada AMS tiene un peso de 2700 KN y consisten en una sección cuadrada de acero de 5.2m^2 y un metro de altura que reposa sobre un soporte de acero de 9 metros de longitud. Este sistema fue diseñado y construido por LeMessurier Associates/SCI en asociación con MTS System Corp., con un costo de alrededor de 3 millones de dólares.



Figura 20. John Hancock Building

4.2.2.4.3 Citicorp Center

El AMS del Citicorp también fue diseñado y construido por LeMessurier Associates/SCI en asociación con MTS System Corp. Este edificio de 279m de alto, tiene un periodo fundamental de aproximadamente 6.5 segundos. El AMS se encuentra localizado en el piso 63 en el crown de la estructura, tiene

una masa de 366Mg, alrededor del 2% de la masa modal efectiva del primer modo, y fue al tiempo de su instalación 250 veces mas grande que cualquier amortiguador de masa sintonizado construido hasta esa fecha.

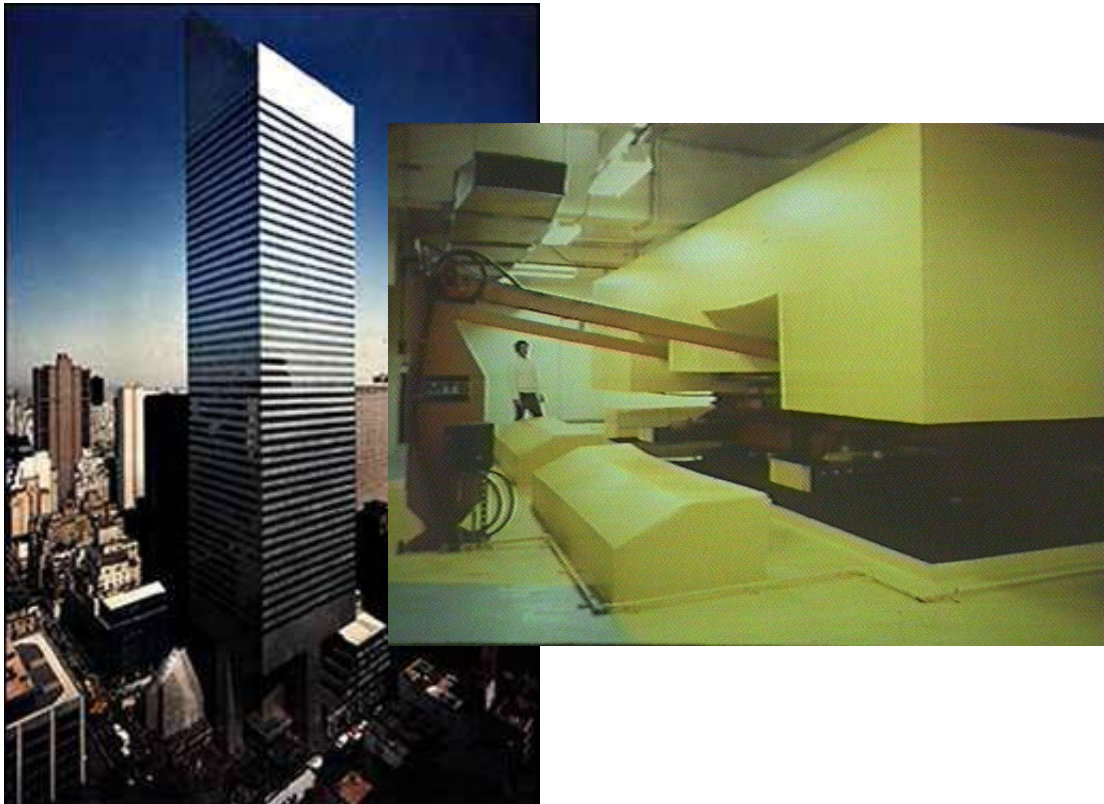


Figura 21. Citicorp Center, New York y el TMD instalado.

4.2.2.5 Teoría dinámica de los AMS

El procedimiento de diseño se estableció teniendo en cuenta un sistema principal (edificio) con un amortiguamiento del 5% y un sistema secundario amortiguado (AMS), al cual se le determinaron los parámetros de diseño óptimos partiendo de la idealización del sistema principal como un sistema

de un grado de libertad (SDOF). Esto con el fin de adoptar una sola frecuencia natural predominante para el análisis. En este caso la correspondiente al primer modo (frecuencia fundamental) de la estructura.

La concepción dinámica asociada se representa en la figura 22. En esta se puede observar un sistema SDOF que posee una masa \mathbf{m} , una relación de amortiguamiento \mathbf{c} y una rigidez \mathbf{k} ; sometido a unas fuerzas externas como se observa. Un amortiguador de masa sintonizado (AMS) con masa \mathbf{m}_d , una relación de amortiguamiento \mathbf{c}_d y una rigidez \mathbf{k}_d acoplado al sistema principal. Los desplazamientos obtenidos son: \mathbf{u}_g , el movimiento del suelo; \mathbf{u} , el movimiento relativo entre la estructura principal y el suelo; y \mathbf{u}_d , el desplazamiento relativo entre el amortiguador y el sistema principal.

Con esta notación y considerando que el sistema esta sujeto a fuerzas externas y a la excitación del suelo, las ecuaciones dinámicas imperantes toman la siguiente forma:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p$$

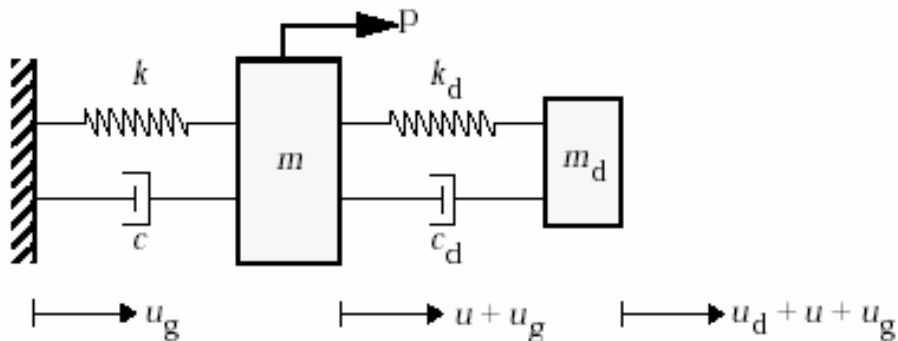


Figura 22. Sistema SDOF amortiguado con un sistema AMS acoplado.

Realizada la correspondiente solución de estas ecuaciones arrojan las relaciones necesarias para obtener los parámetros óptimos para el funcionamiento del AMS.

Para tal efecto se adoptaron unas expresiones planteadas en el estudio de Tsai & Lin (1993) ^[16]; las cuales determinan unas gráficas que presentan como valores conocidos: la relación de amortiguamiento de la estructura ξ (**5%**) y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Y a través de estos se estiman los valores correspondientes para la frecuencia óptima f_{opt} y la relación de amortiguamiento ξ_d del AMS.

Las gráficas se muestran a continuación junto a las expresiones que gobiernan tales curvas.

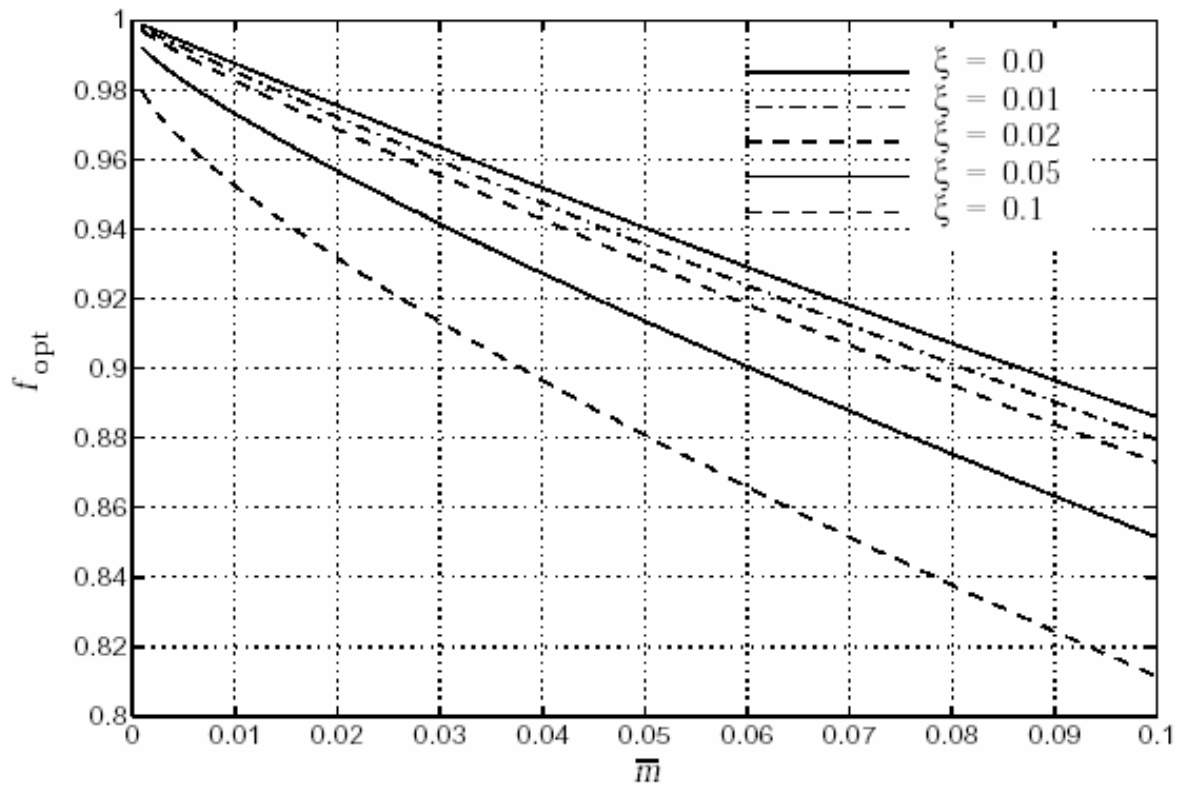


Figura 23. Relación de frecuencia óptima f_{opt} para el AMS

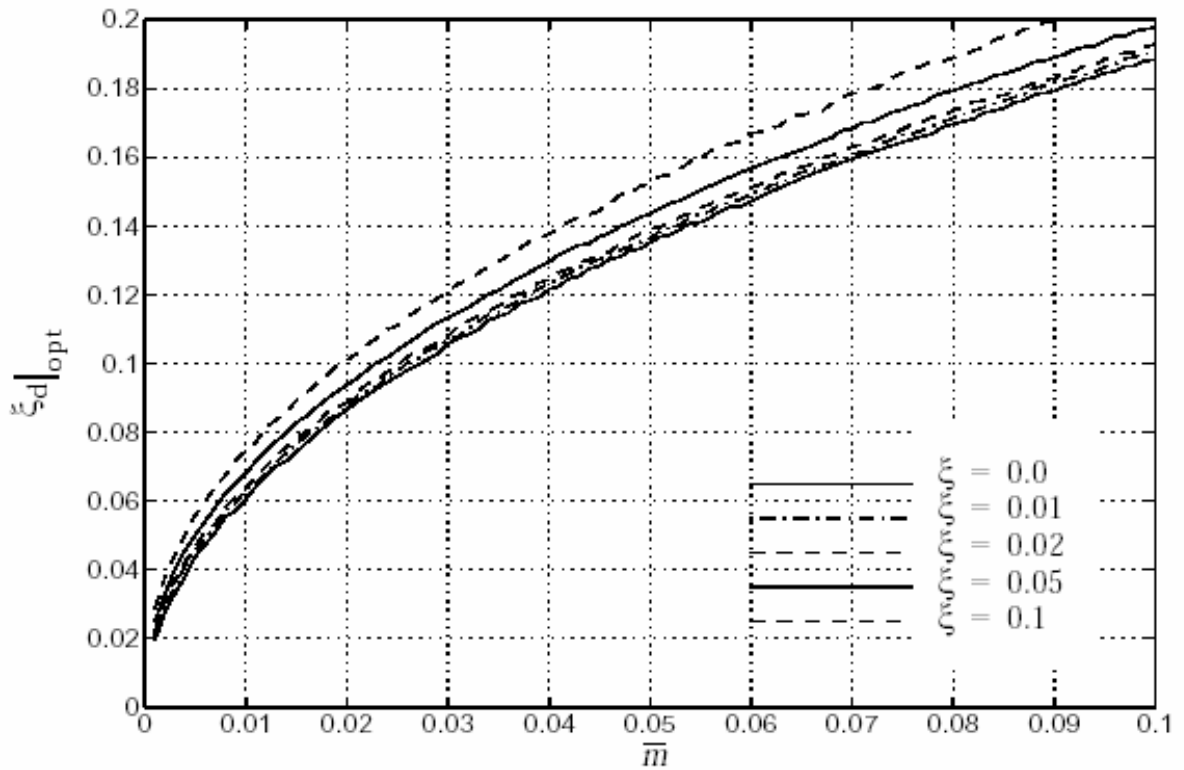


Figura 24. Relación de amortiguamiento óptima ξ_d para el AMS.

$$f = \left(\frac{\sqrt{1 - 0.5\bar{m}}}{1 + \bar{m}} + \sqrt{1 - 2\xi^2 - 1} \right) - [2.375 - 1.034\sqrt{\bar{m}} - 0.426\bar{m}] \xi \sqrt{\bar{m}} - (3.730 - 16.903\sqrt{\bar{m}} + 20.496\bar{m}) \xi^2 \sqrt{\bar{m}}$$

$$\xi_d = \sqrt{\frac{3\bar{m}}{8(1 + \bar{m})(1 - 0.5\bar{m})}} + (0.151\xi - 0.170\xi^2) + (0.163\xi + 4.980\xi^2)\bar{m}$$

Como se observa en la gráficas estas se encuentran con diversos valores típicos. La relación de amortiguamiento ξ de la estructura varía de un 0% a un 10%. Para edificios regulares como el utilizado en el presente estudio se asumió un amortiguamiento del 5%. En cuanto a la relación de masa que determina la cantidad de masa que se adicionará al sistema se adoptó un porcentaje del 1% del total de la masa de la estructura para el AMS.

Luego de obtener los valores respectivos para la relación de amortiguamiento y la frecuencia óptima del AMS se procede a calcular los demás parámetros que establecen el comportamiento dinámico de este dispositivo. A continuación en las respectivas memorias de cálculo se detallan tales valores.

5. JUSTIFICACIÓN

Durante la historia es incalculable el número de víctimas y desaparecidos que han dejado en su paso los terremotos en diversas partes del mundo. Desolación, **ruinas**, tristezas es el resultado de este tipo de catástrofes y un vuelco total en el ámbito de la vida cotidiana de toda una sociedad. Es típico ver distintos tipos de edificaciones colapsar después o durante el desarrollo de este fenómeno natural dejando en medio de los escombros, escenas trágicas como lo son víctimas humanas. Por lo que diseñar estructuras relativamente seguras se ha convertido en el principal desafío para los ingenieros civiles. Al igual que diseñar y construir edificaciones las cuales se mantengan estables en el momento en que se presenten estos tipos de eventos (sismos).

Durante las últimas décadas el diseño sismorresistente ha evolucionado de manera considerable en la búsqueda de la obtención de nuevas técnicas. Es normal ver modificaciones en propiedades o en factores dinámicos en las normas que rigen la construcción de cada país. Estos cambios tienen como objetivo brindar un mejor desempeño, y el de obtener cada vez más una mayor capacidad de disipar energía sísmica en las estructuras al momento de presentarse algún evento sísmico. Se busca principalmente que las estructuras no experimenten vibraciones excesivas causadas ya sea por cargas sísmicas o de viento, y conlleven a un posterior colapso de

magnitudes catastróficas. Entre las nuevas técnicas de diseño y construcción que se están implementando para satisfacer la necesidad de brindar seguridad en las estructuras se encuentra la utilización de un dispositivo denominado “**Amortiguadores de Masa Sintonizados**”(AMS); disipador de energía que precisamente tiene como objetivos reducir la magnitud de la respuesta del sistema estructural, para así disminuir la probabilidad de daño en la estructura en general, evitando así un posible colapso y manteniéndola en óptimas condiciones de servicio.

Actualmente en Colombia se emplean técnicas como la de reforzar y rigidizar las estructuras por medio de alternativas como la del uso de pórticos arriostrados, aumento de secciones, uso de muros estructurales, entre otros; alternativas que si bien disminuyen los desplazamientos y ayudan en el funcionamiento de los elementos estructurales, condicionan a la estructura en distintos aspectos, entre los cuales vale la pena resaltar:

- ✓ La distribución de espacio en la edificación ya que estos se ven disminuidos por la existencia de nuevos elementos o por el aumento de sección de los elementos ya existentes.
- ✓ El comportamiento estructural de la edificación.
- ✓ El alto costo de las estructuras tanto en su etapa de construcción debido a las dimensiones de los elementos, como al momento de reparar estos mismos después de transcurrir un sismo.

Es aquí donde la alternativa de los dispositivos toma fuerzas y se vuelve factible; teniendo como objetivo principal el de brindar seguridad y confort a las estructuras. Y en algunas ocasiones, el de reducir los costos de la misma. La escogencia del sistema “amortiguador de masa sintonizado” (AMS) tuvo su justificación en que es prácticamente una alternativa nueva en el ámbito nacional y se busca seguir la línea de investigación que se viene fomentando actualmente de la Universidad del Magdalena por medio de sus estudiantes y profesores en general; motivo por el cual los alcances que se desean con este proyecto es dar a conocer a los ingenieros civiles del país una opción de diseño sismorresistente más; y presentar su factibilidad en cuanto a lo económico en ciertos tipos de edificaciones, a través de la utilización de un **AMS** en edificios.

Con base en antecedentes consultados se ratificará su excelente desempeño en edificaciones de gran envergadura y además se tratará de encontrar el tipo de edificación en la cual se dá un funcionamiento óptimo del sistema a estudiar durante el desarrollo del proyecto.

Para lograr tal propósito se estudiará la implementación de un dispositivo de control sísmico en distintas clases de edificaciones. Estos dispositivos son sistemas de control “secundarios”, y son utilizados con el propósito de atenuar las vibraciones experimentadas por la estructura “primaria” (edificios, para el presente caso); producidas especialmente por las cargas dinámicas, ya sean de viento o sísmicas principalmente.

Todo este estudio; basado en diferentes aspectos como el técnico, el estructural y el económico a partir del auge que han tenido los **AMS** en el mundo por su caracterización sencilla y económica generalmente al compararlos con otros sistemas de control más complejos y costosos hacen de este proyecto una referencia o un punto de partida en la investigación de este tipo de sistema y de la factibilidad de su uso en las estructuras para el control antisísmico en el país.

El estudio económico propuesto en el presente proyecto pretende ser una referencia para establecer la factibilidad de la aplicación de esta tecnología y mostrar la importancia de la posibilidad de reproducirla. Así pues el beneficio conseguido con el presente trabajo es la obtención de conocimiento, funcionamiento y la aplicación de la tecnología de los dispositivos; se busca obtener una referencia estimativa para la evaluación de costos para proyectos que incluyan la utilización de estos dispositivos en diferentes tipos de edificaciones construidas o por construir en Colombia.

6. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la factibilidad desde el punto de vista económico, para el uso de amortiguadores de masa sintonizados (AMS) en edificios de concreto reforzado en Colombia; al realizar diferentes modelaciones en herramientas computacionales como MATHCAD y SAP 2000 entre otras, con diferentes tipos de sistemas rígidos convencionales estructurales y un sistema con AMS.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las diferentes propiedades y características dinámicas que contribuyen al desarrollo funcional del sistema conformado por amortiguadores de masa sintonizados (AMS) en edificios de concreto reforzado.
- Modelar diferentes tipos de edificaciones con el fin de lograr un funcionamiento óptimo del sistema con AMS por medio del programa de análisis estructural "SAP 2000".

- Comparar el costo de los edificios modelados con un sistema de rigidización convencional Vs. un sistema con Amortiguador de Masa Sintonizado (AMS).

- Masificar el conocimiento de los programas MATHCAD y SAP 2000, con el propósito de ser utilizados como herramientas computacionales en el diseño y análisis de edificios de concreto reforzado.

- Establecer la aplicación de nuevas técnicas eficaces, seguras y económicas para el diseño y rehabilitación de edificaciones.

7. FORMULACIÓN Y GRAFICACIÓN DE HIPOTESIS.

Tal vez sería apropiado, adecuado y oportuno afirmar que la aplicación en el país de las nuevas tecnologías y metodologías para el diseño y construcción de estructuras se puede definir como una herramienta casi inexistente, principalmente por tres razones:

1. La preparación de los profesionales que se encargan de los diseños no incluye el estudio de nuevas tecnologías. Son pocas las universidades en el país las cuales conlleven o incentiven al estudiante a realizar un estudio profundo relacionado a la investigación de nuevas tecnologías.
2. El aspecto económico, son pocas las posibilidades en Colombia de salir del país a realizar estudios de especializaciones, maestrías o doctorados.
3. La otra razón y tal vez la más importante son los costos generados al implementar el uso de alguna de estas tecnologías; haciendo de la misma una herramienta poco rentable.

La utilización de los dispositivos disipadores de energía, puede ser factible en cierto tipo de edificaciones, específicamente en el caso de los TMD se ha comprobado su eficiencia en edificaciones esbeltas y la economía que este representa en base a su funcionamiento con relación a otros sistemas antisísmicos. A través de una comparación técnico-económica entre la aplicación de los TMD y otros tipos de soluciones estructurales, se puede

concluir el nivel de factibilidad que tienen los dispositivos en el medio colombiano, para esto se tendrán en cuenta dos zonas de amenaza sísmica la primera intermedia ($A_a = 0.15$) y la segunda alta ($A_a = 0.25$).

8. ALCANCE Y LIMITACIONES

Los alcances y las limitaciones asociadas a esta investigación se presentan a continuación:

- En el procedimiento de diseño solo se analizaron elementos estructurales. Por lo que se marginaron del estudio los elementos no estructurales.
- El análisis realizado a los modelos se limita a edificios de 7, 15 y 20 pisos; diseñados con concreto reforzado.
- El proyecto se limita al análisis de sistemas inerciales acoplados, específicamente amortiguadores de masa sintonizados (TMD).
- No se cuenta con equipos de laboratorio para la modelación de los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) a escala física real.

- Para la modelación analítica se utilizó el programa de análisis estructural SAP 2000 v.9 y para la obtención de los parámetros de diseño del AMS el software matemático programable MATHCAD 13.
- En el estudio no se planteó un estudio detallado del suelo. Se supuso en todos los casos que la estructura está empotrada en la base.

9. DELIMITACIÓN DEL ESPACIO TEMPORAL Y GEOGRÁFICO

En cuanto al estudio y diseño de los modelos (edificios) propuestos en el proyecto se determinan dos áreas de investigación en Colombia; acorde con la zonificación actual de amenaza sísmica en el país. El primer espacio temporal en que se desarrolla el proyecto es la ciudad de Santa Marta D.T.C.H, dentro de una zona de amenaza sísmica intermedia y el segundo espacio temporal comprende las demás ciudades colombianas que se encuentren clasificadas en una zona de amenaza sísmica alta.

El método y requerimiento de diseño del amortiguador de masa sintonizado (AMS) se realizará a partir de bibliografías e informaciones de estudios recientes relevantes en el mundo, por lo tanto el proyecto esta enmarcado en un periodo histórico entre la publicación de las normas sismo-resistente colombianas hasta la fecha vigente. Por lo que se realizará el diseño de las

edificaciones teniendo en cuenta todos los requerimientos, especificaciones y efectos sísmicos establecidos en la norma colombiana sismo-resistente NSR-98.

10. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En pos de una recopilación de información actualizada y globalizada, se realizó una ardua búsqueda de bibliografía a través de la Internet. Se seleccionaron y estudiaron varios artículos y documentos en general relacionados con el tema, los cuales se encuentran incluidos dentro de la bibliografía del documento.

11. MATERIALES Y MÉTODOS

11.1 Materiales

Para el desarrollo del proyecto se utilizó:

- El software matemático programable MATHCAD 13
- El programa de análisis estructural SAP 2000 v.9
- Las referencias bibliográficas estipuladas en el presente documento.

11.2 DISEÑO METODOLOGICO SEGÚN LA NATURALEZA DEL PROYECTO.

El proyecto se realizó en base a una edificación con características regulares tanto en planta como en altura con el fin de simplificar el problema. Inicialmente se le realizó el diseño sismo-resistente convencional para el sistema de pórtico (columnas y vigas), y posteriormente se plantearon dos alternativas. Una, la de realizar un diseño a través del sistema dual por medio de muros estructurales exteriores, con el fin de realizar un control de derivas en la estructura y la segunda, la implementación del dispositivo “Amortiguador de masa sintonizado” (AMS) en la solución del sistema estructural en general. El diseño del sistema aporticado y el del sistema dual con muros estructurales exteriores se realizó bajo el cumplimiento de la Norma Sismorresistente (NSR 98) que rige la construcción en el país. Para la obtención de los parámetros de diseño de los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) se utilizaron diversos estudios afines, tal como se muestra en la bibliografía consultada acerca del tema. Las estructuras modeladas se ubicaron de dos zonas de amenaza sísmica: una zona intermedia ($A_a=0.15$) y otra zona alta ($A_a=0.25$), con el fin de abarcar un considerable espacio en el mapa de amenaza sísmica en el país y de esta manera determinar la viabilidad del dispositivo tanto en la aplicación como en el desempeño del sistema.

Después de haber finalizado los diseños se realizó un presupuesto de costos de cada una de las alternativas planteadas determinando así la factibilidad económica de la implementación del sistema utilizado en comparación con los métodos convencionales de diseño presentes en Colombia.

11.3 SELECCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DEL ANÁLISIS

Al concebir los parámetros finales del estudio, es menester definir las principales variables que afectan la factibilidad y el diseño de los modelos.

Por lo que las variables de análisis (tipo dependientes) contempladas en el proyecto son: el costo, que depende de las características de diseño y ubicación de la estructura y la zona de amenaza sísmica, la cual depende de la zona donde se construye la estructura. Una explicación más detallada de estas sería:

- **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 su factibilidad. Esta variable depende básicamente del diseño de la estructura.
- **Zona de amenaza sísmica:** Define el comportamiento sísmico y 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).

12. MEMORIAS DE CÁLCULO.

12.1 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

Teniendo en cuenta el objetivo primordial del proyecto, se usó para el análisis estructural un programa computacional clásico en Ingeniería Sismorresistente ^[17]; en el cual se realizaron modelos de edificios de 20 pisos, con diferentes características dinámicas y sistemas convencionales (sistema de pórticos y dual).

En primer lugar se diseñó un edificio base teniendo en cuenta solo la acción de las cargas verticales; y luego fue sometido a acelerogramas de sismo con diferentes contenidos de aceleraciones (zona sísmica intermedia y alta). De este análisis se obtuvieron los modelos de los sistemas convencionales realizando el control de derivas (desplazamientos relativos de cada piso), de tal modo que arrojara los modelos optimizados. Por último, se realizó un modelo equivalente de Amortiguador de Masa Sintonizado (AMS) a través de la opción “**Link/Supports**” del programa escogido (SAP 2000 v.9), en la cual se introdujeron los parámetros de diseño del mismo, según el porcentaje de masa del AMS adicionado (1% de la masa total de la estructura). Luego se calcularon las cantidades de obra para el presupuesto de los modelos estudiados con la respectiva comparación de costos.

12.2 DESCRIPCIÓN DE LAS EDIFICACIONES.

En primer lugar se realizó el diseño del edificio base (20 pisos) durante la investigación. Este modelo se diseñó teniendo en cuenta solo los efectos producidos por las cargas verticales. Todos los edificios modelados se escogieron para ser destinados al uso residencial (apartamentos multifamiliares).

El sistema estructural de las edificaciones constan de un sistema de pórticos constituidos por cuatro pórticos no arriostrados en ambas direcciones y espaciados cada seis metros.

Las estructuras poseen una configuración regular, tanto en planta como en altura. Con una placa de entrepiso aligerada con casetones de icopor recuperables armada en una dirección.

Concluido el diseño a partir de cargas verticales, se realizó el diseño teniendo en cuenta los efectos de las cargas sísmicas. Para lograr este objetivo se rigidizaron las estructuras a través de tres alternativas:

1. Aumento de secciones en los elementos estructurales (técnica tradicional).
2. Adición de muros de concreto estructural.
3. Adición de Amortiguadores de Masa Sintonizados (**AMS**). (Sistema de control estructural sísmico).

Cada uno de estos modelos fue diseñado teniendo en cuenta el comportamiento sísmico de los sistemas y elementos estructurales de acuerdo a su capacidad de disipación de energía en el rango inelástico. Para esto se diseñaron cada modelo para dos niveles de capacidad de disipación de energía:

- ✓ El primero para la ciudad de Santa Marta dentro de una zona de amenaza sísmica intermedia con una capacidad de disipación de energía moderada (DMO): Con un coeficiente de aceleración pico efectivo para el diseño de $A_a = 0.15$.
- ✓ El segundo para una zona de amenaza sísmica alta con una capacidad de disipación de energía especial (DES) para ciudades como Manizales, Armenia, Pereira o Cali, con un coeficiente de aceleración pico efectivo para el diseño considerado alto de $A_a = 0.25$.

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 del presente proyecto y se definirán el coeficiente de sitio, el grupo de uso y el coeficiente de importancia.

En la tabla A.2-3 de la NSR- 98 se establece el factor para tener en cuenta los efectos locales del suelo **S**, obteniendo un valor de 1.2 para perfil de suelo **S₂**.

En la tabla A.2-4 de la NSR- 98 se establece el factor que modifica el espectro de acuerdo con el grupo de uso a que este asignada la edificación. Para el grupo **I** se obtiene un valor de $I=1$.

Para las modelaciones de las estructuras se utilizó el programa **SAP2000 v.9** y el software matemático programable **MATCAD 13**.

12.3 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 estribos $f_y = 280\text{Mpa}$
- ✓ Acero retracción fraguado y Temperatura $F_y = 420\text{Mpa}$

12.4 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.

✓ **Vigas de carga**

Ambos apoyos continuos

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

$$h = \frac{L}{14} = \frac{6.0}{14} = 0.43\text{m} \approx 0.45\text{m}$$

Cuando se cuentan con luces largas (entre 6 – 7.5m) la relación h/b debe estar entre:

$$\frac{h}{b} \approx 1-1.5$$

$$b = \frac{h}{1.5} = \frac{0.45}{1.5} = 0.3m$$

Luego las vigas de carga tendrán la siguiente sección:

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

$$\mathbf{b = 0.35m}$$
 (esto por tener en cuenta que reciben la carga de las viguetas)

✓ ***Vigas de amarre (sísmicas)***

Ambos apoyos continuos

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

$$h = \frac{L}{14} = \frac{6}{14} = 0.43m$$

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

$$b = \frac{h}{2} = \frac{0.45}{2} = 0.23m$$

Luego las vigas sísmicas tendrán la siguiente sección:

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

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

✓ ***Losa de entrepiso***

Ambos apoyos continuos

L= 6.0 m

$$h = \frac{L}{14} = \frac{6}{14} = 0.43m$$

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

Espesor de placa: 0.45 m

Espesor de torta: 0.05 m

Ancho vigueta: 0.1m

Ancho del casetón de icopor: 0.8m

Altura del casetón de icopor: 0.4 m

12.5 ANALISIS DE CARGA

✓ **Carga Muerta**

Cubre todas las cargas de elementos permanentes de construcción incluyendo su estructura, los muros, pisos, cubiertas, cielos rasos, escaleras, equipos fijos y todas aquellas cargas que no son causadas por la ocupación y uso de la edificación.

Al calcular la carga muerta deben utilizarse las densidades de masa reales de los materiales, por esta razón se utilizaron como guía los valores de las tablas **B.3.2**, **B.3.3**, **B.3.4** de la NSR-98.

Calculo de la carga muerta sobre la placa de entrepiso (carga por unidad de área)

Peso de la loseta: $0.05 \cdot 24$	1.2KN/m ²
Peso de la vigueta: $\frac{(0.1)(0.45)(24)}{0.9}$	1.2KN/m ²
Peso de acabados de piso:.....	1.5KN/m ²
Peso de particiones:.....	3.23KN/m ²
Peso cielo raso en madera.....:	0.4KN/m ²
Peso del bloque de icopor:.....	<u>0.1KN/m²</u>
	7.63KN/m ²

Luz aferente de vigueta: 0.9m.

7.63 (0.9)=**6.87 KN/m** **(carga muerta viguetas de entrepiso)**

Calculo de la carga muerta sobre la placa de cubierta (carga por unidad de área)

Peso de la loseta: $0.05 \cdot 24$	1.2KN/m ²
Peso de la vigueta: $\frac{(0.1)(0.45)(24)}{0.9}$	1.2KN/m ²
Peso cielo raso en madera:.....	0.40KN/m ²
Peso impermeabilizante:.....	0.03KN/m ²
Peso del bloque de icopor:.....	<u>0.1KN/m²</u>
	2.93KN/m ²

Luz aferente de vigueta: 0.9m.

2.93 (0.9)=**2.64 KN/m** **(carga muerta viguetas de cubierta)**

✓ **Carga Viva**

La carga viva son aquellas producidas por el uso y ocupación de la edificación, estas no incluyen cargas ambientales como sismo y viento.

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 residencial; En la norma NSR-98 numeral **B.4.2.1** establece que las cargas vivas requeridas para vivienda es:

Vivienda1.8KN/m²

Luz aferente de vigueta: 0.9mt.

$$(1.8)(0.9)=1.62\text{KN/m}$$

12.6 COMBINACIONES DE CARGA

Las estructuras deben diseñarse para resistir las fuerzas o solicitaciones que actúan sobre el sistema estructural y proviene del peso propio, ocupantes y sus posesiones y los efectos ambientales como sismos, vientos, etc. Para estructuras de concreto reforzado o mampostería estructural las combinaciones básicas de carga con las que se diseñaran los modelos son

(B.2.4.2):

1. $1.4 D + 1.7 L$
2. $1.05 D + 1.28 L + E_x$
3. $1.05 D + 1.28 L - E_x$
4. $1.05 D + 1.28 L + E_y$
5. $1.05 D + 1.28 L - E_y$
6. $0.9 D + 1.0 E_x$
7. $0.9 D - 1.0 E_x$
8. $0.9 D + 1.0 E_y$
9. $0.9 D - 1.0 E_y$

Además se tiene en cuenta para las combinaciones la excentricidad del 5% en el centro de masas producido por la torsión accidental según lo estipula el numeral **A.3.6.7.1**.

12.7 REQUISITOS MINIMOS DE DISEÑO

12.7.1 MODELOS CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

MODERADA (DMO) (Requisitos Mínimos De Diseño)

12.7.1.1 VIGAS

Los elementos vigas se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98:

C.21.3.1 (Requisitos geométricos)

MODELO	Dimensión base viga carguera	Dimensión base viga sísmica
Sistema pórticos	0.35	0.25
Sistema Dual	0.35	0.25
Sistema AMS	0.35	0.25

Tabla 1. Secciones de la base de las vigas escogidas

C.21.3.2 (Requisitos refuerzo longitudinal)

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

C.21.3.3 (Requisitos refuerzo transversal)

En todos los modelos se utilizaron estribos con diámetro N° 3, en la zona de no confinamiento la separación máxima de estribo fue $\frac{d}{2} = \frac{37}{2} = 18,5$ cm. y en

la zona de confinamiento el máximo espaciamiento que se utilizó fue de 9.0 cm.

12.7.1.2 COLUMNAS

Los elementos columna se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98:

C.21.4.1 (Requisitos geométricos)

MODELO	Dimensión mínima
Sistema pórticos	0.30
Sistema Dual	0.30
Sistema AMS	0.30

Tabla 2. Secciones mínimas de columnas escogidas

C.21.4.2 (Requisitos refuerzo longitudinal)

Para todos los modelos se diseñaran con cuantías que oscilan entre $0.01 \leq \rho \leq 0.06$

12.7.1.3 DIAFRAGMA (C.21.6.4.1)

Los diafragmas de concreto deben tener un espesor mínimo de **45** mm. Dentro de este espesor se puede incluir el mortero de afinado, siempre y cuando este esté reforzado y adecuadamente adherido al diafragma.

El espesor de la torta para los modelos de capacidad de disipación de energía moderada (DMO) es de 50 mm.

12.7.1.4 MODELO SISTEMA DE PÓRTICOS

12.7.1.4.1 Secciones de elementos

Secciones finales para cumplir derivas (A_a : 0.15):

ELEMENTO	SECCIONES	
	Base (m)	Altura (m)
Viga Carguera	0.35	0.45
Viga sísmica	0.25	0.45
Columna Central, pisos 1al 6	0.90	0.90
Columna Central, pisos 7 al 13	0.75	0.75
Columna Central, pisos 14 al 20	0.45	0.45
Columna Perimetral, pisos 1 al 6	0.90	0.90
Columna Perimetral, pisos 7 al 13	0.60	0.60
Columna Perimetral, pisos 14 al 20	0.40	0.40
Columna Esquinera, pisos 1 al 6	0.70	0.70
Columna Esquinera, pisos 7 al 13	0.50	0.50
Columna Esquinera, pisos 14 al 20	0.30	0.30

Tabla 3. Secciones de los elementos estructurales sistema pórticos

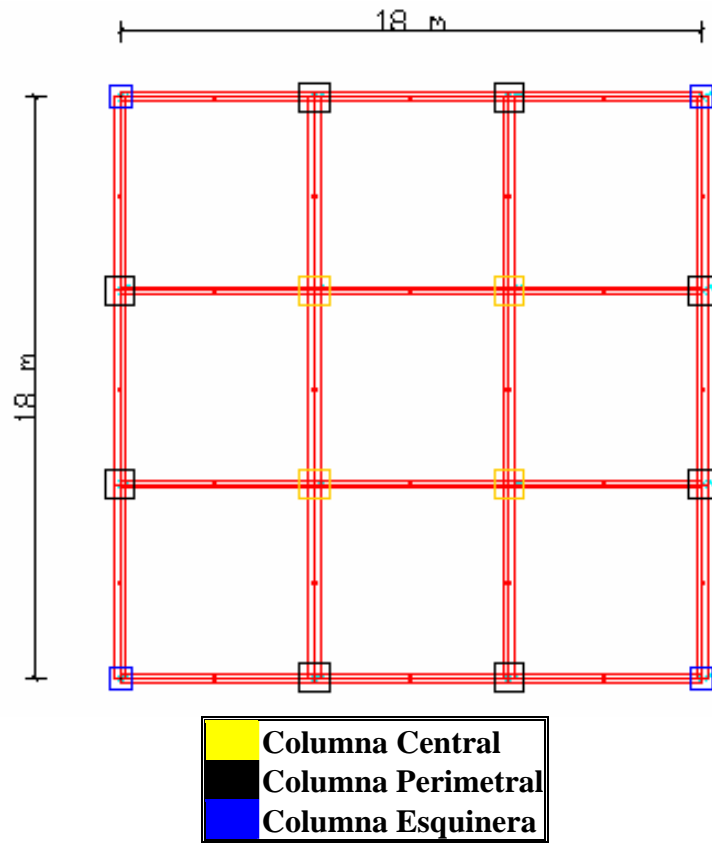


Figura 25. Configuración en planta

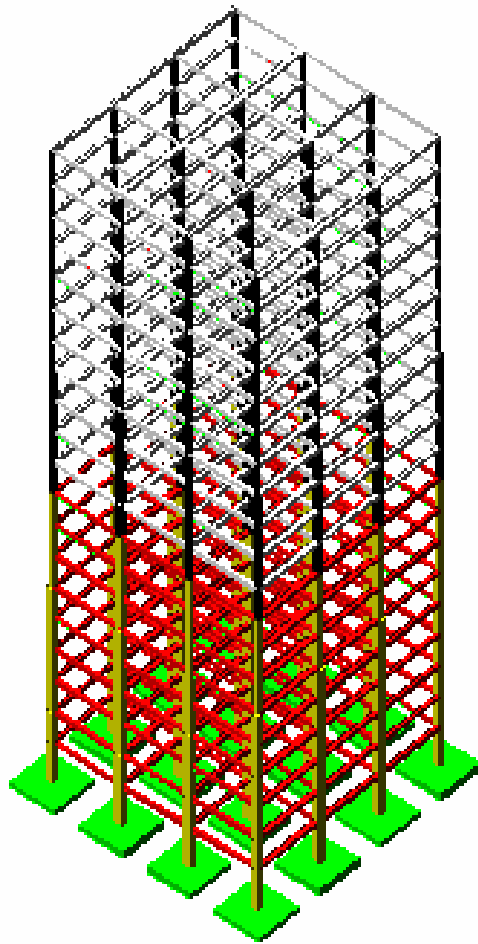


Figura 26. Esquema del modelo de pórtico

Para tener en cuenta los efectos sísmicos en la modelación de las estructuras utilizamos un 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.

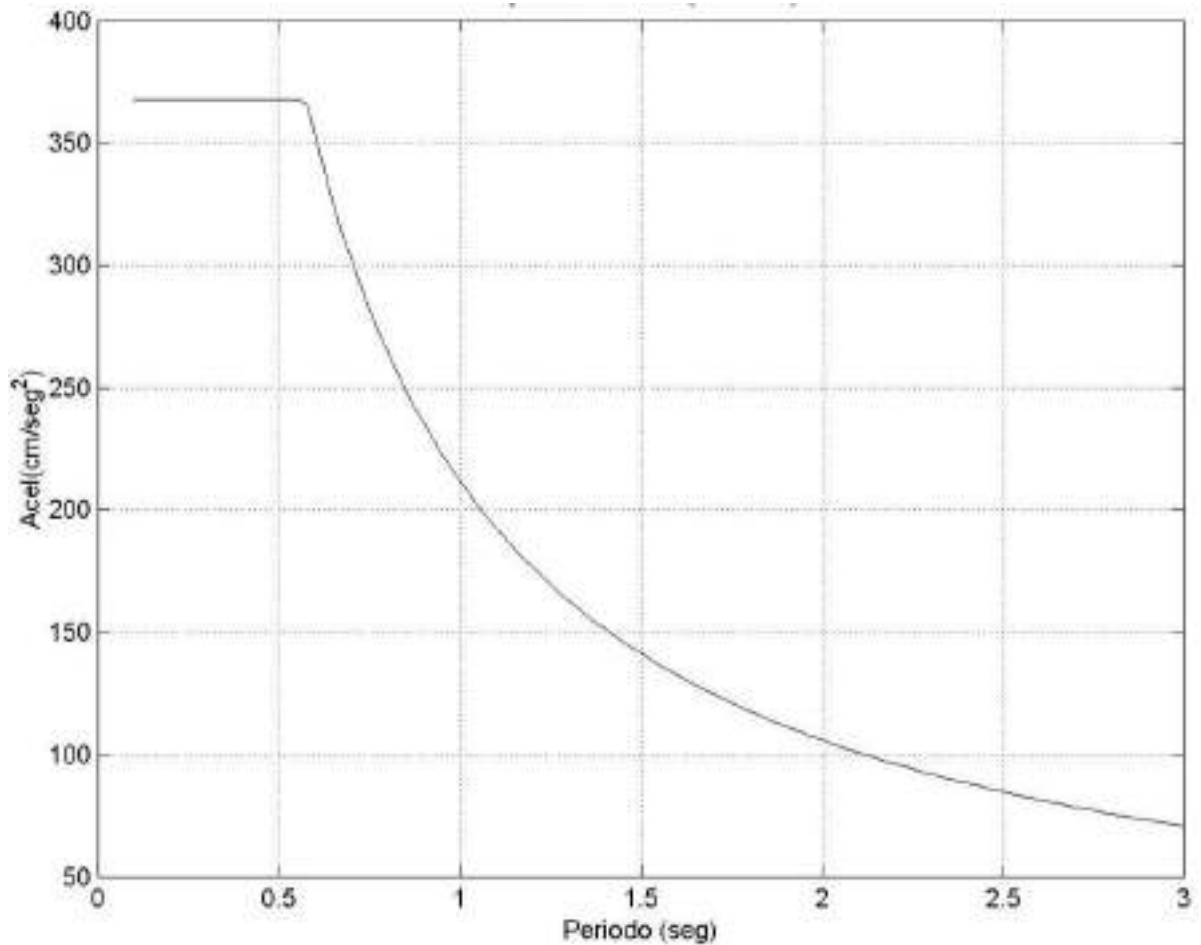


Figura 27. Espectro de diseño zona de amenaza sísmica intermedia.

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**.

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

12.7.1.4.2 Diseño de elementos

Para cada modelo se realizó el diseño de todos los elementos tipo, como vigas, viguetas, columnas y muros. Estos diseños se basaron en los requerimientos de la NSR-98, y en base a ellos se establecieron las cantidades de obra y presupuestos.

12.7.1.4.3 Derivas

Todos los modelos fueron diseñados para cumplir con los requerimientos establecidos en la NSR-98 (**A.6.4**),

Sistema Pórtico (Zona Intermedia)			
Nivel	Desplazamiento (cm)	Desp.Relativo (cm)	% Deriva
20	40,6	0,5	0,18
19	40,1	0,93	0,33
18	39,17	1,37	0,48
17	37,8	1,78	0,62
16	36,02	2,14	0,75
15	33,88	2,41	0,85
14	31,47	2,36	0,83
13	29,11	1,86	0,65
12	27,25	1,97	0,69
11	25,28	2,12	0,74
10	23,16	2,28	0,80
9	20,88	2,47	0,87
8	18,41	2,65	0,93
7	15,76	2,77	0,97
6	12,99	2,71	0,95
5	10,28	2,69	0,94
4	7,59	2,58	0,91
3	5,01	2,31	0,81
2	2,7	1,79	0,63
1	0,91	0,91	0,32

Tabla 4. Derivas relativas para estructura con sistema de pórticos

12.7.1.5 MODELO SISTEMA DUAL $A_a=0.15$

12.7.1.5.1 Secciones de elementos

Secciones definitivas para el cumplimiento de derivas:

ELEMENTO	SECCIONES	
	Base (m)	Altura (m)
Viga Carguera	0.35	0.45
Viga sísmica	0.25	0.45
Columna Central, pisos 1 al 6	0.80	0.80
Columna Central, pisos 7 al 13	0.65	0.65
Columna Central, pisos 14 al 20	0.45	0.45
Columna Esquinera, pisos 1 al 6	0.50	0.50
Columna Esquinera, pisos 7 al 13	0.40	0.40
Columna Esquinera, pisos 14 al 20	0.30	0.30
Muros $e=0.20$, piso 1	6.0	3.30
Muros $e=0.20$, piso 2 al 20	6.0	2.85

Tabla 5. Secciones de los elementos estructurales sistema dual

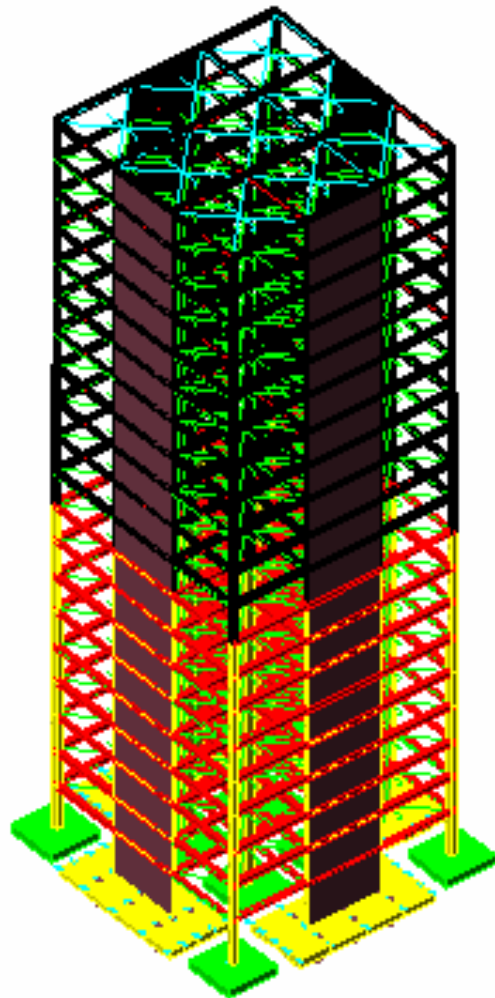


Figura 28. Esquema del modelo de muros

Para muros de concreto con capacidad moderada de disipación de energía (DMO) y pórticos de concreto con capacidad moderada de disipación de energía, el valor de R_o es de **6**, Tabla **A.3-4**. $R = (1)*(1)*(6) = 6$

12.7.1.5.2 Derivas

Sistema Dual (Zona Intermedia)			
Nivel	Desplazamiento (cm)	Desp.Relativo (cm)	% Deriva
20	49,25	2,34	0,82
19	46,91	2,37	0,83
18	44,54	2,41	0,85
17	42,13	2,46	0,86
16	39,67	2,51	0,88
15	37,16	2,55	0,89
14	34,61	2,61	0,92
13	32	2,62	0,92
12	29,38	2,65	0,93
11	26,73	2,67	0,94
10	24,06	2,68	0,94
9	21,38	2,67	0,94
8	18,71	2,65	0,93
7	16,06	2,6	0,91
6	13,46	2,51	0,88
5	10,95	2,41	0,85
4	8,54	2,26	0,79
3	6,28	2,06	0,72
2	4,22	1,83	0,64
1	2,39	2,39	0,68

Tabla 6. Derivas relativas estructura con sistema dual

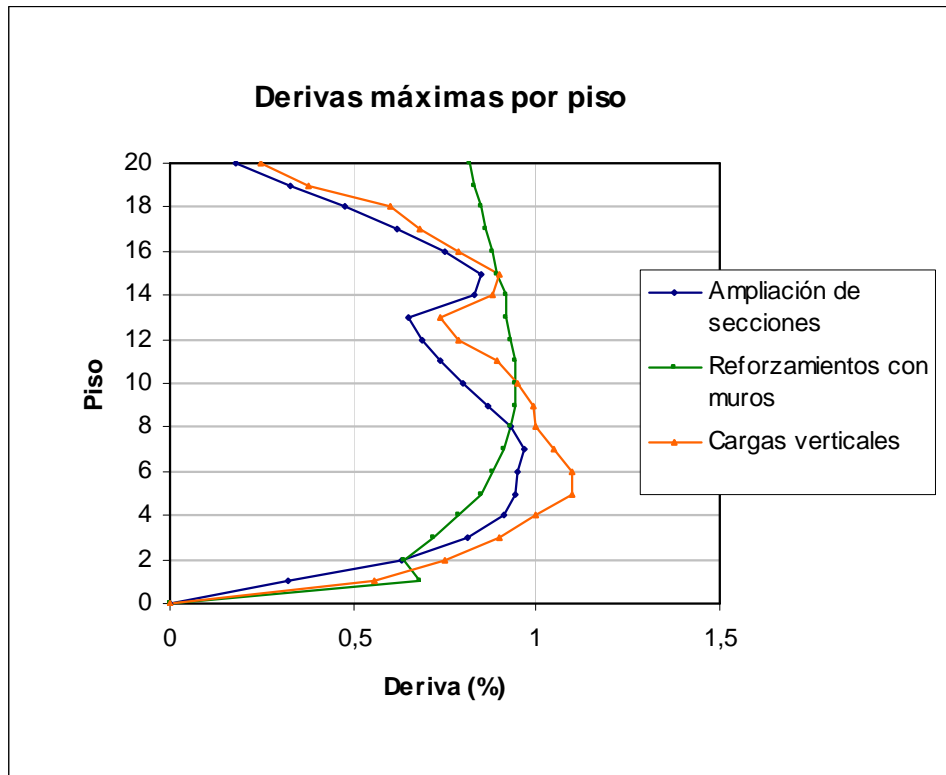


Figura 29. Derivas por piso de sistemas convencionales

12.7.1.6 MODELO SISTEMA CONTROL SÍSMICO (AMS) $A_a=0.15$

12.7.1.6.1 Secciones de elementos

Secciones finales para cumplir derivas:

ELEMENTO	SECCIONES	
	Base (m)	Altura (m)
Viga Carguera	0.35	0.45
Viga sísmica	0.25	0.45
Columna Central, pisos 1 al 6	0.80	0.80
Columna Central, pisos 7 al 13	0.65	0.65
Columna Central, pisos 14 al 20	0.45	0.45
Columna Perimetral, pisos 1 al 6	0.65	0.65
Columna Perimetral, pisos 7 al 13	0.50	0.50
Columna Perimetral, pisos 14 al 20	0.35	0.35
Columna Esquinera, pisos 1 al 6	0.50	0.50
Columna Esquinera, pisos 7 al 13	0.40	0.40
Columna Esquinera, pisos 14 al 20	0.30	0.30

Tabla 7. Secciones de los elementos estructurales AMS

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

$$R = (1) \cdot (1) \cdot (5) = 5$$

Para la modelación de la estructura con los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) se utilizó un análisis modal cronológico en el tiempo (Time History) con ayuda del programa SAP 2000^[17]. 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 discretizado o registros de un sismo artificial como base de entrada del movimiento, es decir, las fuerzas inerciales, fuerzas internas y desplazamientos de la estructura que 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. Tal registro sísmico artificial se obtuvo con la ayuda del programa Aceleros^[18] (Ver referencia bibliográfica).

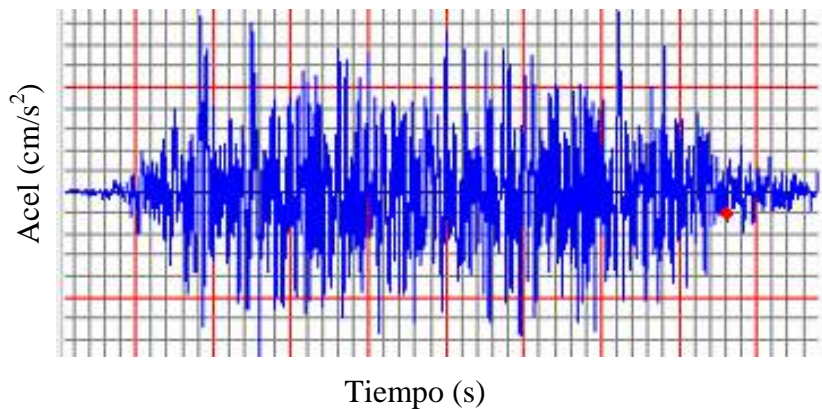


Figura 30. Registro sísmico introducido al programa sap2000^[17]

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

$$R = (1) \cdot (1) \cdot (5) = 5$$

12.7.1.6.2 Derivas

Sistema control sísmico AMS (Zona Intermedia)			
Nivel	Desplazamiento (cm)	Desp.Relativo (cm)	% Deriva
20	32,12	0,2	0,07
19	31,92	0,48	0,17
18	31,44	0,77	0,27
17	30,67	1,06	0,37
16	29,61	1,33	0,47
15	28,28	1,59	0,56
14	26,69	1,85	0,65
13	24,84	1,6	0,56
12	23,24	1,74	0,61
11	21,5	1,88	0,66
10	19,62	2,01	0,71
9	17,61	2,13	0,75
8	15,48	2,22	0,78
7	13,26	2,3	0,81
6	10,96	2,18	0,76
5	8,78	2,17	0,76
4	6,61	2,12	0,74
3	4,49	1,96	0,69
2	2,53	1,62	0,57
1	0,91	0,91	0,26

Tabla 8. Derivas relativas estructura con AMS

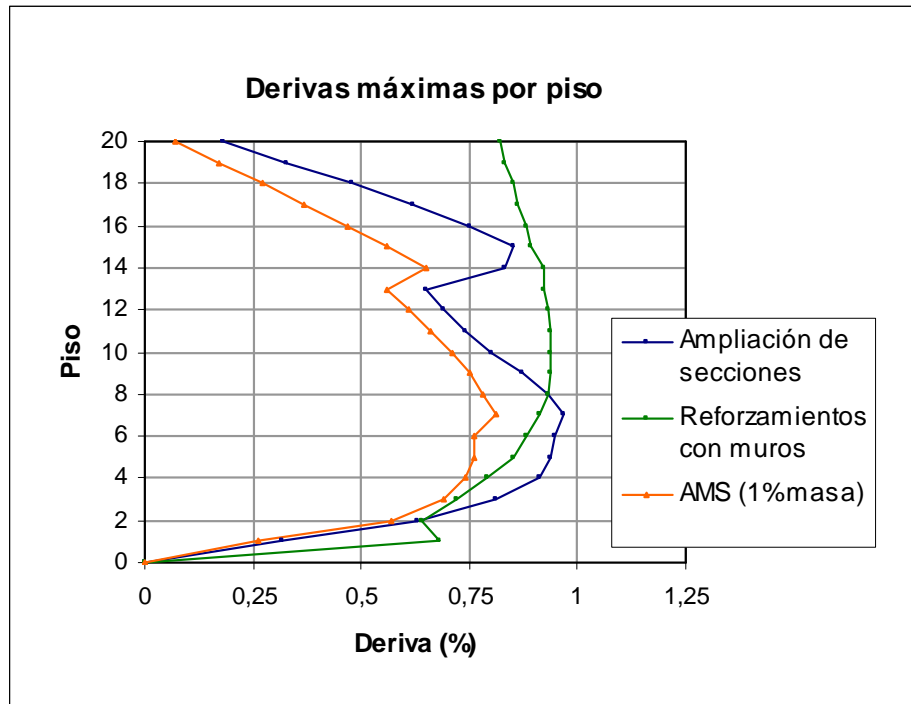


Figura 31. Derivas por piso de sistemas en zona sísmica intermedia

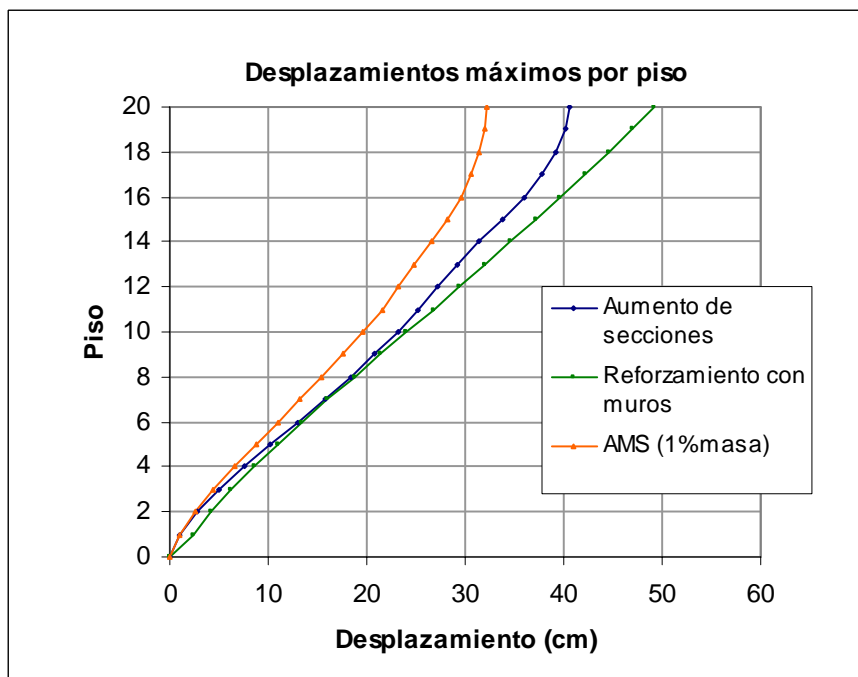


Figura 32. Desplazamientos máximos por piso de sistemas

12.7.2 CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ESPECIAL (DME)

12.7.2.1 VIGAS

Los elementos vigas se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98:

C.21.3.1 (Requisitos geométricos)

MODELO	Dimensión base viga carguera	Dimensión base viga sísmica
Sistema pórticos	0.25	0.25
Sistema Dual	0.25	0.25
Sistema Disipadores	0.25	0.25

Tabla 9. Secciones de la base de las vigas

C.21.3.2 (Requisitos refuerzo longitudinal)

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

C.21.3.3 (Requisitos refuerzo transversal)

En todos los modelos se utilizaron estribos con diámetro N° 3, en la zona de no confinamiento la separación máxima de estribo fue $\frac{d}{2} = \frac{37}{2} = 18,5$ cm. y en la zona de confinamiento el máximo espaciamiento que se utilizó fue de 9.0 cm.

12.7.2.2 COLUMNAS

Los elementos columna se diseñaron teniendo en cuenta los siguientes numerales de la NSR-98:

C.21.4.1 (Requisitos geométricos)

MODELO	Dimensión mínima
Sistema pórticos	0.30
Sistema Dual	0.30
Sistema Disipadores	0.30

Tabla 10. Secciones mínimas de columnas

C.21.4.2 (Requisitos refuerzo longitudinal)

Para todos los modelos se diseñaran con cuantías que oscilan entre $0.01 \leq \rho \leq 0.06$

12.7.2.3 DIAFRAGMA (C.21.6.4.1)

Los diafragmas de concreto deben tener un espesor mínimo de **50** mm. Dentro de este espesor se puede incluir el mortero de afinado, siempre y cuando este esté reforzado y adecuadamente adherido al diafragma.

El espesor de la torta para los modelos de capacidad de disipación de energía especial (DME) es de 50 mm.

12.7.2.4 MODELOS SISTEMA PÓRTICO $A_a=0.25$

12.7.2.4.1 Secciones de elementos

Secciones finales para cumplir derivas:

ELEMENTO	SECCIONES	
	Base (m)	Altura (m)
Viga Carguera	0.45	0.55
Viga sísmica	0.45	0.55
Columna Central, pisos 1 al 6	1.20	1.20
Columna Central, pisos 7 al 13	0.85	0.85
Columna Central, pisos 14 al 20	0.70	0.70
Columna Perimetral, pisos 1 al 6	1.10	1.10
Columna Perimetral, pisos 7 al 13	0.75	0.75
Columna Perimetral, pisos 14 al 20	0.55	0.55
Columna Esquinera, pisos 1 al 6	0.80	0.80
Columna Esquinera, pisos 7 al 13	0.60	0.60
Columna Esquinera, pisos 14 al 20	0.45	0.45

Tabla 11. Secciones de los elementos estructurales sistema de pórticos.

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 ($A_a=0.25$) fue construido con los parámetros establecidos por la NSR- 98 **(A.2.6)** y se muestra en la siguiente grafica.

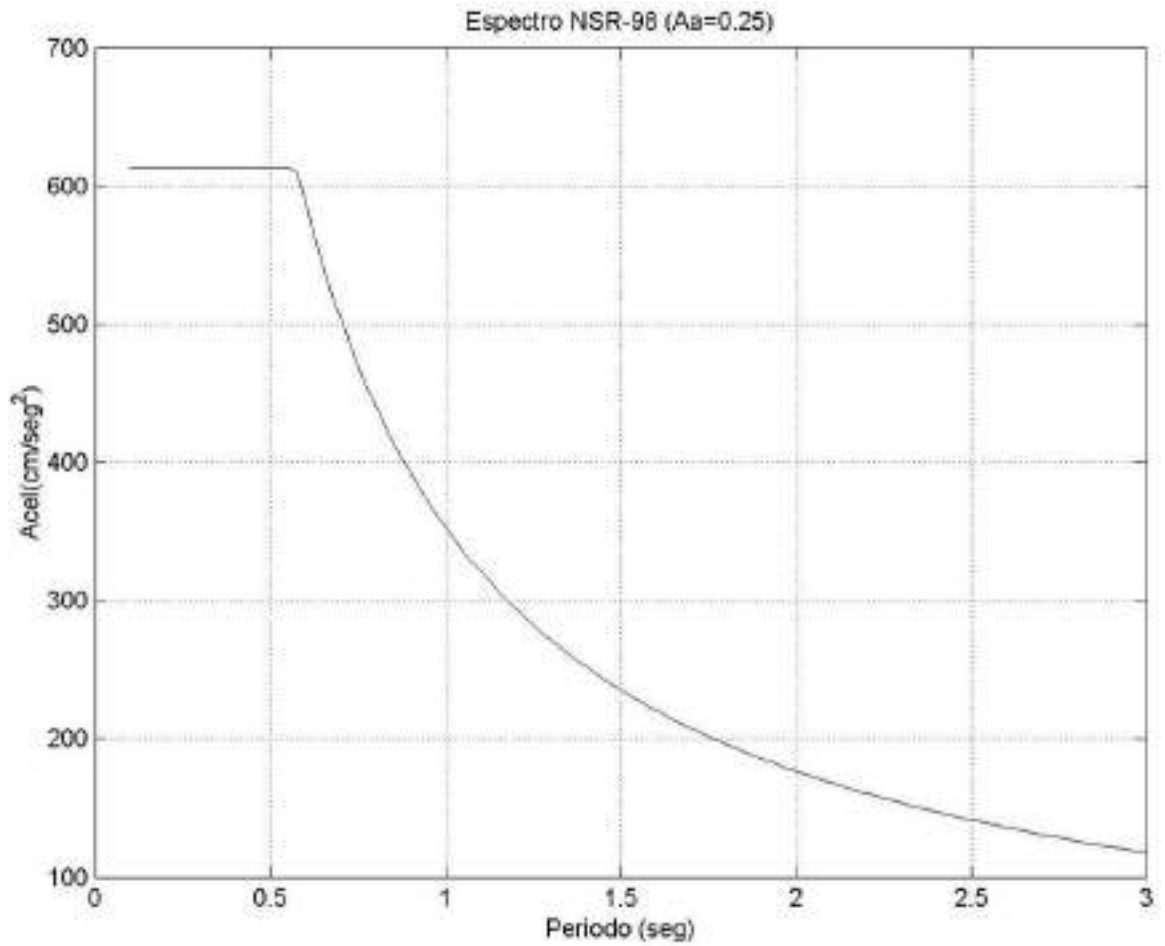


Figura 33. Espectro de diseño zona de amenaza sísmica alta.

Para pórticos de concreto resistentes a momentos con capacidad especial de disipación de energía (DMO), el valor de R_o es de **7**. Tabla **A.3-3**.

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

12.7.2.4.2 Derivas

Sistema Pórtico (Zona sísmica alta)			
Nivel	Desplazamiento (cm)	Desp.Relativo (cm)	% Deriva
20	40,66	0,78	0,27
19	39,88	1,22	0,43
18	38,66	1,66	0,58
17	37	2,01	0,71
16	34,99	2,36	0,83
15	32,63	2,63	0,92
14	30	2,83	0,99
13	27,17	2,66	0,93
12	24,51	2,72	0,95
11	21,79	2,31	0,81
10	19,48	2,16	0,76
9	17,32	2,23	0,78
8	15,09	2,34	0,82
7	12,75	2,39	0,84
6	10,36	2,19	0,77
5	8,17	2,07	0,73
4	6,1	2,04	0,72
3	4,06	1,85	0,65
2	2,21	1,46	0,51
1	0,75	0,75	0,26

Tabla 12. Derivas relativas estructura con sistema de pórticos

12.7.2.5 MODELOS SISTEMA DUAL $A_a=0.25$

12.7.2.5.1 Secciones de elementos

Secciones finales para cumplir derivas:

ELEMENTO	SECCIONES	
	Base (m)	Altura (m)
Viga Carguera	0.40	0.55
Viga sísmica	0.40	0.55
Columna Central, pisos 1 al 6	0.80	0.80
Columna Central, pisos 7 al 13	0.65	0.65
Columna Central, pisos 14 al 20	0.45	0.45
Columna Esquinera, pisos 1 al 6	0.60	0.60
Columna Esquinera, pisos 7 al 13	0.45	0.45
Columna Esquinera, pisos 14 al 20	0.35	0.35
Muros $e=0.20$, piso 1	6.0	3.30
Muros $e=0.20$, piso 2 al 20	6.0	2.85

Tabla 13. Secciones de los elementos estructurales sistema dual.

Para muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DMO) y pórticos de concreto con capacidad especial de disipación de energía, el valor de R_o es de **8**, Tabla **A.3-4**. $R = (1)*(1)*(8) = 8$

12.7.2.5.2 Derivas

Sistema Dual (Zona Sísmica Alta)			
Nivel	Desplazamiento (cm)	Desp.Relativo (cm)	% Deriva
20	51,33	2,19	0,77
19	49,14	2,25	0,79
18	46,89	2,32	0,81
17	44,57	2,39	0,84
16	42,18	2,46	0,86
15	39,72	2,54	0,89
14	37,18	2,59	0,91
13	34,59	2,61	0,92
12	31,98	2,67	0,94
11	29,31	2,7	0,95
10	26,61	2,75	0,96
9	23,86	2,77	0,97
8	21,09	2,78	0,98
7	18,31	2,76	0,97
6	15,55	2,7	0,95
5	12,85	2,63	0,92
4	10,22	2,52	0,88
3	7,7	2,35	0,82
2	5,35	2,14	0,75
1	3,21	3,21	0,91

Tabla 14. Derivas relativas estructura sistema dual

12.7.2.6 MODELO SISTEMA DE CONTROL SÍSMICO (AMS) $A_a=0.25$

12.7.2.6.1 Secciones de elementos

Secciones finales para cumplir derivas:

ELEMENTO	SECCIONES	
	Base (m)	Altura (m)
Viga Carguera	0.35	0.45
Viga sísmica	0.25	0.45
Columna Central, pisos 1 al 6	0.75	0.75
Columna Central, pisos 7 al 13	0.65	0.65
Columna Central, pisos 14 al 20	0.40	0.40
Columna Perimetral, pisos 1 al 6	0.65	0.65
Columna Perimetral, pisos 7 al 13	0.50	0.50
Columna Perimetral, pisos 14 al 20	0.35	0.35
Columna Esquinera, pisos 1 al 6	0.50	0.50
Columna Esquinera, pisos 7 al 13	0.40	0.40
Columna Esquinera, pisos 14 al 20	0.30	0.30

Tabla 15. Secciones de los elementos estructurales, sistema con AMS

12.7.2.6.2 Derivas

Sistema control sísmico AMS: masa 1% (Zona Sísmica Alta)			
Nivel	Desplazamiento (cm)	Desp.Relativo (cm)	% Deriva
20	38,28	0,31	0,11
19	37,97	0,62	0,22
18	37,35	0,96	0,34
17	36,39	1,3	0,46
16	35,09	1,61	0,56
15	33,48	1,92	0,67
14	31,56	2,21	0,78
13	29,35	1,91	0,67
12	27,44	2,07	0,73
11	25,37	2,22	0,78
10	23,15	2,38	0,84
9	20,77	2,52	0,88
8	18,25	2,63	0,92
7	15,62	2,71	0,95
6	12,91	2,56	0,90
5	10,35	2,56	0,90
4	7,79	2,5	0,88
3	5,29	2,31	0,81
2	2,98	1,91	0,67
1	1,07	1,07	0,30

Tabla 16. Derivas relativas estructura con AMS

12.7.3 CÁLCULO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL CON UN AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADO (AMS).

Para la modelación de las estructuras con los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) se utilizó el programa de análisis estructural SAP 2000 y el programa matemático MATHCAD. A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de los parámetros de diseño del AMS y su materialización en el programa SAP 2000.

12.7.3.1 Procedimiento para el análisis y diseño del sistema estructural con AMS

Inicialmente se calcularon las secciones de los elementos que cumplan con las especificaciones mínimas de las normas NSR-98, para resistir demanda de las cargas verticales. Luego se realizó 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.).

Hecho el análisis se verificó la deriva correspondiente a cada piso, con el objetivo de reducir las derivas existentes en la estructura para cumplir las especificaciones de la NSR-98; llevándola a ser menor o igual al 1% del desplazamiento relativo entre piso. Como se esperaba tales derivas no

cumplían los requerimientos establecidos. Por lo que se procedió al cálculo del AMS.

Para tal efecto se adoptaron unas expresiones planteadas en el estudio de Tsai & Lin (1993) [16]; las cuales determinan unas gráficas que presentan como valores conocidos: la relación de amortiguamiento de la estructura ξ (5%) y la relación de masa \bar{m} (masa AMS/masa de la estructura). Y a través de estos se estiman los valores correspondientes para la relación de frecuencia óptima f_{opt} (frecuencia AMS/frecuencia de la estructura) y la relación de amortiguamiento ξ_d del AMS.

Las gráficas se muestran a continuación junto a las expresiones que gobiernan tales curvas.

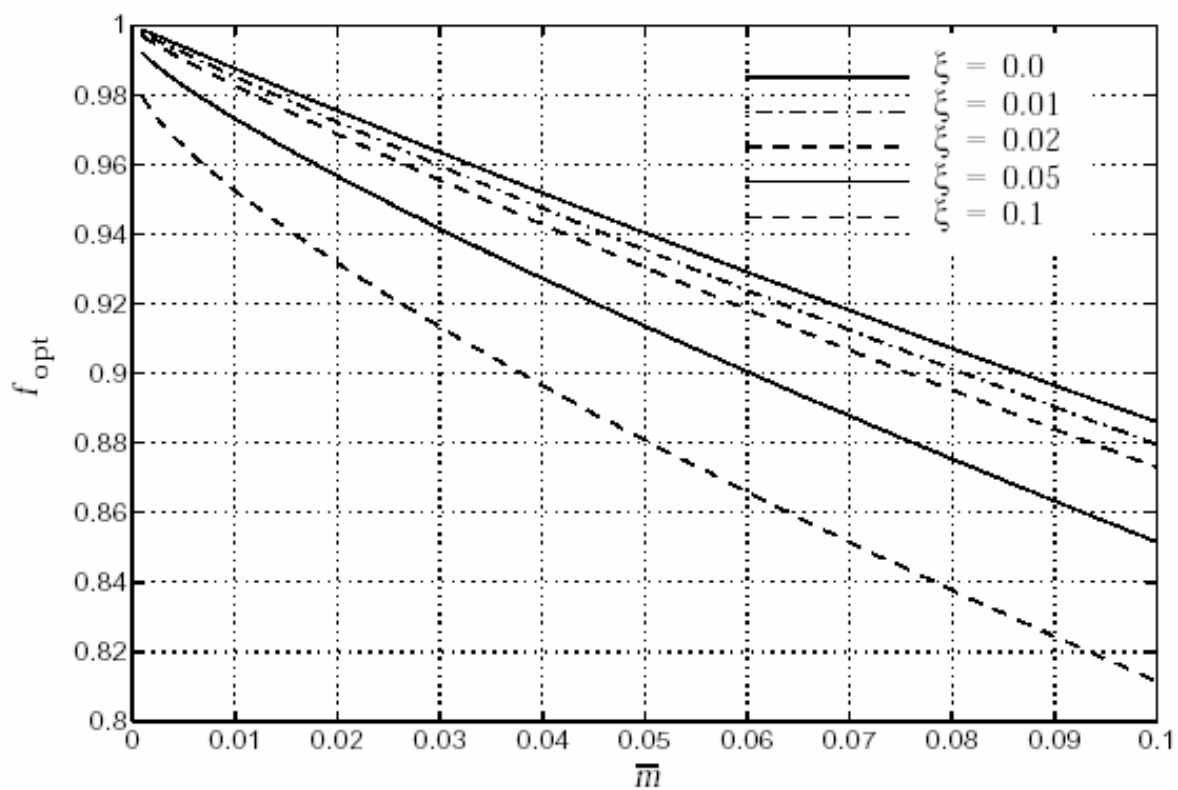


Figura 34. Relación de frecuencia óptima f_{opt} para el AMS

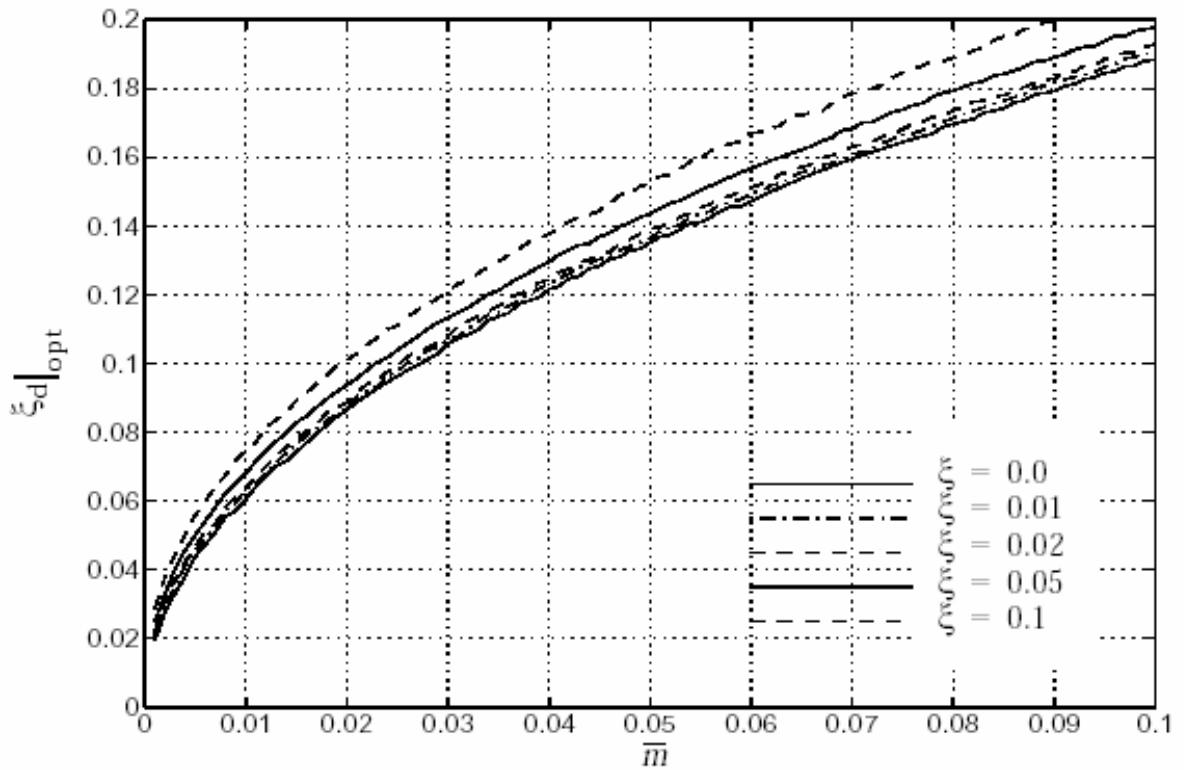


Figura 35. Relación de amortiguamiento óptima ξ_d para el AMS.

$$f = \left(\frac{\sqrt{1 - 0.5\bar{m}}}{1 + \bar{m}} + \sqrt{1 - 2\xi^2 - 1} \right) - [2.375 - 1.034\sqrt{\bar{m}} - 0.426\bar{m}] \xi \sqrt{\bar{m}} - (3.730 - 16.903\sqrt{\bar{m}} + 20.496\bar{m}) \xi^2 \sqrt{\bar{m}}$$

$$\xi_d = \sqrt{\frac{3\bar{m}}{8(1 + \bar{m})(1 - 0.5\bar{m})}} + (0.151\xi - 0.170\xi^2) + (0.163\xi + 4.980\xi^2)\bar{m}$$

La relación de amortiguamiento ξ de la estructura se tomó del **5%** y para la relación de masa \bar{m} se asumió un valor típico del 1% de la masa total de la estructura (incluye el peso propio y la carga muerta calculada). Al introducir estos valores en las anteriores expresiones se tiene que:

f_{opt} :0.9732 ; lo que quiere decir que la frecuencia óptima del AMS corresponde aproximadamente al 97% de la frecuencia natural f de la estructura. Lo cual se plantea acorde con la teoría de sintonización entre AMS Vs.Estructura.

ξ_d :0.068 ; el AMS tendrá una relación de amortiguamiento óptimo del 6.8%.

Con estos valores se procede a calcular los parámetros que se requieren para su modelación en SAP 2000 como se muestra a continuación:

12.7.3.1.1 Datos iniciales para el cálculo de los parámetros de diseño del AMS.

- Periodo fundamental de la estructura $T = 4.42seg$.
- Masa total de la estructura (incluye peso propio y carga muerta)
 $m = 735.72ton$
- Masa del AMS (1% de la masa total) $m_d = 7357.2kg$

Luego con estos datos se tiene que:

$$w_n = \frac{2 \cdot \pi}{T} \rightarrow w_n = 1.422 \cdot \text{rad}/\text{seg} \quad (\text{Frecuencia natural de la estructura})$$

$$K = w^2 \cdot m \rightarrow K = 1.48 \times 10^6 \text{ kg}/\text{seg}^2 \quad (\text{Rigidez de la estructura})$$

$$w_d = f_{opt} \cdot w_n \rightarrow w_d = 1.383 \cdot \text{rad}/\text{seg} \quad (\text{Frecuencia óptima del AMS})$$

$$c_d = 2 \cdot w_d \cdot \xi_d \cdot m_d \rightarrow c_d = 1392.76 \cdot \text{kg}/\text{seg} \quad (\text{Amortiguamiento del AMS})$$

$$k_d = \bar{m} \cdot f_{opt}^2 \cdot K \rightarrow k_d = 14081.58 \text{ kg}/\text{seg}^2 \quad (\text{Rigidez del AMS})$$

12.7.3.1.2 Modelación del dispositivo AMS en SAP 2000

Para la introducción del dispositivo en el programa se tomó el edificio base (diseño con cargas verticales) de 20 pisos; al cual se le adicionó en la cota de arriba un piso falso donde se insertó una masa concentrada y se utilizó la opción "Link/Properties". Esta opción permite la adición de dispositivos que alteren las propiedades de la estructura con el objetivo de reducir los desplazamientos relativos causados por cargas dinámicas.

De esta manera se introducen los valores que determinan las propiedades del AMS como lo son el m_d , c_d y k_d .

Al realizar tal operación se observa una reducción notable en las derivas. Para el sismo en zona de amenaza sísmica intermedia se tiene una reducción importante que hace que el edificio cumpla satisfactoriamente con

los requerimientos de deriva consignados en la norma NSR-98. En cuanto al sismo en una zona de amenaza sísmica alta se presenta un similar comportamiento, pero con un control de derivas más aproximado al máximo permisible de 1%, como se muestra en las tablas anteriores de las derivas obtenidas.

13. PRESUPUESTO

13.1 Presupuesto sistema estructural zona de amenaza intermedia.

13.2 Presupuesto sistema estructural zona de amenaza alta.

(Ver Tablas en las siguientes páginas)

MODELO SISTEMA DE PORTICOS Aa=0,15											
GRUPOS	Elemento tipo	Pisos	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor unitario Acero	Valor Total Acero	Valor unitario Concreto	Valor Total Concreto
1	LOSETA										
1.1	Loseta	1 al 20	20		13.5		270			238000	64,260,000
SUBTOTAL							270				64,260,000
2	VIGUETAS										
2.1	Vigueta de entrepiso	1 al 19	342	174.2	0.81	59576.4	277.02	2500	148,941,000	238000	65,930,760
2.2	Vigueta de cubierta	20	18	77.6	0.81	1396.8	14.58	2500	3,492,000	238000	3,470,040
SUBTOTAL							60973.2	291.6	152,433,000		69,400,800
3	VIGAS										
3.1	Viga Carguera Central	1	2	587.2	2.41	1174.48	4.82	2500	2,936,200	238000	1,147,160
		2 al 6	10	728.9	2.41	7289.46	24.1	2500	18,223,650	238000	5,735,800
		7 al 13	14	722.5	2.50	10114.9	35	2500	25,287,250	238000	8,330,000
		14 al 19	12	579.7	2.63	6956.44	31.56	2500	17,391,100	238000	7,511,280
3.2	Viga Carguera Externa	20	2	452.9	2.63	905.72	5.26	2500	2,264,300	238000	1,251,880
		1	2	520.8	2.44	1041.5	4.88	2500	2,603,750	238000	1,161,440
		2 al 6	10	592.5	2.44	5924.5	24.40	2500	14,811,250	238000	5,807,200
		7 al 13	14	598.0	2.57	8371.88	35.98	2500	20,929,700	238000	8,563,240
3.3	Viga Sismica Central	14 al 19	12	450.6	2.72	5406.68	32.64	2500	13,516,700	238000	7,768,320
		20	2	348.8	2.72	697.64	5.44	2500	1,744,100	238000	1,294,720
		1	2	406.1	1.72	812.2	3.44	2500	2,030,500	238000	818,720
		2 al 6	10	568.3	1.72	5682.74	17.20	2500	14,206,850	238000	4,093,600
3.4	Viga Sismica Externa	7 al 13	14	584.7	1.79	8185.62	25.06	2500	20,464,050	238000	5,964,280
		14 al 19	12	349.4	1.88	4192.76	22.56	2500	10,481,900	238000	5,369,280
		20	2	268.0	1.88	536.06	3.76	2500	1,340,150	238000	894,880
		1	2	400.0	1.74	800	3.48	2500	2,000,000	238000	828,240
3.4	Viga Sismica Externa	2 al 6	10	556.6	1.74	5565.66	17.40	2500	13,914,150	238000	4,141,200
		7 al 13	14	561.7	1.83	7863.38	25.62	2500	19,658,450	238000	6,097,560
		14 al 19	12	302.0	1.95	3624.48	23.40	2500	9,061,200	238000	5,569,200
		20	2	261.9	1.95	523.82	3.90	2500	1,309,550	238000	928,200
SUBTOTAL							85669.92	349.90	214,174,800		83,276,200
4	COLUMNAS										
4.1	Columna Esquinera	1 al 20	4	3538.5	15.38	14154.12	61.53	2500	35,385,300	280500	17,259,165
4.2	Columna Perimetral	1 al 20	8	5107.2	24.59	40857.92	196.72	2500	102,144,800	280500	55,178,838
4.3	Columna Central	1 al 20	4	5690.8	29.48	22763.04	117.91	2500	56,907,600	280500	33,073,475
SUBTOTAL							77775.08	376.16	194,437,700		105,511,478
TOTAL COSTO DIRECTO									561,045,500		322,448,478
									TOTAL		883,493,978

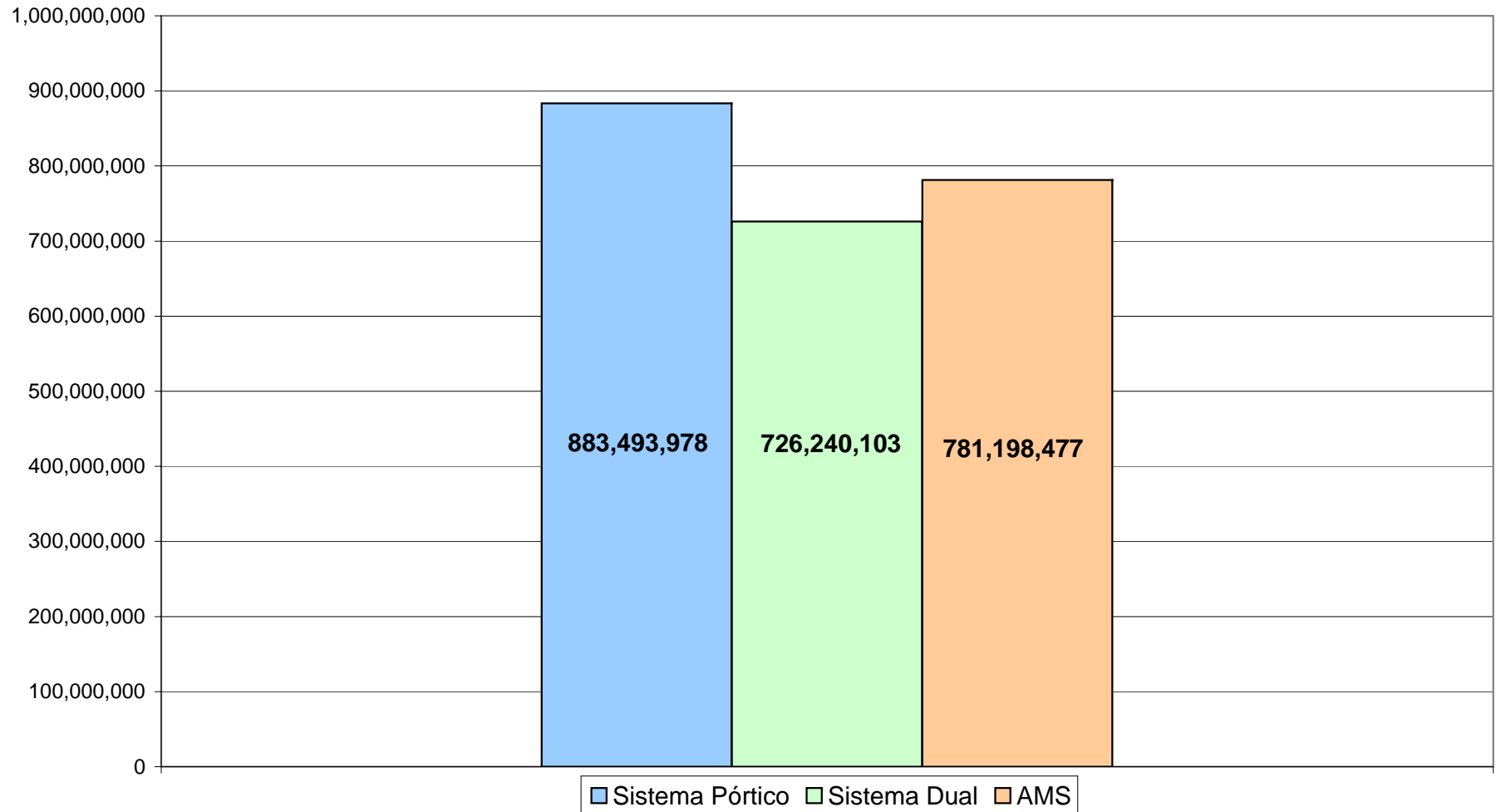
MODELO SISTEMA DE PORTICOS Aa=0,25											
GRUPOS	Elemento tipo	Pisos	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor unitario Acero	Valor Total Acero	Valor unitario Concreto	Valor Total Concreto
1	LOSETA										
1.1	Loseta	1 al 20	20		13.5		270			238000	64,260,000
SUBTOTAL							270				64,260,000
2	VIGUETAS										
2.1	Vigueta de entrepiso	1 al 19	342	174.2	0.81	59576.4	277.02	2500	148,941,000	238000	65,930,760
2.2	Vigueta de cubierta	20	18	77.6	0.81	1396.8	14.58	2500	3,492,000	238000	3,470,040
SUBTOTAL							60973.2	291.6	152,433,000		69,400,800
3	VIGAS										
3.1	Viga Carguera Central	1 al 6	12	699.8	3.59	8397.6	43.07	2500	20,994,000	238000	10,249,470
		7 al 13	14	654.0	3.85	9156.22	53.88	2500	22,890,550	238000	12,823,619
		14 al 20	14	601.4	3.97	8419.6	55.61	2500	21,049,000	238000	13,235,954
3.2	Viga Carguera Externa	1 al 6	12	645.0	3.71	7740	44.55	2500	19,350,000	238000	10,602,900
		7 al 13	14	639.3	3.94	8949.72	55.09	2500	22,374,300	238000	13,112,253
		14 al 20	14	560.5	4.07	7847	57.00	2500	19,617,500	238000	13,565,822
3.3	Viga Sísmica Central	1 al 6	12	667.4	3.59	8008.8	43.07	2500	20,022,000	238000	10,249,470
		7 al 13	14	613.2	3.85	8584.54	53.88	2500	21,461,350	238000	12,823,619
		14 al 20	14	569.1	3.97	7967.4	55.61	2500	19,918,500	238000	13,235,954
3.4	Viga Sísmica Externa	1 al 6	12	633.9	3.71	7606.8	44.55	2500	19,017,000	238000	10,602,900
		7 al 13	14	621.1	3.94	8695.4	55.09	2500	21,738,500	238000	13,112,253
		14 al 20	14	552.2	4.07	7731.22	57.00	2500	19,328,050	238000	13,565,822
SUBTOTAL							99104.3	618.40	247,760,750		147,180,033
4	COLUMNAS										
4.1	Columna Esquinera	1 al 20	4	4909.2	22.45	19636.88	89.82	2500	49,092,200	280500	25,193,248
4.2	Columna Perimetral	1 al 20	8	7749.5	38.49	61995.84	307.94	2500	154,989,600	280500	86,376,609
4.3	Columna Central	1 al 20	4	10435.3	49.46	41741.12	197.85	2500	104,352,800	280500	55,495,663
SUBTOTAL							123373.84	595.60	308,434,600		167,065,520
TOTAL COSTO DIRECTO									708,628,350		447,906,353
										TOTAL	1,156,534,703

MODELO SISTEMA DUAL Aa=0,15											
GRUPOS	Elemento tipo	Pisos	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor unitario Acero	Valor Total Acero	Valor unitario Concreto	Valor Total Concreto
1	LOSETA										
1.1	Loseta	1 al 20	20		13.5		270			238000	64,260,000
	SUBTOTAL						270				64,260,000
2	VIGUETAS										
2.1	Vigueta de entrepiso	1 al 19	342	174.2	0.81	59576.4	277.02	2500	148,941,000	238000	65,930,760
2.2	Vigueta de cubierta	20	18	77.6	0.81	1396.8	14.58	2500	3,492,000	238000	3,470,040
	SUBTOTAL					60973.2	291.6		152,433,000		69,400,800
3	VIGAS										
3.1	Viga Carguera Central	1 al 6	12	533.82	2.55	6405.8	30.618	2500	16,014,500	238000	7,287,084
		7 al 13	14	533.81	2.60	7473.3	36.3825	2500	18,683,250	238000	8,659,035
		14 al 20	14	515.14	2.66	7211.9	37.24	2500	18,029,750	238000	8,863,120
3.2	Viga Carguera Externa	1 al 6	12	419.23	2.76	5030.72	33.08	2500	12,576,800	238000	7,871,850
		7 al 13	14	405.96	2.77	5683.46	38.81	2500	14,208,650	238000	9,236,304
		14 al 20	14	378.22	2.79	5295.02	39.03	2500	13,237,550	238000	9,288,783
3.3	Viga Sísmica Central	1 al 6	12	295.49	1.82	3545.84	21.87	2500	8,864,600	238000	5,205,060
		7 al 13	14	303.89	1.86	4254.44	25.99	2500	10,636,100	238000	6,185,025
		14 al 20	14	304.33	1.90	4260.6	26.62	2500	10,651,500	238000	6,334,965
3.4	Viga Sísmica Externa	1 al 6	12	268.26	1.97	3219.12	23.63	2500	8,047,800	238000	5,622,750
		7 al 13	14	263.96	1.98	3695.46	27.72	2500	9,238,650	238000	6,597,360
		14 al 20	14	250.60	1.99	3508.4	27.88	2500	8,771,000	238000	6,634,845
	SUBTOTAL					59584.06	368.8495		148,960,150		87,786,181
4	COLUMNAS										
4.1	Columna Esquinera	1 al 20	4	2139.2	9.38	8556.8	37.50	2500	21,392,000	280500	10,518,750
4.3	Columna Central	1 al 20	4	5066.6	23.70	20266.44	94.80	2500	50,666,100	238000	22,563,114
	SUBTOTAL					28823.24	132.30		72,058,100		33,081,864
5	MUROS (e=20 cm)										
5.1	Muro estructural 6,0*3,3	1	4	143	3.96	572	15.84	2500	1430000	238000	3,769,920
5.2	Muro estructural 6,0*2,85	2 al 20	76	143	3.42	10868	259.92	2500	27170000	238000	61,860,960
	SUBTOTAL					11440	275.76		28,600,000		65,630,880
	TOTAL COSTO DIRECTO								402,051,250		320,159,725
										TOTAL	722,210,975

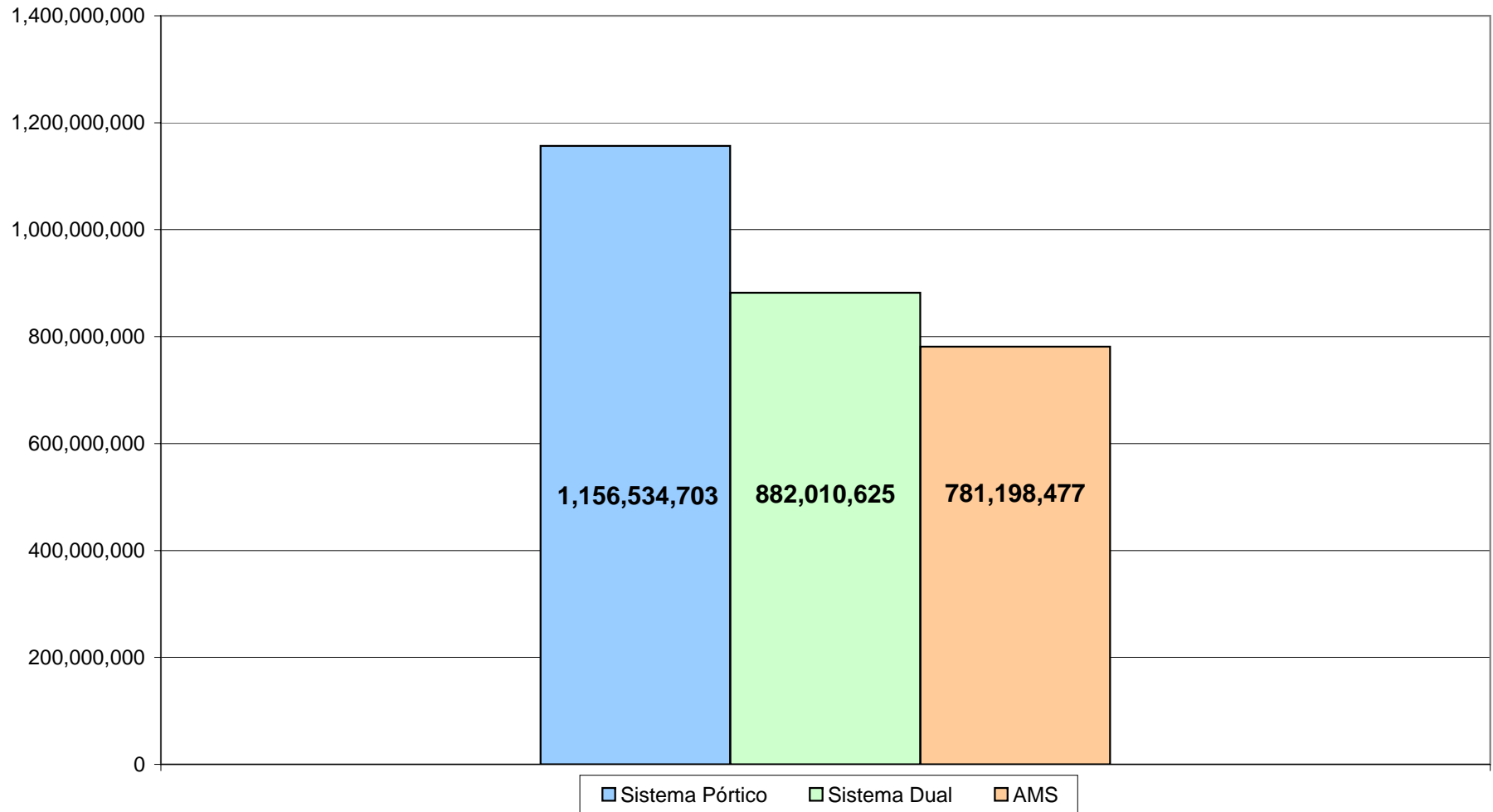
MODELO SISTEMA DUAL Aa=0,25											
GRUPOS	Elemento tipo	Pisos	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor unitario Acero	Valor Total Acero	Valor unitario Concreto	Valor Total Concreto
1	LOSETA										
1.1	Loseta	1 al 20	20		13.5		270			238000	64,260,000
SUBTOTAL							270				64,260,000
2	VIGUETAS										
2.1	Vigueta de entrepiso	1 al 19	342	174.2	0.81	59576.4	277.02	2500	148,941,000	238000	65,930,760
2.2	Vigueta de cubierta	20	18	77.6	0.81	1396.8	14.58	2500	3,492,000	238000	3,470,040
SUBTOTAL							60973.2	291.6	152,433,000		69,400,800
3	VIGAS										
3.1	Viga Carguera Central	1 al 6	12	581.88	3.56	6982.58	42.768	2500	17,456,450	238000	10,178,784
		7 al 13	14	560.19	3.63	7842.6	50.82	2500	19,606,500	238000	12,095,160
		14 al 20	14	546.08	3.73	7645.14	52.227	2500	19,112,850	238000	12,430,026
3.2	Viga Carguera Externa	1 al 6	12	552.29	3.83	6627.52	45.94	2500	16,568,800	238000	10,932,768
		7 al 13	14	500.77	3.86	7010.76	54.05	2500	17,526,900	238000	12,864,852
		14 al 20	14	487.12	3.88	6819.68	54.36	2500	17,049,200	238000	12,938,156
3.3	Viga Sísmica Central	1 al 6	12	499.00	3.56	5988	42.77	2500	14,970,000	238000	10,178,784
		7 al 13	14	521.39	3.63	7299.4	50.82	2500	18,248,500	238000	12,095,160
		14 al 20	14	523.46	3.73	7328.42	52.23	2500	18,321,050	238000	12,430,026
3.4	Viga Sísmica Externa	1 al 6	12	544.64	3.83	6535.68	45.94	2500	16,339,200	238000	10,932,768
		7 al 13	14	484.72	3.86	6786.14	54.05	2500	16,965,350	238000	12,864,852
		14 al 20	14	448.81	3.88	6283.34	54.36	2500	15,708,350	238000	12,938,156
SUBTOTAL							83149.26	600.334	207,873,150		142,879,492
4	COLUMNAS										
4.1	Columna Esquinera	1 al 20	4	3778.1	17.83	15112.4	71.31	2500	37,781,000	238000	16,970,709
4.3	Columna Central	1 al 20	4	5901.4	30.42	23605.76	121.70	2500	59,014,400	238000	28,964,481
SUBTOTAL							38718.16	193.01	96,795,400		45,935,190
5	MUROS (e=20 cm)										
5.1	Muro estructural	1	4	143	3.96	572	15.84	2500	1,430,000	238000	3,769,920
5.2	Muro estructural	2 al 20	76	143	3.42	10868	259.92	2500	27,170,000	238000	61,860,960
SUBTOTAL							11440	275.76	28,600,000		65,630,880
TOTAL COSTO DIRECTO									485,701,550		388,106,362
										TOTAL	873,807,912

MODELO SISTEMA DE CONTROL SÍSMICO (AMS)											
GRUPOS	Elemento tipo	Pisos	Cantidad	Acero unitario	Concreto Unitario	Acero total	Concreto total	Valor unitario Acero	Valor Total Acero	Valor unitario Concreto	Valor Total Concreto
1	LOSETA										
1.1	Loseta	1 al 20	20		13.5		270			238000	64,260,000
SUBTOTAL							270				64,260,000
2	VIGUETAS										
2.1	Vigueta de entrepiso	1 al 19	342	174.2	0.81	59576.4	277.02	2500	148,941,000	238000	65,930,760
2.2	Vigueta de cubierta	20	18	77.6	0.81	1396.8	14.58	2500	3,492,000	238000	3,470,040
SUBTOTAL							60973.2	291.6	152,433,000		69,400,800
3	VIGAS										
3.1	Viga Carguera Central	1	2	639.45	2.41	1278.9	4.82	2500	3,197,250	238000	1,147,160
		2 al 6	10	760.59	2.41	7605.88	24.1	2500	19,014,700	238000	5,735,800
		7 al 13	14	654.70	2.50	9165.84	35	2500	22,914,600	238000	8,330,000
		14 al 19	12	550.39	2.63	6604.7	31.56	2500	16,511,750	238000	7,511,280
		20	2	437.33	2.63	874.66	5.26	2500	2,186,650	238000	1,251,880
3.2	Viga Carguera Externa	1	2	529.31	2.44	1058.62	4.88	2500	2,646,550	238000	1,161,440
		2 al 6	10	583.79	2.44	5837.94	24.40	2500	14,594,850	238000	5,807,200
		7 al 13	14	518.47	2.57	7258.62	35.98	2500	18,146,550	238000	8,563,240
		14 al 19	12	448.13	2.72	5377.6	32.64	2500	13,444,000	238000	7,768,320
		20	2	434.26	2.72	868.52	5.44	2500	2,171,300	238000	1,294,720
3.3	Viga Sísmica Central	1	2	446.40	1.72	892.8	3.44	2500	2,232,000	238000	818,720
		2 al 6	10	585.45	1.72	5854.46	17.20	2500	14,636,150	238000	4,093,600
		7 al 13	14	489.55	1.79	6853.7	25.06	2500	17,134,250	238000	5,964,280
		14 al 19	12	312.60	1.88	3751.14	22.56	2500	9,377,850	238000	5,369,280
		20	2	267.43	1.88	534.86	3.76	2500	1,337,150	238000	894,880
3.4	Viga Sísmica Externa	1	2	437.85	1.74	875.7	3.48	2500	2,189,250	238000	828,240
		2 al 6	10	556.02	1.74	5560.22	17.40	2500	13,900,550	238000	4,141,200
		7 al 13	14	461.88	1.83	6466.32	25.62	2500	16,165,800	238000	6,097,560
		14 al 19	12	286.66	1.95	3439.94	23.40	2500	8,599,850	238000	5,569,200
		20	2	261.91	1.95	523.82	3.90	2500	1,309,550	238000	928,200
SUBTOTAL							80684.24	349.90	201,710,600		83,276,200
4	COLUMNAS										
4.1	Columna Esquinera	1 al 20	4	2262.88	9.38	9051.52	37.50	2500	22,628,800	280500	10,518,750
4.2	Columna Perimetral	1 al 20	8	3292.90	14.85	26343.2	118.77	2500	65,858,000	280500	33,314,985
4.3	Columna Central	1 al 20	4	5120.51	23.70	20482.04	94.80	2500	51,205,100	280500	26,592,242
SUBTOTAL							55876.76	251.07	139,691,900		70,425,977
TOTAL COSTO DIRECTO									493,835,500		287,362,977
										TOTAL	781,198,477

Presupuesto (Zona de amenaza sísmica Intermedia)



Presupuesto (Zona de amenaza sísmica Alta)



RESUMEN DE COSTOS DIRECTOS

MODELOS Aa=0,15			
MODELOS	VALOR ACERO	VALOR CONCRETO	VALOR TOTAL
Sistema de Pórticos	561.045.500	322.448.478	883.493.978
Sistema Dual	402.051.250	324.188.853	726.240.103
Sistema con AMS	493.835.500	287.362.977	781.198.477

MODELOS Aa=0,25			
MODELOS	VALOR ACERO	VALOR CONCRETO	VALOR TOTAL
Sistema de Pórticos	708.628.350	447.906.353	1.156.534.703
Sistema Dual	485.701.550	396.309.075	882.010.625
Sistema con AMS	493.835.500	287.362.977	781.198.477

14. CONCLUSIONES

- En el marco del diseño sismorresistente en Latinoamérica se podría afirmar que se encuentra en una etapa de transición que abarca el paso del uso de sistemas estructurales tradicionales a una amplia gama de alternativas de diseño denominadas “sistemas de control estructural ante acciones sísmicas”. Si bien tales sistemas se erigen como una alternativa atractiva por sus considerables beneficios en cuanto a la seguridad y el confort en las estructuras que los posean; también es de suma importancia darle cabida a la posibilidad de concentrar los esfuerzos en incentivar una verdadera investigación al respecto. Puesto que con ella se tendría la capacidad de diseñar y construir dispositivos acá mismo en los países latinoamericanos. Y de esta manera se obtendría una mayor viabilidad en estos dispositivos desde el punto de vista económico. Viabilidad que sin ninguna duda desembocaría en una masificación a gran escala del uso de tales tecnologías.
- Para el análisis del comportamiento estructural y el dimensionamiento de la estructura las variables que afectan de forma directa los costos de la estructura y la utilización del dispositivo “Amortiguador de masa sintonizado” (AMS) son:

- ✓ grado de importancia en la cual se encuentre presente la edificación.
 - ✓ la configuración en planta y la esbeltez de la estructura.
 - ✓ zona de amenaza sísmica en la cual se ubique la edificación.
 - ✓ porcentaje de masa dado al amortiguador.
- Debido a los considerables requerimientos de secciones que presentan tanto los elementos estructurales como los no estructurales en la edificación se pudo comprobar lo poco viable en cuanto a lo económico, que resultaría diseñar por medio del modelo de sistemas de pórticos en estructuras esbeltas tanto en la zona de amenaza sísmica intermedia como en la zona alta.
- En cuanto al diseño sismorresistente del modelo con el dispositivo AMS adicionado es menester informar que se obtuvieron resultados estupendos. Puesto que el modelo cumplió satisfactoriamente el control de derivas con el sismo en una zona de amenaza sísmica intermedia. Al tiempo que el mismo modelo se ajustó de manera óptima a los requerimientos de derivas en una zona de amenaza sísmica alta.

- El presupuesto realizado al modelo con el dispositivo AMS presenta un resultado parcial, ya que quedo faltando el precio de los amortiguadores. Cabe anotar que se hizo una exhaustiva búsqueda del precio asociado a estos en Internet sin conseguir un resultado satisfactorio. Y quizás esto obedecería al hecho de que los “amortiguadores de masa sintonizados” (AMS) no tienen una estandarización definida y cada amortiguador que se diseña es para acoplarse a unas condiciones únicas de diseño que dependen exclusivamente de las propiedades de la estructura principal (en este caso el edificio). Por lo que se convierte en un sutil inconveniente que no permite hacer una comparación exacta de costos con los demás sistemas. Pero igual se demuestra con la realización de este proyecto la efectividad de estos dispositivos en la reducción de las vibraciones excesivas para edificios con gran altura.

- En lo que corresponde a los modelos diseñados en una zona de amenaza sísmica intermedia, se recomienda el uso del sistema de reforzamiento con muros estructurales (sistema dual), ya que resultó ser menos costoso que el sistema de pórticos y el sistema dotado del amortiguador AMS. En cuanto a la zona de amenaza sísmica alta tanto el sistema dual como el sistema dotado del amortiguador se constituyeron como dos alternativas viables en cuanto a lo económico, al momento de diseñar estructuras en

esta zona de amenaza. Caso contrario con el sistema de pórticos, el cual reportó un incremento considerable en su costo.

- A través del presente estudio sería oportuno y adecuado destacar el compromiso que se adquiere con la comunidad al tener una formación profesional en determinada área. Para el caso específico de la ingeniería civil este compromiso adquiere una notable relevancia que se ve reflejada en el impacto social que genera una obra civil cuando esta es idealizada con el máximo beneficio posible. Por lo que es indispensable elogiar la política actual de la Universidad del Magdalena, la cual va enfatizada en fomentar la investigación como herramienta apropiada para el desarrollo integral de la región.

15. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

[1] Den Hartog, J.P. *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, Inc, New York. (1985)

[2] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A., Chung, R., "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 26, pag. 617-635. (1997)

[3] Soong, T.T., Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons. (1997).

[4] Navid Bin Saleh¹ and Raquib Ahsan, Tuned Mass Damper (TMD): A structural control device for earthquake-threatened structures

[5]Jingning Wu, student member and Genda Chen, member; "Optimal mass distribution of multiple tuned mass dampers, *Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla*.

[6] Daniel Ambrosini, Guadalupe Cuitiño y Jorge Rebeco; "Eficiencia De Amortiguadores de Masa Sintonizados en estructuras sismorresistentes", Universidad Tecnológica Nacional y Universidad Nacional de Cuyo, Argentina (2004).

[7] Ricardo Bassotti y Daniel Ambrosini; "Influencia de amortiguadores de masa sintonizados en la disminución de efectos torsionales de estructuras sismorresistentes", Universidad Tecnológica Nacional y Universidad Nacional

de Cuyo, Argentina (2004).

[8] Rocha José, De la Rosa Graciela; Factibilidad de la aplicación de dispositivos disipadores de energía en el diseño y rehabilitación de edificaciones; 2005

[9] Buckle, I.G., 'Passive Control of Structures for Seismic Loads', Auckland, New Zealand, 2000.

[10] Farzard, N., Kelly, J.M., 'Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice', John Wiley & Sons, USA, 1999.

[11] Kelly, J.M., 'Base Isolation: Origins and Development', National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley, USA.

[12] Soong, T.T., Spencer Jr., B.F., 'Active, Semi-Active and Hybrid Control of Structures', Auckland, New Zealand, 2000.

[13] Spencer Jr., B.F., Sain, M.K., 'Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback', USA, 1997.

[14] Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T., Kohsaka, R. Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation. *Engineering Structures*, 1995, 17(9), 609-621.

[15] Gao, H., Kwok, K.C.S. , Optimization of tuned liquid column dampers, *Engineering Structures*, vol. 19 ,pag. 476-486, 1997.

[16] Chapter4 ???

[17] SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, v.9; Computers and Structures Inc (CSI). (2004).

➤ Sitios web: (páginas de búsqueda consultadas)

✓ www.google.com

✓ www.altavista.com

✓ www.yahoo.com

[18] Aceleros, programa para la obtención de registros sísmicos artificiales
www.dinafacil.com