

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**

“REDUCCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS  
LATERALES EN EDIFICIO CON SISTEMA  
ESTRUCTURAL DE PÓRTICOS DE 15 PISOS,  
INCORPORANDO AMORTIGUADORES DE MASA  
SINTONIZADA-LIMA, 2024”

Tesis para optar al título profesional de:

**Ingeniero Civil**

**Autor:**

Jesus Miguel Ramirez Saldarriaga

**Asesor:**

Mg. Ing. Neicer Campos Vasquez

<https://orcid.org/0000-0003-1508-6575>

Lima - Perú

2024

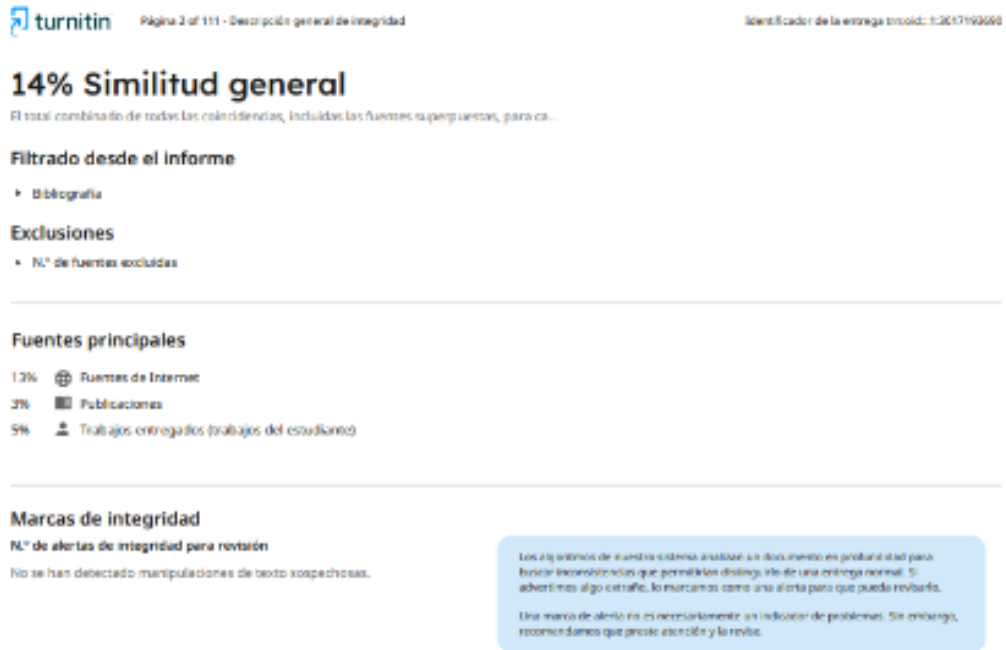
## JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(A)	<b>Jose Luis Neyra Torres</b>
	Nombre Y Apellidos

Jurado 2	<b>Erick Humberto Rabanal Chavez</b>
	Nombre Y Apellidos

Jurado 3	<b>Neicer Campos Vasquez</b>
	Nombre Y Apellidos

## INFORME DE SIMILITUD



turnitin Página 2 of 111 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega tncoid: 13017190690

### 14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

**Filtrado desde el informe**

- Bibliografía

**Exclusiones**

- N.º de fuentes excluidas

---

**Fuentes principales**

- 13% Fuentes de Internet
- 3% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

**Marcas de integridad**

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y lo revise.

## DEDICATORIA

A mis Padres, hermanos y seres queridos,  
cuyo apoyo incondicional ha sido mi  
mayor fortaleza en cada paso de este  
camino. Gracias por enseñarme, a través  
del ejemplo, que en cada adversidad se  
oculta una oportunidad y que aquello que  
alguna vez pareció inalcanzable, con  
esfuerzo, perseverancia y fe, puede  
convertirse en una conquista. Su amor,  
paciencia y sabiduría me han guiado más  
allá de los obstáculos, impulsándome a  
creer que los límites solo existen en la  
mente y que, con determinación,  
cualquier desafío puede ser superado.

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza y la sabiduría necesarias para recorrer este camino académico. A mi querida familia, especialmente a mis padres, quienes han sido mi pilar fundamental, mi inspiración constante y mi fuente de energía inagotable en los momentos más desafiantes. Su amor incondicional y su fe en mí me impulsaron a perseverar y dar lo mejor de mí en cada paso de este proyecto de investigación.

A mis abuelos y hermanos, cuyo apoyo emocional y cercanía iluminaron mi trayecto, les debo gran parte de este logro. Junto a mis padres, me brindaron el aliento y la motivación para seguir adelante en mi vida académica y personal, recordándome siempre la importancia de la humildad, el esfuerzo y la perseverancia.

Asimismo, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis docentes que han contribuido de manera invaluable a mi formación profesional. Su dedicación y compromiso, así como la pasión con la que imparten su conocimiento, han sido la chispa que encendió en mí pasión por la ingeniería civil. Gracias por ser faros de sabiduría y ejemplos a seguir, cuyos consejos y enseñanzas no solo moldearon mi carrera, sino también mi visión del mundo profesional y personal.

**TABLA DE CONTENIDO**

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	50
CAPÍTULO III: RESULTADOS	61
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	96
REFERENCIAS	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factores de zona "Z". Fuente: Norma E.030 .....	23
Tabla 2 Relaciones óptimas de frecuencia y amortiguamiento de AMS para amortiguamientos estructurales. Fuente: Sadek (1996) .....	37
Tabla 3. Método de recolección de datos. ....	53
Tabla 4 Resumen de metrado total. Fuente: Elaboración Propia. ....	55
Tabla 5 Error Porcentual para 1 nivel sin AMS. Fuente: Elaboración Propia. ....	59
Tabla 6 Características y secciones de las columnas de piso 1 - 15. Fuente: Elaboración Propia. ....	64
Tabla 7 Características y secciones de las vigas en el eje X del piso 1 - 15. Fuente: Elaboración Propia. ....	65
Tabla 8 Características y secciones de las vigas en el eje Y del piso 1 - 15. Fuente: Elaboración Propia. ....	66
Tabla 9 Características y secciones de losas del piso 1 - 15. Fuente: Elaboración Propia. ....	67
Tabla 10 Factores de Diseño Sísmico. Fuente: Elaboración Propia. ....	68
Tabla 11 Carga Muerta y Carga Viva de la estructura. Fuente: Elaboración Propia. ....	72
Tabla 12 Tabla de periodos traslacional y rotacional. Fuente: Elaboración Propia. ....	73
Tabla 13 Resumen de parámetros del AMS (2%). Fuente: Elaboración propia. ....	80
Tabla 14 Resumen de parámetros del AMS (3%). Fuente: Elaboración propia. ....	80
Tabla 15 Resumen de parámetros del AMS (5%). Fuente: Elaboración propia. ....	80
Tabla 16 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje X para AMS (2%). Fuente: Elaboración Propia. ....	85
Tabla 17 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje Y para AMS (2%). Fuente: Elaboración Propia. ....	86
Tabla 18 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje X para AMS (3%). Fuente: Elaboración Propia. ....	87
Tabla 19 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje Y para AMS (3%). Fuente: Elaboración Propia. ....	87
Tabla 20 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje X para AMS (5%). Fuente: Elaboración Propia. ....	88

Tabla 21 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje Y para AMS (5%). Fuente: Elaboración Propia. .....	89
Tabla 22 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje X para AMS (2%). Fuente: Elaboración Propia. ....	91
Tabla 23 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje Y para AMS (2%). Fuente: Elaboración Propia. ....	91
Tabla 24 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje X para AMS (3%). Fuente: Elaboración Propia. ....	92
Tabla 25 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje Y para AMS (3%). Fuente: Elaboración Propia. ....	92
Tabla 26 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje X para AMS (5%). Fuente: Elaboración Propia. ....	93
Tabla 27 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje Y para AMS (5%). Fuente: Elaboración Propia. ....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efectos de Amortiguadores de Masa Sintonizada. Extraído de B. Gallegos (2014).....	13
Figura 2 Situación de la vivienda para la base de la pirámide en Lima Metropolitana. Extraído de CtiVPeru .....	13
Figura 3 Terremoto en Ancash 1970 Extraído de UNMSM.....	14
Figura 4 Idealización de estructura simple. Extraído de Dinámica Estructural, por Chopra Anil. ....	26
Figura 5 Sistema mecánico de un grado de libertad con AMS. Extraído de Breschi y Castillo (2015) .....	29
Figura 6 Esquema de estructura con sistema de control activo. Extraído de CCHC (2011).....	29
Figura 7 Esquema de estructura con sistema de control semi-activo. Extraído de CCHC (2011).....	30
Figura 8 Sistema de 1 GDL con AMS. Extraído de Connor Jerome (2003) .....	31
Figura 9 Apoyo Elastomérico con Refuerzo de Acero. Fuente: Herflex Sistemas. ....	38
Figura 10 Deformación por Esfuerzos de Compresión. Fuente: Herflex Sistemas. ....	39
Figura 11 Deformación por Esfuerzos de Corte. Fuente: Herflex Sistemas. ....	39
Figura 12 Deformación por Rotación. Fuente: Herflex Sistemas.....	40
Figura 13 Representación de AMS. Extraído de Aliante (2009).....	41
Figura 14 Planta y elevación de sistema 1 nivel. Fuente: Elaboración Propia.....	54
Figura 15 Desplazamiento Lateral (m). Fuente: Software Etabs v21.0.0. ....	58
Figura 16 Fuerza (tonf). Fuente: Software Etabs v21.0.0. ....	58
Figura 17 Periodo (S). Fuente: Software Etabs v21.0.0. ....	58
Figura 18 Planta y elevación de sistema 1 nivel. Fuente: Software Etabs v21.0.0. ....	58
Figura 19 Vista Isométrica de la estructura aportificada de 15 niveles. Fuente: Software Etabs v21 .....	61
Figura 20 Planta Típica de la estructura idealizada. Fuente: Software Etabs v21 .....	62
Figura 21 Planta Típica – Visualización de columnas. Fuente: Software Etabs v21 .....	63
Figura 22 Planta Típica - Visualización de vigas. Fuente: Software Etabs v21 .....	65
Figura 23 Planta Típica - Visualización de losas. Fuente: Software Etabs v21 .....	67

Figura 24 Propiedades de concreto f'c 210 y 240. Fuente: Software Etabs v21.....	69
Figura 25 Propiedades de concreto f'c 280. Fuente: Software Etabs v21.....	69
Figura 26 Secciones de columnas y vigas. Fuente: Software Etabs v21.....	70
Figura 27 Conjunto de carga para losas de entrepiso y azotea. Fuente: Software Etabs v21.....	71
Figura 28 Vista de planta del bloque de AMS para 2%. Fuente: Elaboración Propia.....	78
Figura 29 Vista de elevación de bloque de AMS para 2%. Fuente: Elaboración Propia.....	79
Figura 30 Definición de bloques de concreto para 2%, 3% y 5%. Fuente: Software Etabs v21. ....	81
Figura 31 Definición de los parámetros de rigidez y amortiguamiento para AMS (2%). Fuente: Software Etabs v21. ....	81
Figura 32 Definición de los parámetros de rigidez y amortiguamiento para AMS (5%). Fuente: Software Etabs v21. ....	82
Figura 33 Definición de los parámetros de rigidez y amortiguamiento para AMS (3%). Fuente: Software Etabs v21. ....	82
Figura 34 Ubicación y máximas derivas en X y Y para AMS (2%). Fuente: Software Etabs v21.....	83
Figura 35 Ubicación y máximas derivas en X y Y para AMS (5%). Fuente: Software Etabs v21.....	84
Figura 36 Ubicación y máximas derivas en X y Y para AMS (3%). Fuente: Software Etabs v21.....	84
Figura 37 Comparativo global de derivas máximas de entrepisos para eje X e Y. Fuente: Elaboración Propia. .....	90
Figura 38 Comparativo global de desplazamientos laterales máximos por nivel para eje X e Y. Fuente: Elaboración Propia.....	95

## RESUMEN

La ciudad de Lima se encuentra entre una de las regiones con actividad sísmica alta con la zonificación 04 según la Norma E-030 “Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones”, por lo tanto, está expuesto a este peligro, que trae consigo pérdidas humanas y materiales. En ese sentido es necesario efectuar estudios que permitan conocer el comportamiento sísmico más probable de este fenómeno en las edificaciones que se tienen proyectadas en la ciudad de Lima.

La presente investigación tiene como finalidad evaluar el comportamiento sísmico de un edificio con sistema estructural mixto de 15 niveles utilizando amortiguadores de masa sintonizada, y plantea evaluar los desplazamientos laterales del edificio y así determinar en cuanto porcentaje reduce. El objetivo principal de esta investigación es el estudio de un edificio con sistema mixto, el cual cuenta con 15 niveles, se realizó el modelamiento mediante el software ETABS v21.0.0 y simulación ante un sismo de acuerdo con los parámetros establecidos por la RNE.

**PALABRAS CLAVES:** Amortiguador de masa sintonizada, Desplazamiento lateral, Comportamiento sísmico, Sismorresistente

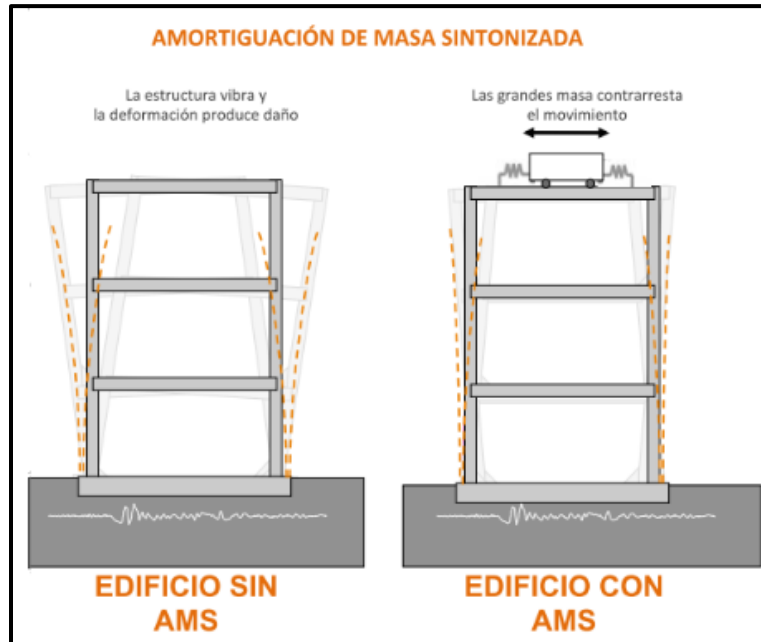
## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### **Realidad Problemática**

En la actualidad, debido al crecimiento exponencial de la población, los países vienen optando por la construcción de más edificios de gran altura para cubrir la demanda de vivienda que esto genera. Esto a su vez trae consigo que las investigaciones respecto al comportamiento de las estructuras sean realizadas de manera más a detalle, para determinar el comportamiento sísmico de la estructura y disminuir en gran medida las deformaciones que presente frente a las cargas que reciben (viento, sismos) para evitar daños estructurales, pérdidas económicas y garantizar la seguridad de los habitantes.

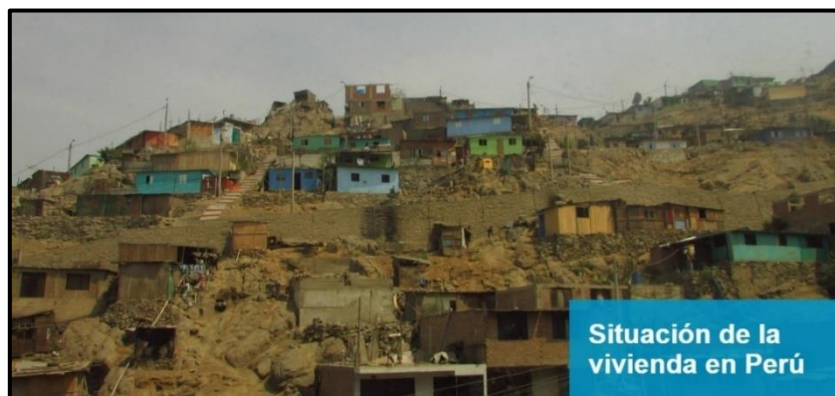
La mayor parte de pérdidas tanto económicas como de vidas humanas ocasionadas por un terremoto, se deber a un comportamiento inadecuado de algunas estructuras al ser sometidas al movimiento del terremoto, ocasionando colapsos parciales e incluso totales. (Aldama, Gómez, & Guillén, 2007).

Los sistemas que se vienen utilizando en los edificios para la disminución de los desplazamientos laterales, son los llamados amortiguadores de masa sintonizados (AMS) estos son una tecnología la cuál fue diseñada para reducir las cargas tanto de viento como de vibraciones sísmicas. Este sistema consiste en la instalación de un dispositivo compuesto por una Masa Sintonizada, suele ser una masa pesada la cual depende de la masa total de la estructura del edificio y la intensidad de los movimientos sísmicos proyectados. Esta se acopla a la estructura del edificio mediante resortes y amortiguadores.



*Figura 1 Efectos de Amortiguadores de Masa Sintonizada. Extraído de B. Gallegos (2014)*

En Lima, el (Centro Terwilliger de Innovación en Vivienda Perú, 2018), da a conocer que las viviendas correrían peligro de derrumbarse o sufrir daños importantes en caso de terremoto o deslizamiento de gran magnitud, ya que los fenómenos naturales son frecuentes en Perú. Se prevé que más de 500.000 viviendas están en peligro en Lima Metropolitana. (INDECI, 2017).



*Figura 2 Situación de la vivienda para la base de la pirámide en Lima Metropolitana. Extraído de CtivPeru*

Debido a su ubicación geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico, Perú presenta un alto índice de actividad sísmica. Los registros sismográficos del Instituto Geofísico del Perú (IGP) han documentado numerosos terremotos a lo largo de la historia, lo que subraya la necesidad de que las viviendas posean una integridad estructural capaz de resistir los desplazamientos generados por cada evento sísmico. (Alhuay & Arco, 2021)

Uno de los sucesos sísmicos más perjudiciales ocurridos en el Perú, fue el 31 de mayo de 1970 en Ancash, se produjo un sismo de magnitud 7.8 mb, en el cual se registraron alrededor de 70 mil viviendas severamente afectadas, teniendo en cuenta que el mayor porcentaje son casas autoconstruidas. Esto además de la cantidad de damnificados debido al mismo. Como se puede observar en la figura 4, las casas destruidas por el sismo. (Álvarez, 2015)



*Figura 3 Terremoto en Ancash 1970 Extraído de UNMSM*

### **Antecedentes**

A continuación, se presentará algunos proyectos de investigación internacional y nacional a la presente investigación.

## **Antecedentes Internacionales**

**“Comparación del comportamiento estructural en edificaciones controladas sísmicamente con un amortiguador de masa sintonizada (tuned mass damper)” (2018)** la cual tuvo como objetivo general, evaluar el comportamiento sísmico de edificios convencionales ubicados en zonas de alta peligrosidad sísmica y de aquellos equipados con dispositivos de amortiguadores de masa sintonizados (TMD), a partir del análisis de los daños sufridos tras un evento sísmico. Para este estudio, se consideraron variables clave como la aceleración del suelo, el desplazamiento del suelo y el índice de daños. Se evaluaron variables como la relación de masas entre el TMD y la estructura, el coeficiente de amortiguamiento del TMD y la proporción de frecuencias entre ambos elementos. Las estructuras fueron también analizadas mediante un estudio de sensibilidad, modificando estos parámetros para observar su impacto en el rendimiento. En este trabajo, se investigó el comportamiento de una estructura de 10 pisos equipada con un TMD, sometida a ocho terremotos, bajo tres niveles de ductilidad diferentes ( $R=3$ ,  $R=5$ ,  $R=7$ ). Los resultados revelan que la capacidad del TMD para mejorar el comportamiento estructural varía en función de las características sísmicas específicas y la configuración de los parámetros evaluados.

**“Control de efectos torsionales en un edificio asimétrico de hormigón armado con amortiguadores de masa sintonizados” (2009)**. En el presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar las formas en que pueden controlarse los efectos torsionales de la asimetría estructural mediante el uso de amortiguadores de masa sintonizada, con el objetivo de controlar la respuesta sísmica de un edificio asimétrico de 15 niveles, estructurado en base a pórticos y muros de hormigón armado. El sistema de amortiguamiento se modela mediante un bloque de hormigón

instalado sobre cuatro aisladores elastoméricos, constituyendo así un amortiguador de masa sintonizada. Este sistema tiene como objetivo mitigar los efectos de torsión y cumplir con la normativa vigente al proporcionar masa, rigidez y amortiguamiento adicionales a la estructura. En conformidad con la norma NCH433 Of.96, que establece un espectro de diseño reducido como criterio de exigencia, se llevará a cabo un análisis modal espectral. Los resultados obtenidos, al comparar la estructura equipada con amortiguadores de masa sintonizada (AMS) frente a la estructura sin AMS, demuestran una mejora significativa en el desempeño estructural.

**“Reducción de aceleraciones en edificios esbeltos sometidos a cargas de viento mediante disipadores y amortiguadores de masa sintonizada” (2022)** la cual tuvo como objetivo general comprender en qué medida la incorporación de disipadores viscosos lineales (LVD) mediante diagonales y/o incorporación de amortiguadores de masa sintonizada (TMD) puede o no garantizar que dichas aceleraciones sean menores que los valores descriptos por el criterio de confort adoptado para tormentas de recurrencia anual. Los incrementos en la relación crítica de amortiguación de los polos del modelo con amortiguación no clásica se estiman empleando un proceso de diseño especializado para amortiguadores de masa sintonizada y amortiguadores viscosos lineales. La optimización del rendimiento estructural se logra mediante la reducción de las aceleraciones máximas, que se consigue mediante la implementación de dispositivos de disipación de energía en la edificación. A partir de los análisis realizados se llega a la conclusión de que mediante la combinación de disipadores viscosos y TMD pueden reducirse los niveles de aceleración inducidas por acción del viento a valores aceptables definidos en normas.

## Antecedentes nacionales

**“Reducción de desplazamientos laterales en edificios con sistema estructural de pórticos de 7 a 10 pisos utilizando amortiguadores de masa sintonizada” (2021)** Ubicada en una región de alta actividad sísmica, la ciudad de Arequipa requiere la implementación de tecnologías sismorresistentes avanzadas para mitigar los efectos adversos de los terremotos, entre los cuales destaca el desplazamiento lateral excesivo, sobre todo en edificios construidos en base a pórticos, para esto tomamos como solución la implementación de Amortiguadores de Masa Sintonizada en las estructuras. El objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento diferencial del sistema de amortiguador de masa sintonizada (AMS) en modelos estructurales tipo pórtico, considerando diversos factores como el periodo natural de la estructura, el número de niveles, la configuración en planta y la relación de masas del AMS respecto a la estructura principal. Se ensayaron en base a aceleraciones producidas por 3 frecuencias: 0.4, 1 y 1.5 ciclos/s con el objetivo de ver el efecto de la resonancia. Se llevó a cabo un análisis tiempo-historia para evaluar el comportamiento dinámico de los pórticos, complementado por un análisis no lineal para el diseño del AMS, asumiendo una metodología uniforme para todos los modelos. Se seleccionaron aquellos modelos que demostraron altos niveles de reducción de desplazamientos y fueron sometidos a las aceleraciones registradas durante el terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001, con el fin de validar la eficacia de los resultados obtenidos. En la investigación se compararon los resultados obtenidos para las dos relaciones de masas utilizadas (5 % y 10 %), siendo la de 10 % la que mejores resultados dio en todos los modelos de ensayo. El análisis con el sismo de Arequipa del 2001 mostró que los resultados son óptimos; para el modelo

P10C3X4T1m0.1 el promedio de reducciones de desplazamiento fue de 55.42% y para el modelo P10C2X3T1m0.1 fue de 62.82% para los lados más críticos.

**“Influencia de la incorporación de amortiguadores de masa sintonizada en una edificación multifamiliar de 15 pisos con 2 sótanos, ubicado en El Tambo - Huancayo” (2024)**

En este estudio se analizó la eficiencia del comportamiento estructural de un edificio de quince pisos y dos sótanos, con muros de concreto armado dispuestos en ambas direcciones, ubicado en la zona de El Tambo, Huancayo. Ahora bien, para mejorar el comportamiento de la estructura se empleó la metodología de Sadek et al. el cual nos da ciertos lineamientos para el diseño de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS); como la sintonización de periodos y frecuencias con las de la estructura, rigideces y amortiguamientos. Además, la comparación del comportamiento estructural con y sin la implementación del AMS demostrará mejoras significativas en desplazamientos laterales, derivas de entrepisos, relaciones de torsión, aceleraciones y fuerzas cortantes en la base. Estos resultados estarán estrechamente vinculados a la ubicación estratégica del AMS en el último nivel de la estructura. Demostrar estos resultados es fundamental para cumplir con el objetivo de asegurar la integridad estructural y garantizar la seguridad ante eventos sísmicos. En definitiva, se concluye que la óptima ubicación de AMS en la estructura influye, en la reducción máxima de los desplazamientos laterales, en un 9.23% en la dirección x-x con excentricidad negativa y 2.09% en dirección y-y excentricidad positiva, reducción en las derivas inelásticas máximas en el entrepiso 03 en 10.08% para la dirección xx y para dirección y-y entrepiso 02 de 6.88% ambos con excentricidades negativas, aceleraciones en 9.94% en x-x y 6.88% en y-y, ratios de torsión en 0.38% en x-x y en la dirección y-y en 3.07%, fuerza cortante

una diferencia máxima de 10.06% en x-x y en y-y de 6.23% excentricidades negativas; y, la reducción en momentos flectores máximos positivos en las vigas, con una reducción de 6%, la reducción en los esfuerzos axiales máximos en columnas de 2.33% en x-x y en y-y, para los muros en 49.24% y 1.57% para sismo x e y respectivamente.

**“Mejoramiento de la respuesta dinámica en un edificio de 26 niveles incorporando amortiguadores de masa sintonizada en Jesús María” (2020)** El objetivo del estudio fue optimizar la capacidad de respuesta dinámica de un edificio de 26 pisos ubicado en Jesús María, mediante la implementación de amortiguadores de masa sintonizada (TMD) como mecanismo principal de disipación de energía y fundamento de la investigación. Se analizó la estructura con y sin amortiguadores de masa sintonizada, con apoyo de la Norma Técnica Peruana E030 Diseño Sismorresistente, mediante un análisis dinámico con el Software ETABS 2018 versión 18.0.2, el cual nos permitió obtener y comparar los resultados para cuantificar la mejora de la estructura en su respuesta dinámica. En este ensayo, se modificó el comportamiento dinámico de la estructura mediante la implementación de un único amortiguador de masa sintonizada (AMS), diseñado para operar en el primer modo de vibración. Los resultados indicaron una reducción de hasta el 1,73% en las fuerzas cortantes, un 4,08% en las fuerzas de torsión, un 3,08% en los desplazamientos y un 6% en la deriva. Además, se determinó que el costo total de instalación del sistema representaba únicamente el 1% del presupuesto base de las estructuras del edificio, lo que resulta insignificante en comparación con la mejora significativa en la respuesta dinámica obtenida. Con esta mejora en el comportamiento dinámico del edificio se demostraron los beneficios del AMS frente a un evento sísmico; con lo cual se reconoce el potencial uso de este sistema de disipación de energía.

**“Respuesta Sismica de una Edificación de 15 Niveles con Amortiguador de Masa Sintonizada en el Distrito Del Tambo-Junin” (2022)** Actualmente la solución para modificar la respuesta dinámica de las estructuras es la aplicación y utilización de mecanismos pasivos disipadores de energía, consideradas desde la etapa de diseño, esta misma que se incorpora a la estructura como consecuencia de los movimientos sísmicos produciendo deformación (desplazamiento lateral). El amortiguador de masa sintonizada (TMD) se clasifica como un mecanismo pasivo de disipación de energía. El objetivo principal de esta investigación es evaluar el impacto de la instalación del TMD en los desplazamientos laterales, las fuerzas cortantes, la aceleración y la velocidad del edificio de 15 niveles denominado «HIBRIDO», ubicado en el distrito de Tambo. Este diseño se realizó con la ubicación optima de un solo AMS en el piso 15 de la edificación, considerado de concreto con un peso de 18.5 tn, modificando así el periodo dinámico a partir del primer modo de vibración. El enfoque metodológico adoptado en la investigación fue cuasiexperimental, con un tipo de investigación aplicada y un nivel explicativo. Los resultados obtenidos fueron positivos: la fuerza cortante se redujo en un 21,19% en el eje X y un 14,12% en el eje Y; la velocidad en el eje crítico X disminuyó un 19,82%; y la aceleración se redujo en un 13,42%. Además, los desplazamientos laterales disminuyeron en un 25,33% en la dirección X y un 22,7% en la dirección Y. Estos resultados confirman que la instalación del AMS tiene un efecto significativo en el comportamiento dinámico del edificio, destacando su eficacia en la mitigación de movimientos sísmicos y diferenciándolo del TMD como sistema de disipación de energía.

## Bases Teóricas

### Filosofía del Diseño Sismorresistente

El diseño sismorresistente tiene como objetivo principal salvaguardar vidas y adicionalmente, reducir los daños materiales durante la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud.

Según el (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, 2020), la filosofía del Diseño Sismorresistente consiste en:

Evitar pérdida de vidas humanas.

Asegurar la continuidad de los servicios básicos.

Minimizar los daños a la propiedad.

De igual manera las edificaciones deben tener ciertos comportamientos frente a sismos de distintas magnitudes como la resistir sismos leves sin daños, resistir sismo moderados considerando la posibilidad de daños estructurales leves y resistir sismos severos con la posibilidad de daños estructurales importantes con una posibilidad remota de ocurrencia del colapso de la estructura. Considerándose como colapso en el caso de que ocurriese el fallar y/o desplomarse parcial o totalmente la edificación con la posibilidad de ocurrencia de muertes de sus habitantes. (Blanco Blasco, 1990)

## **Análisis Sísmico de Edificios**

Es el encargado de evaluar la respuesta estructural de los edificios antes fuerzas sísmicas, determinando así sus fuerzas internas, desplazamientos laterales y posibles daños, esto para garantizar el desempeño y seguridad adecuada durante un movimiento sísmico. Mediante soluciones y cálculos basados en normativas sísmicas y características del suelo.

Es decir que, el análisis de una estructura sismorresistente, en mayor medida que para otras situaciones, se debe hacer para tratar de predecir el comportamiento de la construcción con el diseño estructural propuesto. (Reboredo, 1996)

## **Análisis Estático**

Es el que se encarga de estimar la respuesta estructural de la estructura a fuerzas internas, aplicando cargas laterales equivalentes. Simplificando así el comportamiento dinámico utilizado para evaluar desplazamientos y fuerzas internas, aseguran la estabilidad y resistencia según las normas establecidas.

De igual manera, el (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, 2020), establece ciertos parámetros y coeficientes a considerar para calcular las fuerzas sísmicas equivalente que afectarían la estructura. La asignación de los coeficientes sísmicos como: Z (zonificación), U (uso de la edificación), S (perfil de suelo), R (coeficiente de reducción) y C (factor de amplificación sísmica). Estos son utilizados para poder determinar la Fuerza Cortante en la Base Aplicando la siguiente fórmula:

$$V = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot P$$

Donde:

Z: Factor de zonificación

U: Factor de Uso de la Edificación

C: Factor de Amplificación Sísmica

S: Factor variable de acuerdo con el tipo de suelo

R: coeficiente de reducción dependiendo del sistema estructural

P: Peso de la estructura

Los parámetros para considerar en el análisis estático son los siguientes:

**Zonificación:** El Perú se encuentra dividido sísmicamente en cuatro zonas, esto de acuerdo con las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica. En la siguiente tabla se muestran los factores a considerar para cada una de las cuatro zonas. Dicho valor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido.

*Tabla 1 Factores de zona "Z". Fuente: Norma E.030*

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

**Uso de la edificación:** La Norma E.030 hace mención a cuatro factores de uso o importancia definido como: A-Edificaciones Esenciales 1.5, B-Edificaciones Importantes 1.3, C-

Edificaciones Comunes 1.0, D-Edificaciones Temporales y para edificios con aislamiento sísmico en la base se puede considerar  $U=1$ .

**Amplificación Sísmica:** Este factor se define según las características de según el parámetro de sitio a considerar, y por las siguientes expresiones:

$$T < T_p \rightarrow C = 2.5$$

$$T_p < T < T_L \rightarrow C = 2.5\left(\frac{T_p}{T}\right)$$

$$T > T_L \rightarrow C = 2.5\left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2}\right)$$

Donde:

C: Factor de Amplificación Sísmica

**Perfiles del Suelo:** La Norma E.030 los clasifica en cinco tipos de suelo, los cuales vienen con una orden de importancia dependiendo de la ubicación donde: Condiciones excepcionales (S4), Suelos blandos (S3), Suelos intermedios (S2), Suelos muy rígidos (S1) y Roca dura (S0).

**Coefficiente de Reducción:** La Norma E.030 clasifica los sistemas estructurales según los materiales usados y el sistema de estructuración sismorresistente en cada dirección de análisis. Estos son: **Estructuras de acero** (Pórticos Especiales Resistentes a Momentos de coeficiente 8, Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos de coeficiente 5, Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos de coeficiente 4, Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados de coeficiente 7, Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados de coeficiente 4, Pórticos Excéntricamente Arriostrados de coeficiente 8); **Estructuras de concreto armado** (Pórticos de coeficiente 8, Dual

de coeficiente 7, De muros estructurales de coeficiente 6, Muros de ductilidad limitada de coeficiente 4); **Albañilería Armada o Confinada** de coeficiente 3; **Madera** de coeficiente 7.

### **Análisis dinámico modal espectral**

Esta técnica resulta eficaz para el cálculo de los desplazamientos y fuerzas internas entre los elementos de un sistema estructural. Con las consideraciones adicionales especificadas en los códigos de diseño, se enfoca en calcular los valores máximos de desplazamientos y aceleraciones en cada modo de vibración, utilizando un espectro de diseño que representa la envolvente de los espectros de respuesta generados por diversos sismos. (Salinas Basualdo, 2019)

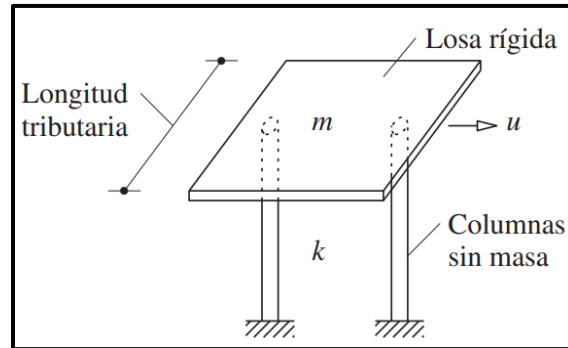
### **Dinámico Estructural**

Ésta tiene como objetivo predecir el comportamiento de la estructura para establecer el grado de seguridad frente al colapso. Esto teniendo en cuenta que el análisis siempre es la verificación de un diseño, que deberá ser corregido hasta poder lograr un comportamiento útil de la estructura. Esto es muy importante para los proyectistas debido a que lo pone en un objetivo para ubicar el problema y esto le permite descubrir las limitaciones de los métodos empleados. (Reboredo, 1996)

### **Características de la dinámica estructural**

Son estructuras simples las cuales son fáciles de idealizar como sistemas de masa concentrados los cuales son soportados por una estructura sin masa. Éstas son sometidas a fuerzas dinámicas aplicadas o a un movimiento del terreno inducido por un sismo. Un ejemplo de ello se muestra en la siguiente figura la cual se representa como una estructura con techo abierto de

concreto pesado ( $m$ ), esta se encuentra soportada por una estructura sin masa representado por columnas ligeras de tubo de acero, con una rigidez ( $k$ ) en la dirección lateral ( $u$ ). (Chopra, 2014)



*Figura 4 Idealización de estructura simple.  
Extraído de Dinámica Estructural, por Chopra  
Anil.*

#### - **Sistemas de un grado de libertad**

Este puede considerarse como una idealización de una estructura de un nivel. La cual tiene un número de movimientos posibles de un sistema estructural. Los grados de libertad se pueden expresar como desplazamientos y rotaciones en un punto nodal. Esto quiere decir que cada grado de libertad permite una rotación y un desplazamiento o una dirección determinada. Estos pueden estar orientados respecto a los ejes globales y locales. (Chopra, 2014)

#### - **Sistemas de varios grados de libertad**

Este puede considerarse como la cantidad de movimientos posibles de un sistema estructural las cuales determinan la posición de la relación de masas con respecto a su ubicación original. Un ejemplo, puede ser una edificación de dos pisos ya que la concentración de masas se da en cada nivel y tendrían desplazamientos laterales  $u_1$  y  $u_2$  dos considerados como grados de libertad. (Chopra, 2014)

### - **Periodo fundamental de una estructura**

Este debe obtenerse a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica, en la dirección que se considere de acuerdo con los principios y parámetros de la dinámica estructural, utilizando así un modelo matemático linealmente estático de la estructura. (Rochel Awad, 2012)

Según la Norma E.030, el periodo fundamental de vibración para cada dirección de la estructura se estima utilizando la siguiente expresión:

$$T = \frac{h_n}{c_T}$$

Donde:

T: Período Fundamental

$h_n$ : Altura total de la edificación

$c_T$ : Coeficiente establecido por la Norma E.030

### **Sistemas de protección sísmica**

Según la Cámara chilena de construcción (CCHC), actualmente los sistemas de protección sísmica de estructuras incluyen diseños relativamente simples hasta avanzado totalmente automatizados, estos se pueden clasificar en tres categorías: sistemas activos, sistemas semi activos y sistemas pasivos. (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

## - **Sistemas pasivos**

Estos sistemas emplean dispositivos bastante simples para reducir la respuesta dinámica por los medios únicamente mecánicos. (Pittí, 2013) Entre los sistemas pasivos más comunes que se utilizan tenemos:

**Aislamiento de base:** el objetivo de los aisladores sísmicos de base es reducir las fuerzas laterales transmitidas por el sismo, mediante la separación de la estructura del edificio con los movimientos laterales del terreno natural. Esto a través de elementos flexibles ubicados entre la estructura y su fundación. Esto logra una disminución considerable de la energía de entrada, debido a que los aisladores reducen notablemente la rigidez lateral de la estructura y así alargando el periodo fundamental de la misma a una zona de menor aceleración espectral. (Gutiérrez Rodríguez, 2016)

**Disipadores de energía:** Estos dispositivos absorben la fuerza del sismo a través de un comportamiento plástico de metales dúctiles, la fricción generada entre las superficies en contacto bajo presión, y la pérdida de energía en fluidos viscosos. Esto evita que la estructura reciba en su totalidad el impacto generado por el sismo generando así una reducción en las deformaciones de la estructura. (Huerta Ramírez, 2017)

**Amortiguadores de Masa Sintonizada:** Es un sistema mecánico el cual se acopla a un sistema vibratorio con la función de minimizar los desplazamientos laterales de este frente a la acción de un sismo. Se puede representar como un sistema de 1° de libertad, en donde la masa “M” representa la masa del sistema cuyas vibraciones se desea reducir. La masa “m” es la del AMS y

es mucho más pequeña en relación con la masa “M”. (Breschi & Castillo, 2015) Como se muestra en la siguiente figura:

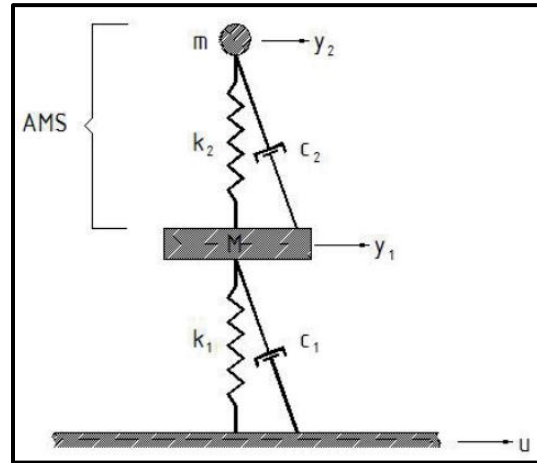


Figura 5 Sistema mecánico de un grado de libertad con AMS. Extraído de Breschi y Castillo (2015)

### - Sistemas activos

Estos sistemas emplean dispositivos que generan fuerzas de control, esto para modificar la respuesta dinámica de la estructura. Estas son aplicadas mediante actuadores integrados a sensores, procesadores y controladores de información en tiempo real. (Pittí, 2013)

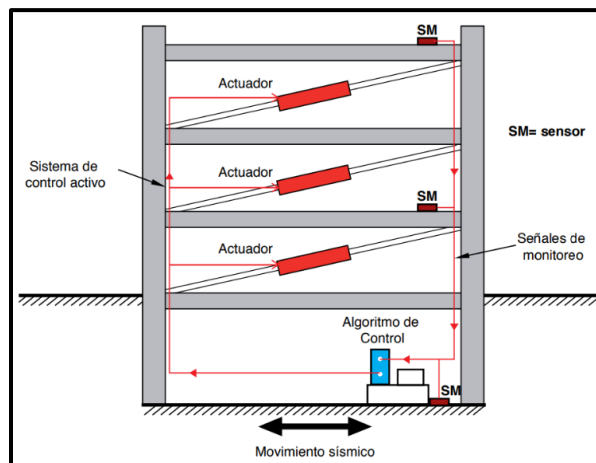


Figura 6 Esquema de estructura con sistema de control activo. Extraído de CCHC (2011)

- **Sistema Semi-Activos:**

Estos sistemas no aplican una fuerza de control a la estructura directamente, pero poseen propiedades variables que pueden reducir la respuesta del sistema estructural. Este es 1 de los sistemas más desarrollados con continuos avances en dispositivos, aplicaciones y especificaciones de diseño. (Pittí, 2013)

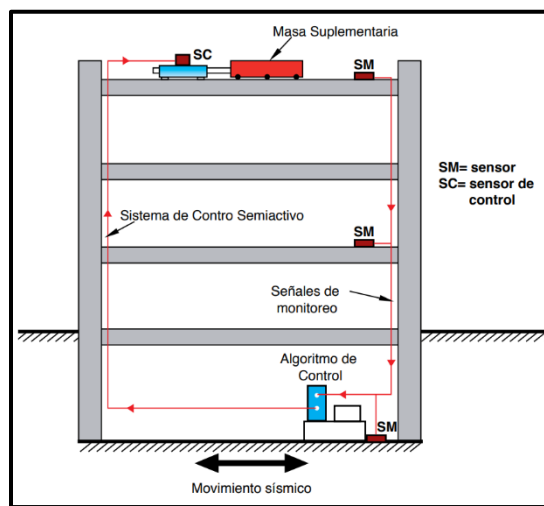


Figura 7 Esquema de estructura con sistema de control semi-activo. Extraído de CCHC (2011)

- **Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS)**

Es un dispositivo que consta de una masa ubicada generalmente en la parte superior de la estructura, esta va fijada a un resorte y un amortiguador. Esta ayuda a disminuir la respuesta dinámica de la estructura sintonizando la frecuencia del amortiguador con la frecuencia estructural particular de modo que cuando esta frecuencia se excita, el amortiguador actuará de manera desfasada con el movimiento estructural. Y así la energía se disipa con la fuerza de la inercia del

amortiguador que actúa sobre la estructura durante las fuerzas externas que este reciba las cuales pueden ser producidas por el viento y/o sismos. (Connor, 2003)

Los AMS representan una alternativa atractiva para proteger las estructuras de gran altura contra perturbaciones dinámicas externas. Estos sistemas son capaces de minimizar en gran medida la respuesta dinámica de una estructura, y a su vez tiene una construcción sencilla. Teniendo en cuenta que, en su forma más simple, un AMS sólo requiere de un ensamblaje de una masa, un resorte y un amortiguador viscoso en un punto determinado de la estructura, sin necesidad de alguna fuente de energía externa. (Christopoulos & Filiatrault, 2006)

En la siguiente imagen se expresa el concepto de amortiguador de masa sintonizada utilizando dos masas. En estas el subíndice “d” representa al amortiguador de masa sintonizado y la estructura se idealiza como un sistema de un solo grado de libertad.

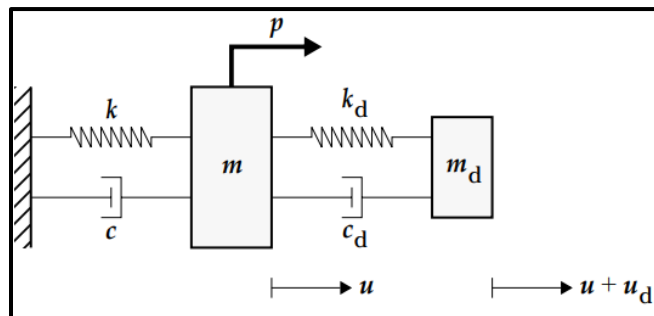


Figura 8 Sistema de 1 GDL con AMS. Extraído de Connor Jerome (2003)

Según (Lago, Trabucco, & Wood, 2019), considerando que las ecuaciones de movimiento están dadas por las siguientes expresiones:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t)$$

Considerando que el sistema de un grado de libertad amortiguado se encuentra en una vibración libre cuando  $f(t) = 0$ . Al dividir dicha ecuación por la masa “m” se tiene la siguiente expresión:

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = 0$$

Donde:

$\zeta$ : Relación de amortiguación

$\omega$ : Frecuencia de vibración angular

$$\zeta = \frac{C}{2m\omega}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Tomando en cuenta las expresiones de frecuencia y periodo natural del sistema tenemos que éstas se definen de la siguiente manera.

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

### **Características de AMS según Sadek Et. Al**

Tras varias investigaciones realizadas que han estudiado los ejemplos de los parámetros óptimos de los AMS, para reducir la respuesta dinámica de las estructuras frente a cargas sísmicas para una determinada relación de masas  $\mu$ . No hay un acuerdo general con respecto a la eficacia

de los AMS en reducir las cargas sísmicas. Se demostró que en el análisis de un edificio de 25 niveles con AMS el cual fue sometido al terremoto de valle imperial de 1940, no fue efectiva la reducción de la respuesta sísmica del edificio al incorporar un AMS. (Sadek, Mohraz, Taylor, & Chung, 1996)

### **Parámetros de diseño de amortiguadores de masa sintonizada**

Los parámetros de diseño del AMS se deben hallar para lograr la máxima eficiencia de este. (Ambrosini, Cuitiño, & Rebeco, 2004) Algunos criterios son:

- Máxima rigidez dinámica de la estructura
- Aceleración mínima de la estructura
- Mínimo recorrido de la masa amortiguada
- Desplazamiento mínimo de la estructura

### **AMS para estructuras de un grado de libertad**

Para una estructura SDOF con un AMS (figura 8), Se utiliza la siguiente expresión en términos de la frecuencia natural y la relación de amortiguación de la estructura, las relaciones de masa, sincronización y amortiguación del AMS. La ecuación se encuentra en pares conjugados complejos:

$$\lambda_{r,r+1} = -\omega_r \xi_r \pm i\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}, r = 1,3$$

Donde  $\lambda_r$ , es el  $r$  valor propio,  $\omega$ , y  $\xi_r$ , es la frecuencia natural y la relación de amortiguación del sistema  $r$  modo, e "i" se representa como un valor imaginario unitario. Esto

demostró que para que un AMS tenga efectividad, las relaciones de amortiguación en los modos complejos de vibración  $\xi_1$  y  $\xi_3$  Deben ser relativamente iguales a las relaciones de amortiguación entre la estructura y el AMS. (Sadek, Mohraz, Taylor, & Chung, 1996)

Para reforzar más este apartado se presentaron las siguientes ecuaciones que definirán los parámetros óptimos de un AMS:

Relación de masas de la estructura y del AMS

$$\mu = \frac{m_d}{m_e}$$

Donde:

$m_d$ : masa del AMS

$m$ : masa de la estructura

Relación de frecuencias de la estructura y del AMS

$$f_r = \frac{\omega_d}{\omega_e}$$

Donde:

$\omega_d$ : Frecuencia del AMS

$\omega_e$ : Frecuencia de la estructura

Relación de amortiguamiento

$$\xi_d = \frac{c_d}{2m_e \cdot \omega_d}$$

Donde:

$c_d$ : Amortiguamiento

### **Estructura de “n” grados de libertad para AMS**

Teniendo en cuenta que los AMS presentan una mejor sintonización cuando solo existe una sola frecuencia estructural. Es más complicado determinar la razón de amortiguamiento para “N” grados de libertad, pero a su vez como es de esperarse, para el caso de este tipo de sistemas, la efectividad es mayor cuando la estructura oscila alrededor de un modo predominante. Pueden ocurrir casos en que los desplazamientos del primer modo de respuesta se reduzcan considerablemente, mientras que los desplazamientos de los modos altos se incrementen cuando el número de pisos aumenta. (Ambrosini, Cuitiño, & Rebeco, 2004)

### **Metodologías de estimación de parámetros para un AMS**

Los parámetros óptimos de los AMS son presentados en forma de ecuaciones y tablas. El método propuesto se consideró para seleccionar los parámetros de AMS para estructuras de 1GDL y nGDL, estas sujetas a una cantidad de excitaciones sísmicas. Los resultados obtenidos con estos parámetros en los distintos ensayos que se realizaron para reducir las respuestas de aceleración y desplazamientos laterales mostraron una efectividad de hasta un 50%. (Sadek, Mohraz, Taylor, & Chung, 1996)

Considerando estructuras 1GDL con incorporación de AMS, se presentarán los parámetros óptimos de diseño en términos de razón de amortiguamiento y frecuencia natural ( $\beta$  y  $\omega_0$ ) de la edificación, frecuencia y razones de masa del AMS ( $\mu$ ,  $f$  y  $\xi$ ), estos son:

$$f = \frac{1}{1 + \mu} \left[ 1 - \beta \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}} \right]$$

$$\xi = \frac{\beta}{1 + \mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}}$$

Donde:

$f$ : Relación de frecuencias

$\mu$ : Relación de masa de la estructura

$\beta$ : Razón de amortiguamiento crítico

$\xi$ : Ratio de amortiguamiento crítico

En la siguiente tabla se muestran los valores óptimos para un amortiguamiento ( $\beta$ ) y relación de masas ( $\mu$ ), donde los dos modos primarios de vibración tienen aproximadamente igual razones de amortiguamiento. Este procedimiento fue utilizado para valores de  $\beta = 0, 0.2$  y  $0.05$ .

*Tabla 2 Relaciones óptimas de frecuencia y amortiguamiento de AMS para amortiguamientos estructurales. Fuente: Sadek (1996)*

Razón de masa $\mu$	$\beta=0$		$\beta=0.02$		$\beta=0.05$	
	$f$	$\xi$	$f$	$\xi$	$f$	$\xi$
0.000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0200	1.0000	0.0500
0.005	0.9950	0.0705	0.9936	0.0904	0.9915	0.1203
0.010	0.9901	0.0995	0.9881	0.1193	0.9852	0.1490
0.015	0.9852	0.1216	0.9828	0.1413	0.9792	0.1708
0.020	0.9804	0.1400	0.9776	0.1596	0.9735	0.1890
0.025	0.9756	0.1562	0.9726	0.1757	0.9680	0.2050
0.030	0.9709	0.1707	0.9676	0.1901	0.9626	0.2192
0.035	0.9662	0.1839	0.9626	0.2032	0.9573	0.2322
0.040	0.9615	0.1961	0.9578	0.2153	0.9521	0.2442
0.045	0.9569	0.2075	0.9530	0.2267	0.9470	0.2554
0.050	0.9524	0.2182	0.9482	0.2373	0.9420	0.2658
0.055	0.9479	0.2283	0.9435	0.2473	0.9370	0.2757
0.060	0.9434	0.2379	0.9389	0.2568	0.9322	0.2851
0.065	0.9390	0.2470	0.9343	0.2658	0.9274	0.2940
0.070	0.9346	0.2558	0.9298	0.2745	0.9226	0.3025
0.075	0.9302	0.2641	0.9253	0.2827	0.9179	0.3106
0.080	0.9259	0.2722	0.9209	0.2907	0.9133	0.3185
0.085	0.9217	0.2799	0.9165	0.2983	0.9088	0.3260
0.090	0.9174	0.2873	0.9122	0.3057	0.9043	0.3332
0.095	0.9132	0.2945	0.9079	0.3128	0.8998	0.3402
0.100	0.9091	0.3015	0.9036	0.3197	0.8954	0.3470
0.105	0.9050	0.3083	0.8994	0.3264	0.8910	0.3535
0.110	0.9009	0.3148	0.8952	0.3328	0.8867	0.3598
0.115	0.8969	0.3212	0.8911	0.3391	0.8825	0.3660
0.120	0.8929	0.3273	0.8870	0.3452	0.8782	0.3720
0.125	0.8889	0.3333	0.8830	0.3511	0.8741	0.3778
0.130	0.8850	0.3392	0.8790	0.3569	0.8699	0.3834
0.135	0.8811	0.3449	0.8750	0.3625	0.8659	0.3889
0.140	0.8772	0.3504	0.8710	0.3680	0.8618	0.3943
0.145	0.8734	0.3559	0.8671	0.3733	0.8578	0.3995
0.150	0.8696	0.3612	0.8633	0.3785	0.8539	0.4046

De igual manera (Warburton, 1982) en su investigación propuso dos ecuaciones para sistemas de 1GDL. Las cuales permiten el diseño del AMS con ecuaciones en términos de frecuencia y amortiguamiento óptimos, esto con el fin de asegurar una respuesta efectiva de la estructura frente a una excitación sísmica.

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu}$$

$$\zeta_{opt} = \frac{\mu \left(1 + \frac{3\mu}{4}\right)}{\sqrt{4(1 + \mu) \left(1 + \frac{\mu}{2}\right)}}$$

### Modelamiento de Amortiguador de Masa Sintonizada

Para realizar el modelado del amortiguador de masa sintonizada, se utilizará un bloque de hormigón armado, el cual estará montado sobre cuatro aisladores elastoméricos con refuerzo de acero, de comportamiento lineal. Este apoyo elastomérico con refuerzo de acero cuenta con capas de acero y elastómero, espaciadas entre sí uniformemente tal cual como se muestra en la siguiente figura, estas soportan esfuerzos de traslación y rotación por deformación del elastómero y es flexible ante esfuerzos de corte, pero de igual manera rígido bajo cambios volumétricos. (Aliante Aravena, 2009)

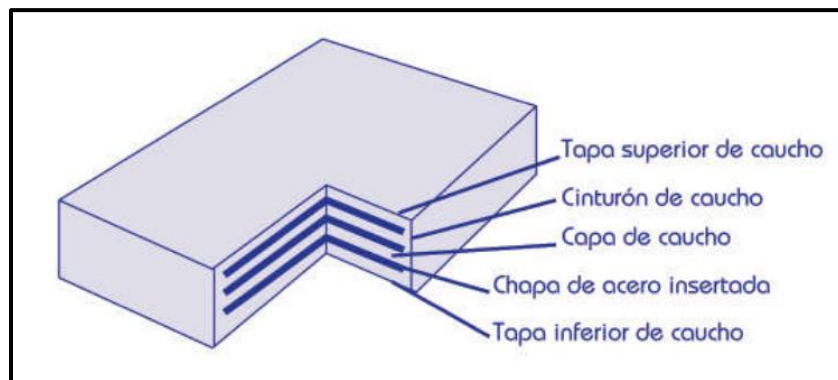
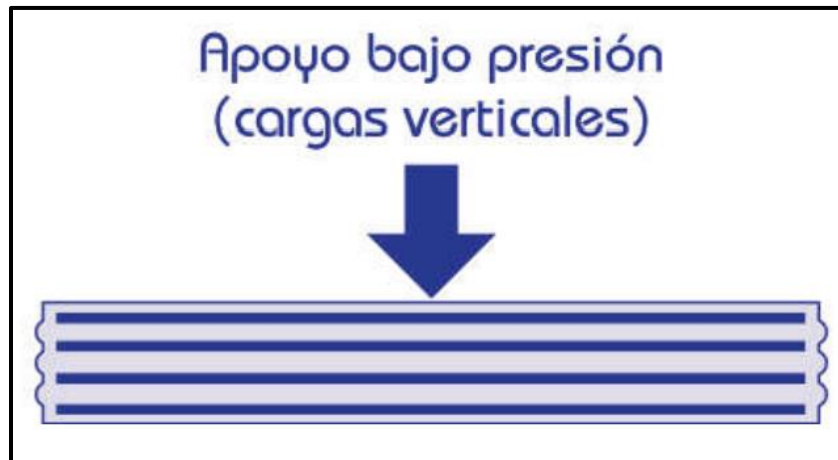


Figura 9 Apoyo Elastomérico con Refuerzo de Acero. Fuente: Herflex Sistemas.

Los apoyos elastoméricos cumplen con la función de soportar tanto la resistencia a la compresión, rigidez, rotación, corte y desplazamientos en compatibilidad entre la estructura y el bloque del AMS.



*Figura 10 Deformación por Esfuerzos de Compresión. Fuente: Herflex Sistemas.*



*Figura 11 Deformación por Esfuerzos de Corte. Fuente: Herflex Sistemas.*

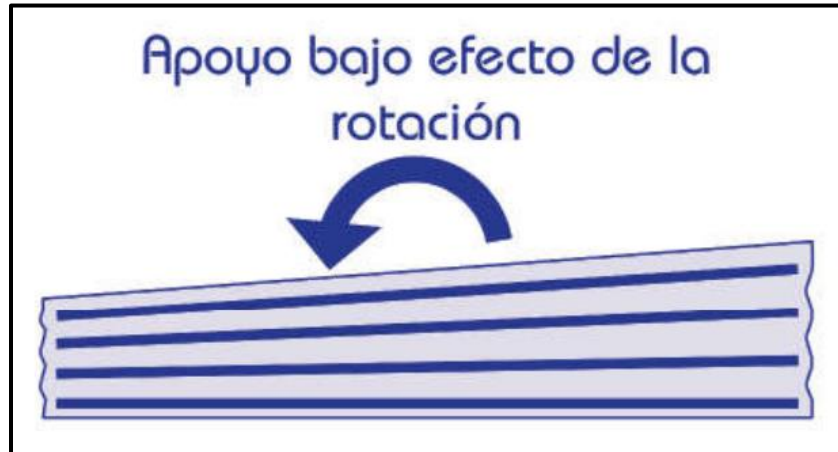


Figura 12 Deformación por Rotación. Fuente: Herflex Sistemas.

Según lo explicado anteriormente, para realizar el diseño de los apoyos elastoméricos nos apoyaremos de las siguientes fórmulas. Así mismo utilizaremos ecuaciones que nos ayudarán a determinar el periodo del AMS, la rigidez y pesos. (Aliante Aravena, 2009)

- **Rigidez del elastómero**

$$K_e = \frac{4\pi^2 x P_t}{T^2 x g}$$

$$P_t = \% \text{ Masa participativa} x P_{AMS}$$

Donde:

$P_t$ : Máxima Carga de compresión

$g$ : Gravedad

$T$ : Máximo periodo fundamental de la estructura

$\% Mp$ : Porcentaje del 1er modo de masa participativa

$P_{AMS}$ : Peso del AMS

Bajo la siguiente expresión se calculará el amortiguamiento efectivo de los aisladores

- **Amortiguamiento**

$$c_a = \frac{2 \cdot \xi \cdot \sqrt{k_a \cdot n \cdot M_{AMS}}}{n}$$

Donde:

$k_a$ : Rigidez de los apoyos

$\xi$ : Factor de amortiguamiento

$n$ : Número de apoyos

$M_{AMS}$ : Masa del AMS

Teniendo las previas consideraciones, el modelo idealizado del AMS se representará de la siguiente manera:

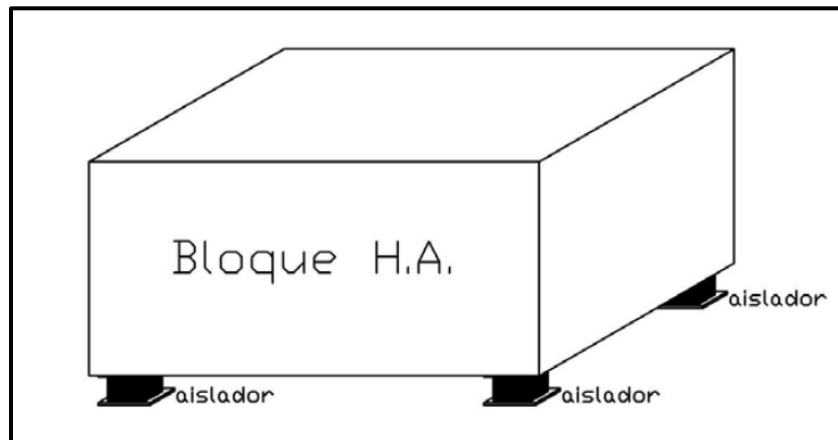


Figura 13 Representación de AMS. Extraído de Aliante (2009)

## Diseño de Elastómero

Debemos tener en consideración que el diseño del apoyo elastomérico requiere un equilibrio entre la flexibilidad necesaria para poder soportar la tracción y rotación y la rigidez suficiente para poder resistir grandes cargas a compresión. Sabiendo esto las especificaciones de diseño de la “Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO LRFD) nos dan un balance óptimo el cual usando un elastómero que se puede considerar flexible con un apropiado factor S y un módulo de corte G. De igual manera se tomará en cuenta lo establecido en el artículo 14.7.5 de Steel-Reinforced Elastomeric Bearings. Tenemos las siguientes expresiones:

### - Grosor de las láminas de elastomérico

Tanto los espesores superiores como inferiores no deben exceder el 70% del espesor de las capas interiores. Las capas elastómeras alternas y las láminas de refuerzo con acero están presentes en los soportes elastoméricos reforzados con acero. También es posible agregar láminas de acero externas en la parte superior e inferior, las cuales realizan el propósito de anclaje que se logra mediante la unión del anclaje con pernos.

### - Forma del soporte elastomérico

$$s_a = \frac{D}{4h_r} \geq 10$$

Donde:

$s_a$ : Factor de forma

$D$ : Diámetro de elastómero

$h_r$ : Altura de lámina elastomérica

### - **Propiedades de Deformación**

El grado de deformación a considerar para cada soporte debe considerarse dentro de los rangos sugeridos en los parámetros de las especificaciones de AASHTO LRFD, detallan la magnitud de deformación debe estar entre los valores de 56.08 – 127.46 tonf/m<sup>2</sup>.

### - **Esfuerzo de compresión**

En condiciones de límite de servicio, cualquier lámina de elastómero tiene el siguiente esfuerzo de compresión promedio:

$$\sigma_s \geq 1120 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

Donde:

$\sigma_s$ : Esfuerzo promedio de servicio de compresión

### - **Corte y altura total**

En condiciones de límite de servicio, la deformación máxima por corte en el soporte no debe superar la deformación máxima correspondiente al desplazamiento lateral del nivel superior.

$$h_{rt} \geq 2x\Delta_s$$

Donde:

$h_{rt}$ : Altura total de láminas elastoméricas

$\Delta_s$ : Máximo desplazamiento lateral

### - **Compresión y rotación combinada**

Cuando el soporte se somete a condiciones de limitantes de servicio, se realiza un análisis que combina la compresión y la rotación. Estos están diseñados para evitar la rotación en respuesta a cargas.

$$\sigma_s \geq 0.75 \cdot G_a \cdot s_a \cdot \left(\frac{\theta_{max}}{n}\right) \left(\frac{D}{h_r}\right)^2$$

Donde:

$\theta_{max}$ : Máxima rotación de carga en radianes

$h_r$ : Altura de lámina elastomérica

$n$ : Número de láminas interiores

$D$ : Diámetro de elastomérico

$G_a$ : Módulo de corte del elastómero

$s_a$ : Factor de forma de espesor de lámina mayor

### - **Fatiga por deformación en compresión y corte combinados**

Los soportes circulares sin restricciones para la deformación por corte deben satisfacer los requisitos de fatiga debidos a la compresión y el corte combinados.

$$\sigma_s \leq 1.66 \cdot G_a \cdot S_a$$

- **Desplazamientos debido a movimiento lateral, rotación combinada y compresión.**

Se examina esta característica en condiciones de servicio. Considerando las rotaciones correspondientes, los soportes se han diseñado para que no haya elevación en respuesta a ninguna combinación de carga.

$$\sigma_s \geq 2.50 \cdot G_a \cdot s_a \cdot \left( 1 - 0.15 \left( \frac{\theta_{max}}{n} \right) \left( \frac{D}{h_r} \right)^2 \right)$$

Donde:

$\theta_{max}$ : Máxima rotación de carga en radianes

$h_r$ : Altura de lámina elastomérica

$n$ : Número de láminas interiores

$D$ : Diámetro de elastomérico

$G_a$ : Módulo de corte del elastómero

$s_a$ : Factor de forma de espesor de lámina mayor

- **Estabilidad ante vuelco**

Las limitantes de solicitudes de servicio también evalúan este valor. Los soportes deben cumplir con los requisitos de estabilidad ante el vuelco cuando se limitan sus desplazamientos laterales.

$$A = \left( \frac{1.92 \left( \frac{h_{rt}}{0.8 * D} \right)}{\sqrt{3}} \right)$$

$$B = \left( \frac{2.67}{(S_a + 2) \left(\frac{5}{4}\right)} \right)$$

$$\therefore \sigma_s \leq \frac{G_a * S_a}{A - B}$$

Siempre que se cumpla ( $A - B = 0$ ) no dependerá de  $G_s$ , el apoyo será estable.

#### - **Mínimo grosor de la lámina de acero por compresión**

Debido a su unión con las láminas de elastómero, el acero de refuerzo produce tensiones que limitan su expansión. El grosor mínimo de la lámina de acero  $h_s$ , que debe cumplir con ciertas condiciones, está relacionado con el cumplimiento de las tensiones.

$$h_s \geq \frac{3h_{rmax} \cdot \sigma_s}{F_y}$$

Donde:

$F_y$ : Esfuerzo de influencia de láminas de acero

$h_{rmax}$ : Máxima altura de una lámina elastomérica

$G_a$ : Módulo de corte del elastómero

$\sigma_s$ : Esfuerzo promedio de servicio de compresión

## **Formulación del problema**

### **Problema general**

¿En cuánto porcentaje reducen los desplazamientos laterales de un edificio aporticado incorporando amortiguadores de masa sintonizada en la ciudad de Lima?

### **Problemas Específicos**

¿Cuáles son los parámetros óptimos de los amortiguadores de masa sintonizada para un edificio aporticado ubicado en la ciudad de Lima?

¿Cuál es la respuesta dinámica de un edificio aporticado ubicado en la ciudad de Lima, con y sin el uso de amortiguadores de masa sintonizada?

### **Justificación**

A consecuencia del gran silencio sísmico que se está viviendo en el país, y teniendo en consideración que se encuentra ubicado en una zona de alta actividad sísmica, urge la necesidad de dar soluciones estructurales avanzadas para atenuar los daños estructurales de las edificaciones y reducir los desplazamientos laterales. Hoy en día en nuestro país, no es muy conocido el uso de los Amortiguadores de Masa Sintonizados, debido a la poca investigación sobre el tema. Por lo que el beneficio principal en esta investigación es ampliar el conocimiento sobre los AMS y estudiar la eficacia que tienen para mejorar el comportamiento estructural de las edificaciones y contrarrestar las vibraciones sísmicas frente a eventos telúricos. Esto se puede justificar al observar un crecimiento en la necesidad de construir edificios cada día más altos para cubrir la gran demanda nacional de vivienda debido al crecimiento exponencial de la población.

Desde un punto de vista teórico, la presente tesis busca aplicar los conocimientos adquiridos en el área de estructuras para la incorporación de los amortiguadores de masa sintonizada para ser utilizado en edificios de gran altura. Así mismo, el objetivo también es promover el uso de los AMS como una opción de solución en periodo de diseño para las nuevas edificaciones y mejorar la respuesta la ya existente en el país.

De igual manera mejora la seguridad de los habitantes de las edificaciones y la comodidad de estos.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Reducir los desplazamientos laterales de un edificio aporticado incorporando amortiguadores de masa sintonizada en la ciudad de Lima.

### **Objetivos Específicos**

Determinar los parámetros óptimos de los amortiguadores de masa sintonizada para un edificio aporticado ubicado en la ciudad de Lima.

Comparar las respuestas dinámicas de un edificio aporticado ubicado en la ciudad de Lima, con y sin el uso de los amortiguadores de masa sintonizada.

## **Hipótesis**

Se asume que las reducciones de los desplazamientos laterales del edificio aporticado mejorarán en un 20%.

## **Hipótesis específicas**

Los parámetros de diseño de los amortiguadores de masa sintonizada cumplen y son óptimos para un edificio aporticado ubicado en la ciudad de Lima.

Se tendrá una mejor respuesta dinámica del edificio aporticado con el uso de amortiguadores de masa sintonizada.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

### Tipo de investigación

Según (Borja Suárez, 2016) para determinar el tipo de investigación es necesario conocer las características que posee y cual se adapta mejor a la investigación que se desea realizar. En ese sentido se explica que en una investigación aplicada se busca actuar, conocer construir y modificar una realidad problemática. De igual manera ésta busca una posible utilidad práctica.

El presente estudio, se realizó mediante el tipo de investigación aplicada ya que se midió las mejoras en la respuesta dinámica de un edificio de 15 niveles, utilizando la incorporación de un amortiguador de masa sintonizada, mediante el análisis dinámico en el Software ETABS v21.0.0 para asemejarlo a condiciones reales.

(Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014), nos explica que el enfoque de una investigación cuantitativa es representar un conjunto de procesos los cuales son secuenciales y probatorios. Esta parte de una idea que una vez delimitada, proceden objetivos y preguntas de investigación, las cuales de estas se establecen hipótesis que determinan variables en un determinado contexto.

La presente investigación es de tipo cuantitativo, esto porque se desarrollarán cálculos para el análisis de la respuesta dinámica del edificio, esto con y sin el uso de amortiguadores de masa sintonizada, obteniendo resultados para contrastar las hipótesis planteadas. Así mismo el enfoque del estudio también será cuantitativo, ya que; los datos serán medibles de manera numérica, y el

análisis dinámico del edificio multifamiliar para determinar las variaciones de los desplazamientos laterales con y sin amortiguadores de masa sintonizada.

Para el apartado de recolección de datos, el presente estudio consideró este de tipo retrolectivo, este recaba a partir de fuentes de bases de datos confiables, ya que; se hizo la recopilación de fuentes de investigación confiables como antecedentes de comparativos donde nos brindan una tendencia en el comportamiento de las estructuras contemplando la incorporación de los amortiguadores de masa sintonizada.

El nivel de este estudio es aplicativo; puesto que propone una alternativa de solución frente al comportamiento estructural de las edificaciones haciendo uso de los amortiguadores de masa sintonizada para la reducción de los desplazamientos laterales ante un sismo de magnitud relevante. De igual manera el diseño que considera la investigación es de tipo no experimental, descriptivo

La investigación se realiza mediante el análisis dinámico en el Software ETABS v21.0.0 para asemejarlo a condiciones reales, esto nos ayudará a comparar el comportamiento de la estructura mediante el uso de amortiguadores de masa sintonizada asumiendo así disminución de los desplazamientos lateral frente a sismo de gran magnitud.

## **Población y muestra**

### **Población**

Según (Arias Gómez, Villasís Keever, & Miranda Novales, 2016), también conocida como universo de estudio, la población de investigación, según el término, no se limita exclusivamente

a seres humanos, sino que abarca un amplio conjunto de entidades. Se define como un conjunto determinado o no determinado de casos, definidos y accesibles que sirven de referencia para la selección de la muestra, cumpliendo con criterios previamente establecidos. En esta investigación, la población se identificó como los edificios aporricados de la Ciudad de Lima, clasificada como no determinada, dado que los elementos que la constituyen no tienen un límite definido, lo que impide cuantificar su magnitud de manera precisa.

### **Muestra**

Según (López, 2004), la muestra se define como un subconjunto del universo o población de estudio. Para determinar el tamaño adecuado de la muestra, se pueden emplear diversos procedimientos, incluyendo el uso de fórmulas y la aplicación de lógica. En términos generales, la muestra es una representación de la población. Debido a las características de esta investigación, se optó por una muestra no probabilística, seleccionada mediante el método de conveniencia, lo que permite un análisis más adecuado en función de los objetivos previamente establecidos.

### **Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

Según (Hernandez Mendoza & Duana Avila, 2020), las técnicas de recolección de datos comprenden un conjunto de actividades y procedimientos que permiten al investigador obtener la información esencial para alcanzar los objetivos de la investigación y responder a la pregunta planteada. Los instrumentos de recolección, por su parte, están diseñados para establecer las condiciones necesarias para una medición precisa y confiable. Los datos recopilados representan conceptos que reflejan una interpretación estructurada de la realidad estudiada. En esta

investigación, se presenta una tabla de recolección de datos que detalla las variables, técnicas, fuentes e instrumentos empleados para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

*Tabla 3. Método de recolección de datos.*

Variables	Recolección de datos		
	Fuente	Técnica	Instrumento
<b>Edificio aporticado con AMS</b>	Estructura aportificada de 15 pisos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelamiento</li> <li>• Idealización virtual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software ETABS v21.0.0</li> <li>• Norma Técnica Sismorresistente E.030</li> <li>• Norma Técnica de Cargas E.020</li> </ul>
<b>Edificio aporticado sin AMS</b>	Estructura aportificada de 15 pisos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelamiento</li> <li>• Idealización virtual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software ETABS v21.0.0</li> <li>• Norma Técnica Sismorresistente E.030</li> <li>• Norma Técnica de Cargas E.020</li> </ul>

### **Criterios de validez y confiabilidad de instrumentos**

Para la presente investigación se emplearon instrumentos confiables, debido a que estos se fijan a las normas actuales que establece el Reglamento Nacional de Edificaciones. Respectivamente

el software Etabs v21. es utilizado mundialmente para llevar a cabo el modelamientos y análisis sísmicos de distintas estructuras, esto gracias a su fiabilidad en la capacidad y versatilidad de análisis y cálculo en diseños de edificios. Es importante mencionar que, Etabs es un software desarrollado por Computers and Structures, la cual es una empresa reconocida mundialmente por ser innovadora en el desarrollo de estos softwares.

### Procedimiento Validación de Software Etabs

Para poder determinar la fiabilidad del software Etabs v21. Los cálculos y metodología que muestran a continuación son los cálculos manuales aplicando el método de Wilbur, para un sistema de 1 nivel sin AMS.

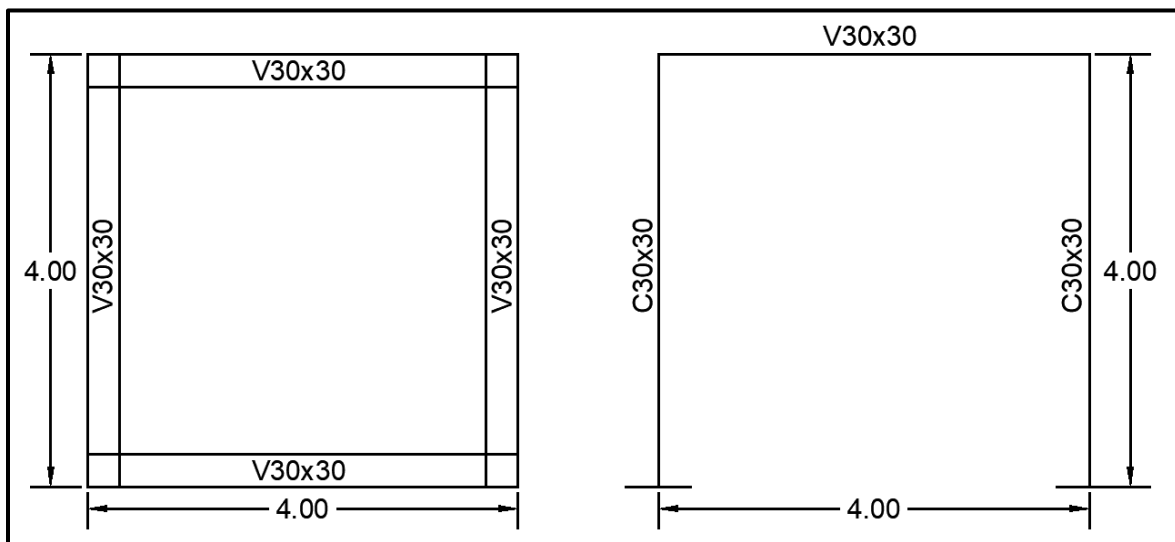


Figura 14 Planta y elevación de sistema 1 nivel. Fuente: Elaboración Propia

## Cálculo Manual

### Datos Preliminares:

Planta: 4m x 4m, Altura (h): 4m, Columnas: 30x30 cm, Vigas: 30x30 cm, Losa maciza: 20 cm de espesor,  $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ , Concreto = 2.4 tonf/m<sup>3</sup>, Z = 0.35, U = 1, S = 1, C = 2.5 y R = 8.

$$\text{Módulo de Elasticidad (E)} = 15100x\sqrt{f'c} = 15100x\sqrt{210} \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 2188197.889 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

### Metrado de cargas

Tabla 4 Resumen de metrado total. Fuente: Elaboración Propia.

NIVEL	VIGAS (tonf)	COLUMNAS (tonf)	LOSAS (tonf)	S/C (tonf)	CM (tonf)	CV (tonf)	Ps (tonf)
1	2.9376	1.728	7.68	3.2	12.3456	3.2	13.1456

### Masa

$$m = \frac{13.1456 \text{ tonf}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1.34 \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

### Rigidez Lateral

Para poder determinar la rigidez lateral de la estructura, se utilizará la metodología de Wilbur, debido a su simplicidad y simetría.

Rigidez Lateral para Eje X:

$$\text{Inercia Columna (Ic)} = \frac{0.30x0.30^3}{12} = 0.000675$$

$$\text{Inercia Viga (Iv)} = \frac{0.30x0.30^3}{12} = 0.000675$$

$$\text{Longitud Columna } (L_c) = 4$$

$$\text{Longitud Viga } (L_v) = 4$$

$$K_{c1} = \frac{I_c}{L_c} = \frac{0.000675}{4} \times 4 = 0.000675$$

$$K_{v1} = \frac{I_c}{L_v} = \frac{0.000675}{4} \times 4 = 0.000675$$

$$K_{L1} = \frac{48E}{h_1 \left( \frac{4h_1}{\sum K_{c1}} + \frac{h_1 + h_2}{\sum K_{v1} + \sum \frac{k_{c1}}{12}} \right)}$$

$$K_{L1} = \frac{48(2188197.889 \frac{tonf}{m^2})}{4 \left( \frac{4 \times 4m}{0.000675} + \frac{4m + 0}{0.000675 + \frac{0.000675}{12}} \right)} = 900.0674 \frac{tonf}{m}$$

### Frecuencia y Periodo

$$\text{Frecuencia Angular } (\omega n^2) = \frac{K_{TOTAL}}{masa}$$

$$\omega_n = 25.9168 \text{ rad/s}$$

$$\text{Periodo } (T) = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

$$T = 0.2424 \text{ seg.}$$

$$\text{Frecuencia } (f) = \frac{1}{T}$$

$$f = 4.12479 \text{ rad/s}$$

### Fuerza y Desplazamiento

$$s_a \cdot g = \frac{Z \cdot U \cdot S \cdot C}{R} \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$s_a \cdot g = \frac{0.45 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.5}{8} \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 1.3795$$

$$F = m \times s_a \cdot g$$

$$F = 1.34 \times 1.3795 = 1.8486 \text{ tonf}$$

$$\Delta = \frac{F}{K_{TOTAL}}$$

$$\Delta = 0.002054 \text{ m}$$

### Cálculo en software Etabs v21

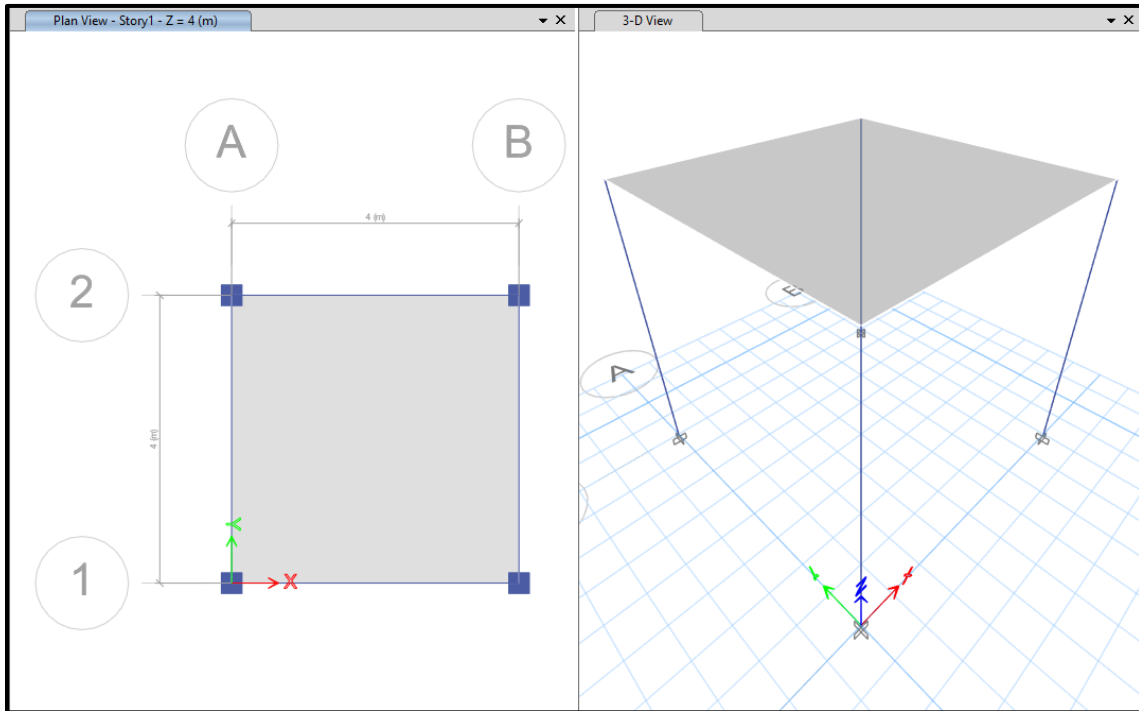


Figura 18 Planta y elevación de sistema 1 nivel. Fuente: Software Etabs v21.0.0.

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
Modal	1	0.248	4.029	25.315	640.8468

Figura 17 Periodo (S). Fuente: Software Etabs v21.0.0.

Story	Output Case	Case Type	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf	T tonf-m	MX tonf-m	MY tonf-m
Story1	SESTX	LinStatic	Top	0	-1.8847	0	3.7694	0	0

Figura 16 Fuerza (tonf). Fuente: Software Etabs v21.0.0.

Story	Diaphragm	Output Case	Case Type	UX m	UY m	RZ rad	Point	X m	Y m
Story1	D1	SESTX	LinStatic	0.002152	0	0	5	2	2

Figura 15 Desplazamiento Lateral (m). Fuente: Software Etabs v21.0.0.

Según la información previamente presentada se procedió a evaluar el error porcentual de ambos métodos.

*Tabla 5 Error Porcentual para 1 nivel sin AMS. Fuente: Elaboración Propia.*

Error porcentual			
Ítem	Manual	Etabs	$\Delta$ Error %
Periodo (S)	0.24244	0.24800	2.24%
Fuerza (Tonf)	1.84860	1.88470	1.92%
Desplazamiento (m)	0.00205	0.00215	4.56%

### Procedimiento

- Dado que la ciudad de Lima está ubicada en una zona de alta actividad sísmica pero también en una zona sísmicamente tranquila, fue necesario analizar el comportamiento dinámico del edificio con y sin amortiguadores de masa sintonizada (AMS). Comparar y analizar la respuesta sísmica.
- Para llevar a cabo esta investigación, se realizó el dimensionamiento de los elementos estructurales de la edificación, así como la determinación de su disposición espacial, integrando además un sistema antisísmico basado en amortiguadores de masa sintonizada (AMS).
- En la elaboración de esta tesis se tuvieron en cuenta las normas técnicas del Reglamento Nacional de Edificaciones E.030. Los parámetros tomados en cuenta incluyen la zonificación, el tipo de suelo, el factor de suelo, los periodos  $T_p$  y  $T_l$ , el factor  $U$ , el cálculo del factor  $R$ , y el cálculo de  $ZUCS/R$ , para poder desarrollar el espectro de sismo que simula un sismo real dentro de las dos edificaciones que se van a idealizar virtualmente.

- Para la idealización del modelo con y sin AMS, se diseñó un edificio de 15 niveles con una configuración de planta de matriz 3x4 para poder colocar todas las especificaciones técnicas en el software ETABS v21.0.0.
- Dentro de las especificaciones técnicas, se consideraron los materiales a utilizar, la distribución de alturas y ejes, las especificaciones para los elementos estructurales tanto para vigas, columnas y losas, y también las cargas a colocar dentro de la edificación tomadas de la norma técnica E.020.
- Una vez obtenidos todos los resultados de la idealización, se hizo la comparación de la estructura con y sin amortiguadores de masa sintonizada (AMS) para la comprobación de la hipótesis formulada, obteniendo así una discusión de resultados y conclusiones.

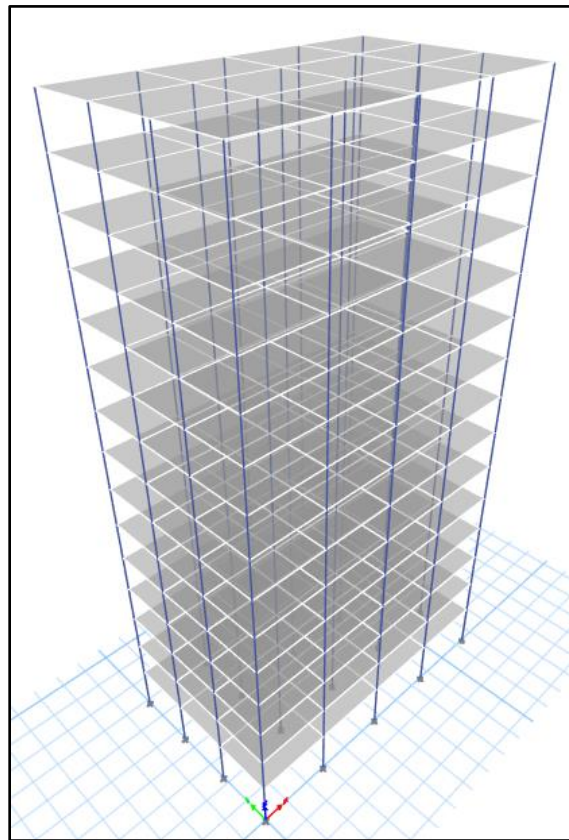
## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### Análisis de resultados

#### Características de la edificación

##### Datos generales

La estructura idealizada a considerar para la presente investigación comprende únicamente de 15 niveles, teniendo así una altura total de 39.60 metros con alturas regular de entrepisos de 2.6 metros. Además, el área total de terreno es de 240 m<sup>2</sup>, no se está considerando la junta de dilatación en cada colindancia.



*Figura 19 Vista Isométrica de la estructura aporticada de 15 niveles. Fuente: Software Etabs v21*

### Parámetros estructurales

De acuerdo con el dimensionamiento estructural realizado, la estructura presenta un sistema aporricado de concreto armado esta cuenta con pórticos en ambas direcciones (X e Y). Dichos pórticos consideran vigas peraltadas con sección de 35x50 y 35x40 en las direcciones X e Y respectivamente, con una resistencia a la compresión de  $f'c= 210 \text{ kgf/cm}^2$ , columnas de secciones de 45x45 y 35x100 considerando un factor de  $f'c= 280 \text{ kgf/cm}^2$  para todos los niveles. Por último, losas a utilizar son aligeradas con un espesor de 20cm. A continuación, se presenta el gráfico de la planta típica de la estructura en análisis.

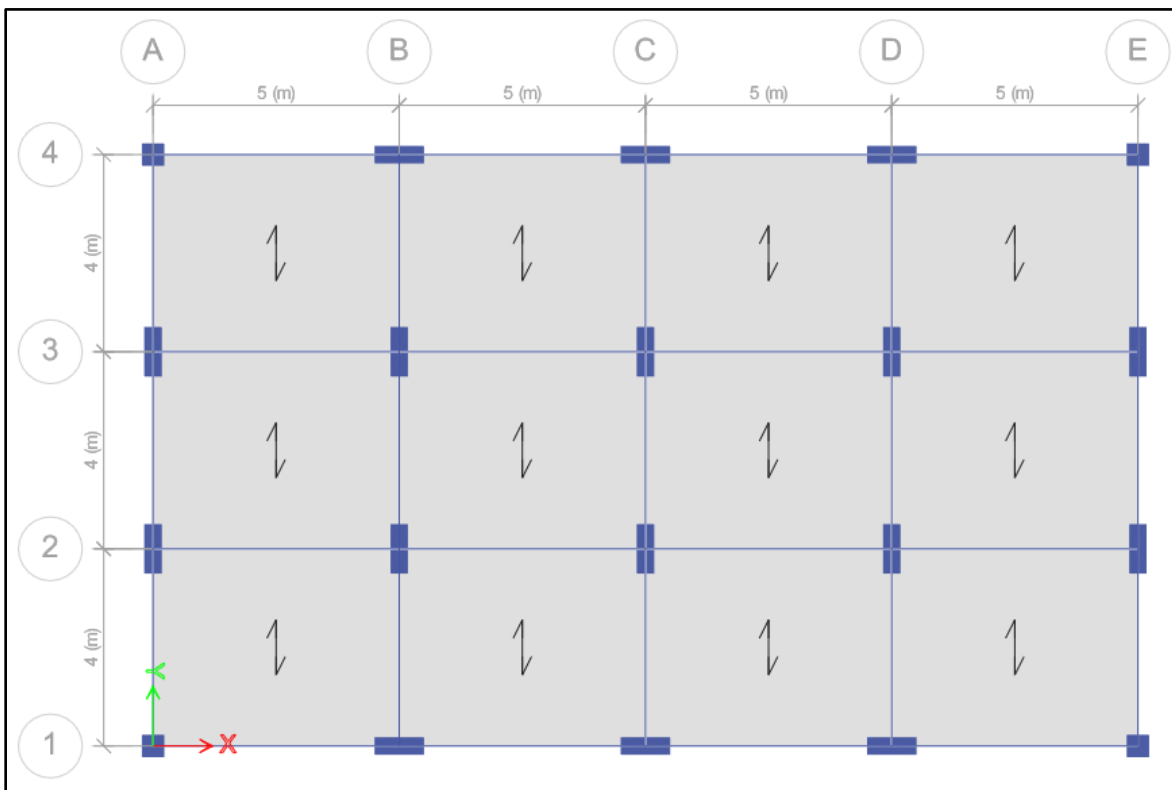


Figura 20 Planta Típica de la estructura idealizada. Fuente: Software Etabs v21

## Parámetros para el análisis

## Normativas aplicadas

Las normativas empleadas del reglamento nacional de edificaciones para el desarrollo del análisis son las siguientes:

- Norma E.020 (Cargas – 2020)
- Norma E.030 (Diseño Sismorresistente – 2020)
- Norma E.060 (Concreto Armado – 2020)

## Características estructurales

### Columnas

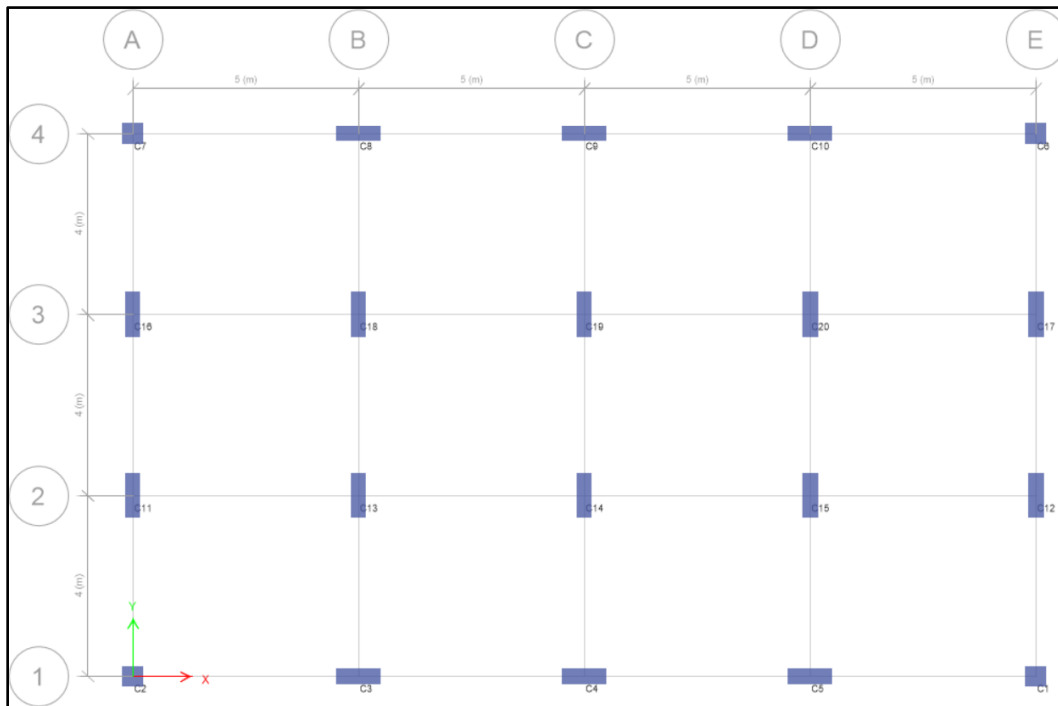


Figura 21 Planta Típica – Visualización de columnas. Fuente: Software Etabs v21

En las siguientes tablas se muestran las características de las columnas, considerando sus secciones y factor de compresión desde el primer nivel hasta el último.

*Tabla 6 Características y secciones de las columnas de piso 1 - 15. Fuente: Elaboración Propia.*

COLUMNAS				
Código	Ancho (cm)	Largo (cm)	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )	Niveles
C1	45	45	280	Piso 1 - Piso 15
C2	45	45	280	Piso 1 - Piso 15
C3	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C4	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C5	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C6	45	45	280	Piso 1 - Piso 15
C7	45	45	280	Piso 1 - Piso 15
C8	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C9	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C10	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C11	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C12	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C13	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C14	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C15	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C16	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C17	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C18	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C19	35	100	280	Piso 1 - Piso 15
C20	35	100	280	Piso 1 - Piso 15

Con base en el predimensionamiento realizado, se definieron las secciones de las columnas, las cuales se detallan en la tabla anterior. Estas secciones fueron posicionadas estratégicamente para optimizar la rigidez en el eje Y de la estructura, identificado como la dirección más susceptible a deformaciones.

- Vigas

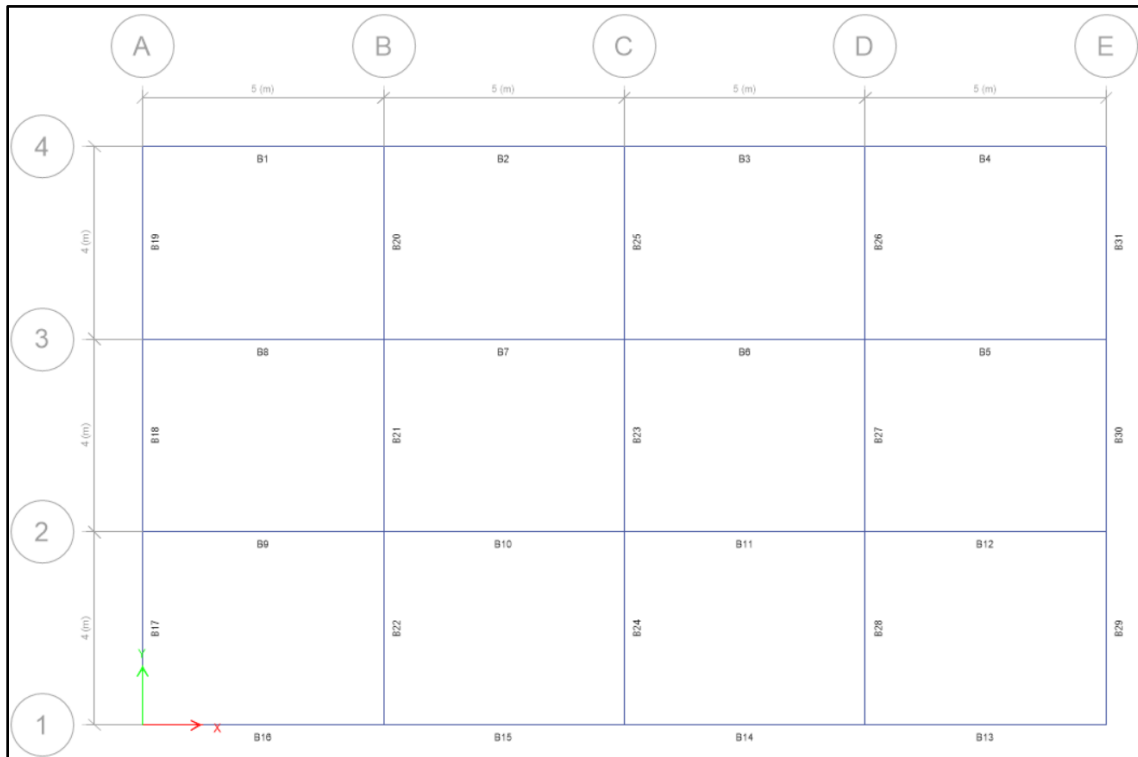


Figura 22 Planta Típica - Visualización de vigas. Fuente: Software Etabs v21

En las siguientes tablas se detallan las propiedades de las vigas, incluyendo las secciones transversales y el factor de compresión desde el primer hasta el último nivel de la estructura. Estas dimensiones fueron determinadas durante el proceso de predimensionamiento, conforme a las normativas y recomendaciones de los manuales de diseño de concreto armado. Asimismo, se verificó que las secciones seleccionadas cumplan con los requisitos de rigidez y resistencia, asegurando su adecuado desempeño en la función estructural asignada.

*Tabla 7 Características y secciones de las vigas en el eje X del piso 1 - 15. Fuente:  
Elaboración Propia.*

<b>VIGAS - EJE X</b>				
<b>Código</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Largo (cm)</b>	<b>f'c (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Niveles</b>
B1	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B2	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B3	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B4	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B5	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B6	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B7	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B8	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B9	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B10	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B11	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B12	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B13	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B14	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B15	35	50	210	Piso 1 - Piso 15
B16	35	50	210	Piso 1 - Piso 15

*Tabla 8 Características y secciones de las vigas en el eje Y del piso 1 - 15. Fuente:  
Elaboración Propia.*

<b>VIGAS - EJE Y</b>				
<b>Código</b>	<b>Ancho (cm)</b>	<b>Largo (cm)</b>	<b>f'c (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Niveles</b>
B17	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B18	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B19	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B20	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B21	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B22	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B23	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B24	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B25	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B26	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B27	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B28	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B29	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B30	35	40	210	Piso 1 - Piso 15
B31	35	40	210	Piso 1 - Piso 15

- Losas

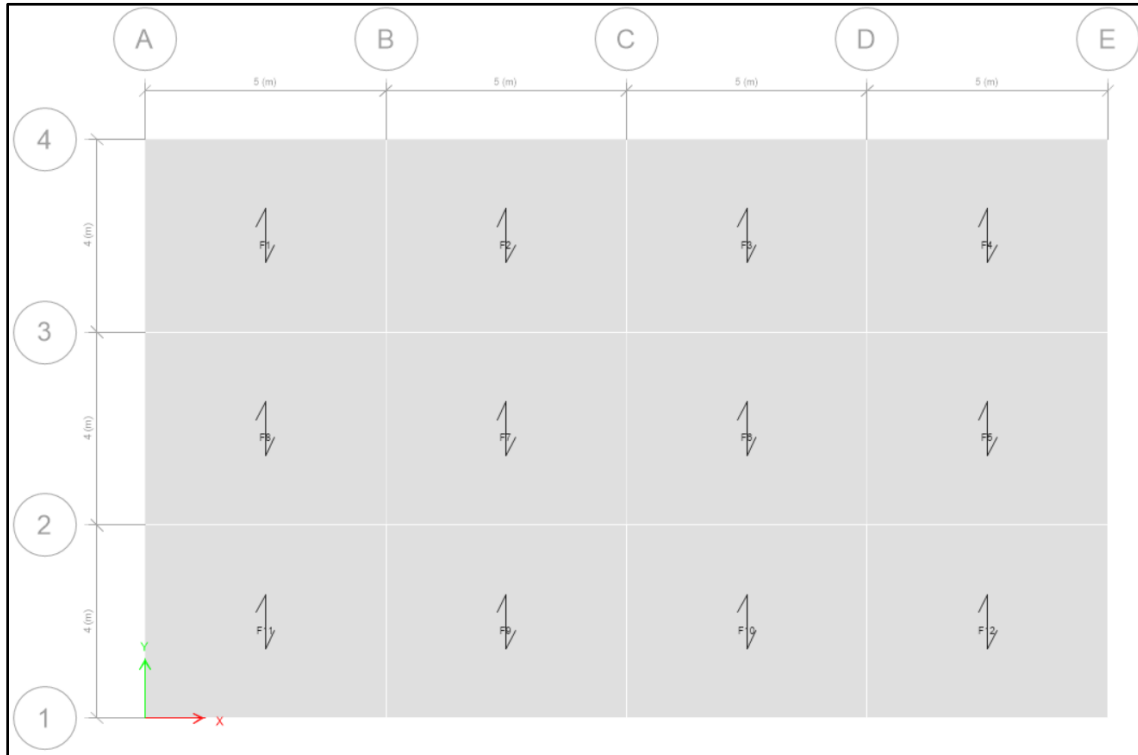


Figura 23 Planta Típica - Visualización de losas. Fuente: Software Etabs v21

En las siguientes tablas se muestran las características de las losas aligeradas, considerando su espesor, área y factor de compresión desde el primer nivel hasta el último.

Tabla 9 Características y secciones de losas del piso 1 - 15. Fuente: Elaboración Propia.

LOSAS ALIGERADAS				
Código	Espesor (cm)	Área (m <sup>2</sup> )	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )	Niveles
F1	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F2	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F3	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F4	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F5	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F6	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F8	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F9	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F10	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F11	20	20	210	Piso 1 - Piso 15
F12	20	20	210	Piso 1 - Piso 15

## Parámetros de cálculo

### Diseño Sísmico

#### - Peligro Sísmico

Los factores de diseño a considerar son definidos por la Norma E.030, el cual establece dichos parámetros para cada proyecto de análisis. Esto se muestra en la siguiente tabla.

*Tabla 10 Factores de Diseño Sísmico. Fuente: Elaboración Propia.*

Factor	Descripción	Valor
Zona Sísmica (Z)	Lima	0.45
Categoría de Uso (U)	Edificaciones Comunes	1
Tipo de Suelo (S)	Suelo Intermedio (S2)	1.05
Amplificación Sísmica (C)	Según periodo	2.5
Periodo (TP y TL)	TP	0.6
	TL	2
Reducción (R) en el eje X	Sistema estructural de muros estructurales	5.1
Reducción (R) en el eje Y		

### Modelamiento estructural sin AMS

#### Definición de propiedades y elementos estructurales en el software.

#### - Definición de materiales

Para la resistencia a la compresión del concreto se consideró 3 resistencias (210, 240 y 280 kgf/cm<sup>2</sup>).

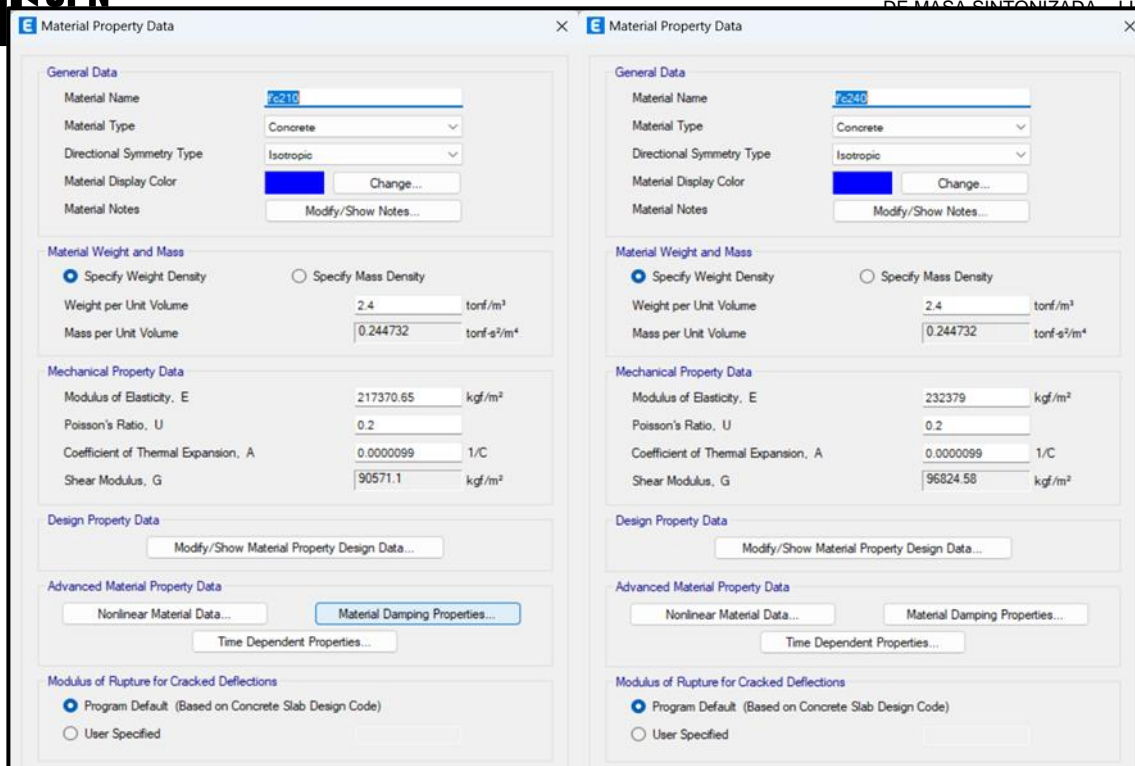


Figura 24 Propiedades de concreto f'c 210 y 240. Fuente: Software Etabs v21.

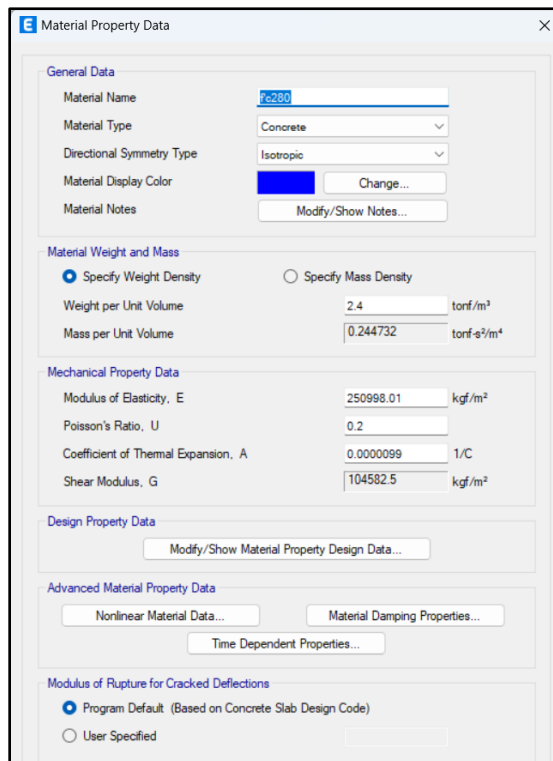


Figura 25 Propiedades de concreto f'c 280. Fuente: Software Etabs v21.

- **Definición de elementos**

Para definir los elementos estructurales que conformarán la edificación. Se realizó un dimensionamiento de la estructura para poder determinar las secciones como vigas, columnas, muros y losas. Para lo cual se modelará como tipo “frame” la vigas y columnas, y por último como tipo “shell” las losas aligeradas “membrana”.

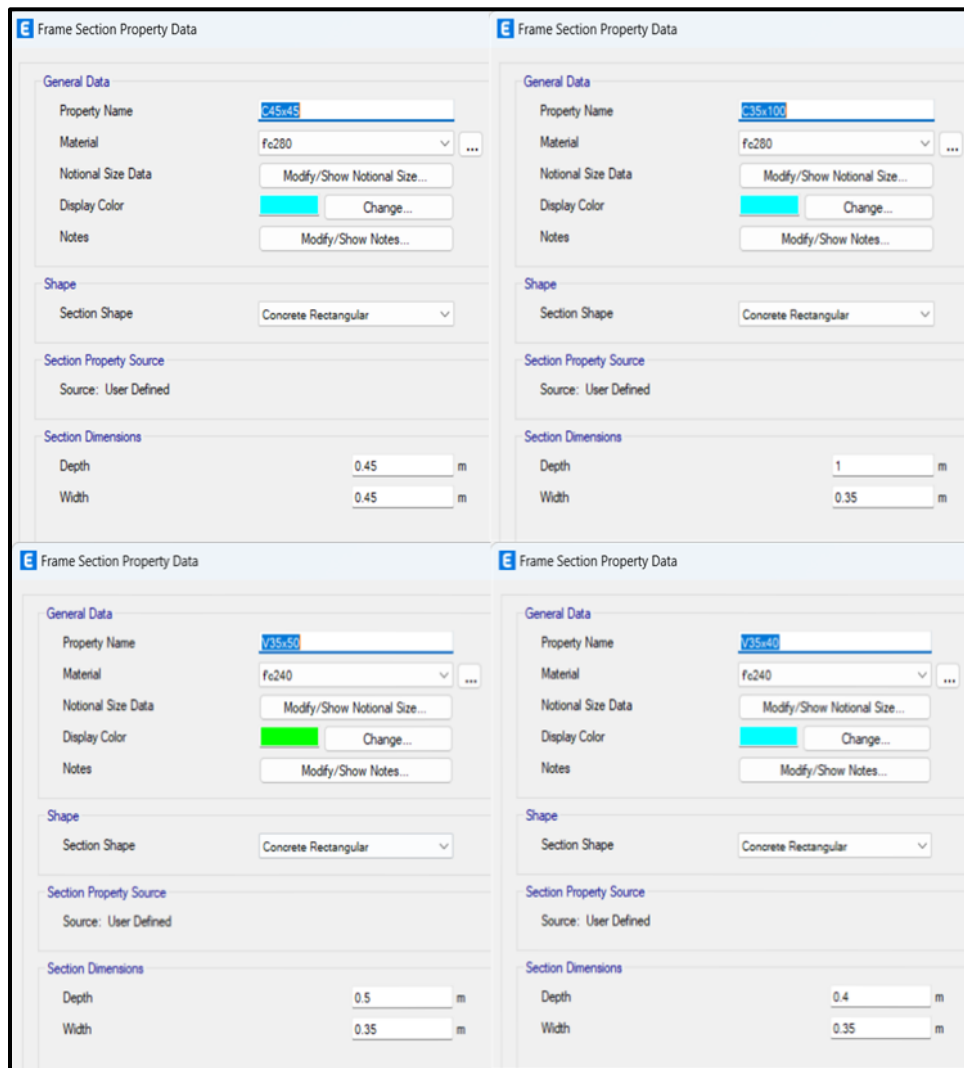


Figura 26 Secciones de columnas y vigas. Fuente: Software Etabs v21.

- **Definición de cargas**

Se tomaron en cuenta dos conjuntos de cargas de losas en la estructura, estas según el Norma E.020 (Cargas). Para las losas de entrepiso se consideró un factor de carga de viva de 200 kgf/cm<sup>2</sup> y carga muerta de 100 kgf/cm<sup>2</sup> y para las losas de azotea se consideró un factor de carga de viva de 100 kgf/cm<sup>2</sup> y carga muerta de 100 kgf/cm<sup>2</sup>. Según se muestra en la siguiente figura.

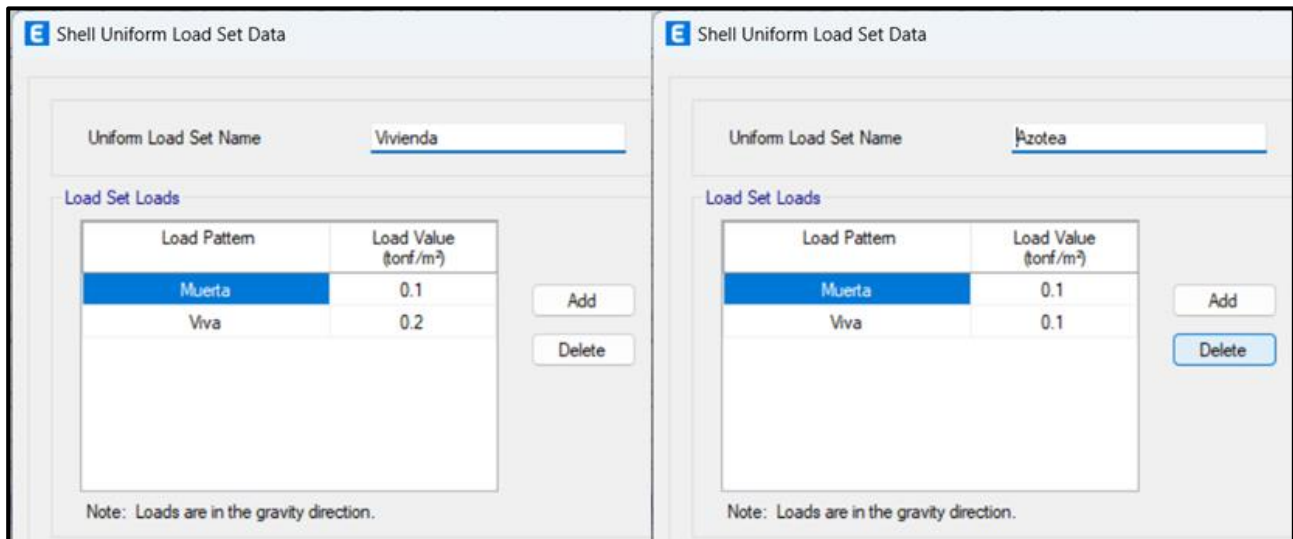


Figura 27 Conjunto de carga para losas de entrepiso y azotea. Fuente: Software Etabs v21.

**Modelado de la estructura**

**Parámetros de diseño de AMS**

- **Peso Sísmico**

Para determinar el peso total de la estructura, consideramos los mencionado en la Norma E.030. Utilizando el 100% de carga muerta + 25% de carga viva para edificaciones de tipo “C”.

Tabla 11 Carga Muerta y Carga Viva de la estructura. Fuente: Elaboración Propia.

Table: Base Reactions		
Output Case	Case Type	FZ (tonf)
Muerta	LinStatic	3502.2684
Viva	LinStatic	696

$$Psísmico = 100\%CM + 25\%CV$$

$$Ps = 3676.27 \text{ tonf}$$

Considerando un factor de 2% para la masa del AMS.

$$Peso \text{ AMS} = \mu \times \text{Masa de Estructura}$$

Donde:

$\mu$ : Relación de masas de la estructura.

$$P_{AMS} = 73.53 \text{ tonf}$$

$$M_{AMS} = \frac{P_{AMS}}{\text{gravedad}}$$

$$M_{AMS} = 7.495 \frac{\text{ton} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

#### - Carga máxima de compresión

Posteriormente se utilizará la siguiente ecuación para poder determinar la carga máxima que podrán soportar los aisladores.

$$P_{tx,y,z} = \% \text{ Modo 1 de masa participativa} \times P_{AMS}$$

Donde:

$P_{tx,y,z}$ : Carga máxima de soporte

$P_{AMS\ x,y,z}$ : Peso amortiguador de masa sintonizada

Tabla 12 Tabla de periodos traslacional y rotacional. Fuente: Elaboración Propia.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios					
Case	Mode	Period (sec)	UX	UY	RZ
Modal	1	183.213	0	0.7813	0
Modal	2	153.983	0.8028	0	0
Modal	3	151.772	0	0	0.7968

$$P_{tx} = 0.8028 \times 73.53 \text{ tonf} = 59.03 \text{ tonf}$$

$$P_{ty} = 0.7813 \times 73.53 \text{ tonf} = 57.45 \text{ tonf}$$

$$P_{tz} = 0.7968 \times 73.53 \text{ tonf} = 58.59 \text{ tonf}$$

#### - Rigidez del AMS

La rigidez total del amortiguador comprender la sumatoria total de las rigideces de los apoyos en la que se ubicará el AMS. Se definen bajo las siguientes ecuaciones:

$$K_{Aislador\ AMS\ x,y,z} = \frac{4\pi^2 \times Pt}{T^2 \times g}$$

Donde:

$K_{Aislador\ AMS\ x,y,z}$ : Rigidez de aislador

T: Periodo

g: Gravedad

Pt: Carga máxima de soporte

$$K_{Aislador\ AMS\ x} = \frac{4\pi^2 \times 59.03\ tonf}{153.983^2 \times 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.01 \frac{tonf}{m}$$

$$K_{Aislador\ AMS\ y} = \frac{4\pi^2 \times 57.45\ tonf}{183.213^2 \times 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.007 \frac{tonf}{m}$$

$$K_{Aislador\ AMS\ z} = \frac{4\pi^2 \times 58.59\ tonf}{151.772^2 \times 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.01 \frac{tonf}{m}$$

$$K_{Total\ AMS\ x,y,z} = K_{Aislador\ AMS\ x,y,z} \times 4$$

$$K_{Total\ AMS\ x} = 0.040 \frac{tonf}{m}$$

$$K_{Total\ AMS\ y} = 0.028 \frac{tonf}{m}$$

$$K_{Total\ AMS\ z} = 0.041 \frac{tonf}{m}$$

#### - Coeficiente de amortiguación

Se hallará el coeficiente de amortiguamiento para cada aislador que se adicionará al amortiguamiento de la estructura. Cabe recalcar que el amortiguamiento  $\zeta$  a considerar será de 20%.

Amortiguamiento total del AMS

$$C_{T,x,y,z} = 2\zeta \sqrt{K_{Total\ AMS\ x} M_{AMS}}$$

Donde:

$K_{Total\ AMS\ x,y,z}$ : Rigidez total del AMS

$M_{AMS}$ : Masa del AMS

$\zeta$ : Relación de amortiguación

$$C_{Tx} = 2x0.2 \sqrt{0.040 \frac{tonf}{m} x 7.495 \frac{ton \cdot s^2}{m}} = 0.219 \frac{ton \cdot s}{m}$$

$$C_{Ty} = 2x0.2 \sqrt{0.028 \frac{tonf}{m} x 7.495 \frac{ton \cdot s^2}{m}} = 0.183 \frac{ton \cdot s}{m}$$

$$C_{Tz} = 2x0.2 \sqrt{0.041 \frac{tonf}{m} x 7.495 \frac{ton \cdot s^2}{m}} = 0.222 \frac{ton \cdot s}{m}$$

Amortiguador para cada aislador

$$C_{x,y,z} = \frac{C_{Tx,y,z}}{4}$$

Donde:

$C_{Tx,y,z}$ : Amortiguamiento total

$$C_x = \frac{0.219 \frac{ton \cdot s}{m}}{4} = 0.055 \frac{ton \cdot s}{m}$$

$$C_y = \frac{0.183 \frac{ton \cdot s}{m}}{4} = 0.046 \frac{ton \cdot s}{m}$$

$$C_z = \frac{0.222 \frac{ton \cdot s}{m}}{4} = 0.056 \frac{ton \cdot s}{m}$$

## Verificación de elastómero

### - Grosor de las láminas de elastómero

Cada una de las láminas elastoméricas tendrán un espesor de 1cm.

### - Forma del soporte elastomérico

El diámetro por considerar será de 50cm.

$$s_a = \frac{D}{4h_r} \geq 10$$

$$s_a = \frac{0.50m}{4 \times 0.01m} \geq 10$$

$$s_a = 12.50m \geq 10$$

### - Propiedades de deformación

Se utilizará un valor dentro de los rangos permisibles.

$$56.08 \frac{tonf}{m^2} < G_a < 127.46 \frac{tonf}{m^2}$$

$$G_a = 0.95 MP_a = 96.87 \frac{tonf}{m^2}$$

### - Esfuerzo a compresión

Para la siguiente ecuación consideramos el valor de  $P_t$  previamente calculado y el diámetro de 0.50m de los soportes elastoméricos.

$$\sigma_s \geq \frac{P_t}{\pi r^2} \geq 1120 \frac{ton}{m^2}$$

$$\sigma_s \geq \frac{175.07 \text{ tonf}}{\pi(0.25)^2} = 891.624 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \geq 1120 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

#### - **Altura total y corte**

Para el siguiente apartado consideramos 20 láminas de elastómeros de 1cm. Por lo tanto, la altura total es de 20cm y el máximo desplazamiento se da en el último nivel (T15) con 965.41cm.

$$h_{rt} \geq 2x\Delta_s$$

$$20\text{cm} \geq 2x965.41\text{cm}$$

$$20\text{cm} \geq 1930.82\text{cm}$$

#### - **Mínimo grosor de lámina de acero por compresión**

Para este caso, consideramos un esfuerzo de fluencia de láminas de acero que nos la norma ASTM A36 donde  $f_y = 2531 \text{ kgf/cm}^2$ .

$$h_s \geq \frac{3h_{r\max} \cdot \sigma_s}{f_y}$$

$$0.01 \text{ m} \geq 2.041 \text{ m}$$

El grosor de la lámina de acero será de 1cm.

#### **Diseño de AMS**

El diseño del AMS será tomado como una estructura de concreto armado con refuerzo de acero y los aisladores elastoméricos que soportaran el bloque de concreto en la parte superior del edificio. Para el cálculo de las dimensiones del bloque de AMS, utilizaremos los siguientes datos:

el peso específico del concreto (2.4 tonf/m<sup>3</sup>), características como largo (L), ancho (A) y altura (H). Esto para cumplir la masa requerida del AMS.

$$L \times A \times H \times Pe_{concreto} = 73.53 \text{ tonf}$$

Donde:

L= Largo del bloque de AMS

A= Ancho del bloque de AMS

H= Altura del bloque de AMS

$$10m \times 4m \times H \times 2.4 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} = 73.53 \text{ tonf}$$

$$H = 1.54 \text{ m}$$

$$L = 5.00 \text{ m}$$

$$A = 4.00 \text{ m}$$

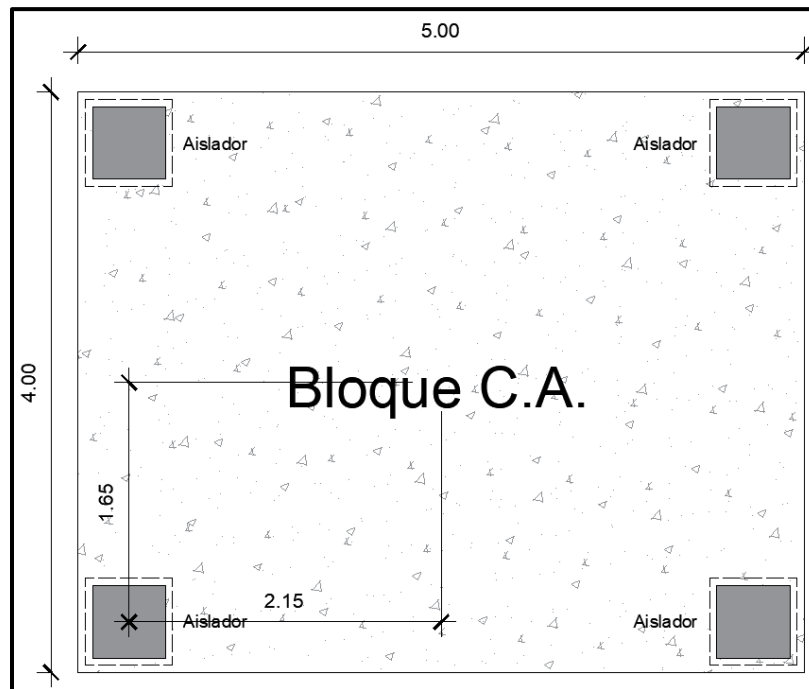


Figura 28 Vista de planta del bloque de AMS para 2%. Fuente:  
Elaboración Propia.

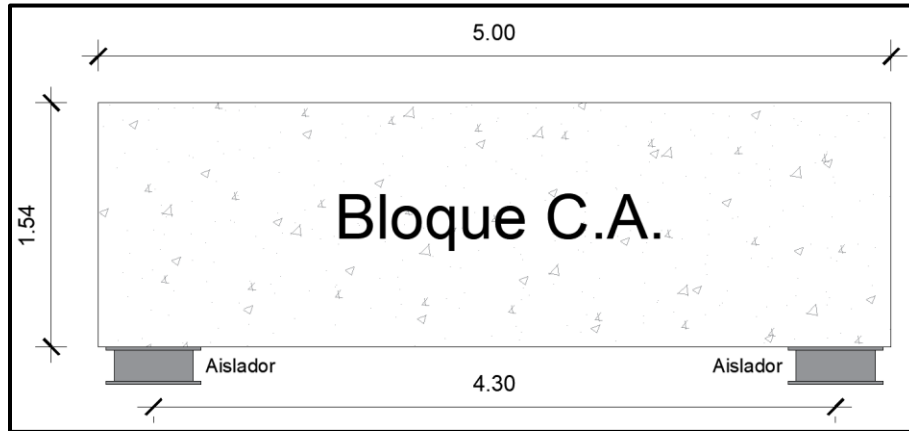


Figura 29 Vista de elevación de bloque de AMS para 2%. Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, se llevó a cabo el modelamiento estructural de AMS. Previo al diseño del modelado, debemos obtener la rigidez de rotación  $R_1$ . Para hacerlo, relacionamos las distancias del centro de masa del bloque de AMS con el centro de masa del aislador en direcciones "X" y "Y", y luego multiplicamos por la rigidez del aislador.

$$Rigidez\ rotacional\ óptima = K_{Aislador\ AMS\ z} * (x^2 + y^2)$$

Donde:

X: Ancho respecto a la ubicación de elastómero

Y: Largo respecto a la ubicación de elastómero

$$Rig.\ rot.\ opt. = 0.07518$$

Amortiguamiento óptimo por Den Hartong = 0.06

Este mismo proceso se repite para los AMS considerando un factor de  $P_{AMS}$  de 2%, 3% y 5%, sucesivamente. En las siguientes tablas se muestra un resumen de los parámetros calculados a utilizar para los distintos AMS a comparar para esta investigación.

*Tabla 13 Resumen de parámetros del AMS (2%). Fuente: Elaboración propia.*

DIRECCIÓN		RIGIDEZ EFECTIVA (tonf/m)	AMORTIGUAMIENTO (tonf.s/m)
U1	UZ	0.010235148	0.055393813
U2	UX	0.010018205	0.054803609
U3	UY	0.006887052	0.045439221
R1	RZ	0.075177164	0.06

*Tabla 14 Resumen de parámetros del AMS (3%). Fuente: Elaboración propia.*

DIRECCIÓN		RIGIDEZ EFECTIVA (tonf/m)	AMORTIGUAMIENTO (tonf.s/m)
U1	UZ	0.007676361	0.04154536
U2	UX	0.007513654	0.041102707
U3	UY	0.005165289	0.034079416
R1	RZ	0.056382873	0.06

*Tabla 15 Resumen de parámetros del AMS (5%). Fuente: Elaboración propia.*

DIRECCIÓN		RIGIDEZ EFECTIVA (tonf/m)	AMORTIGUAMIENTO (tonf.s/m)
U1	UZ	0.012793935	0.069242266
U2	UX	0.012522757	0.068504511
U3	UY	0.008608815	0.056799026
R1	RZ	0.093971455	0.06

## Modelamiento de los AMS en Etabs

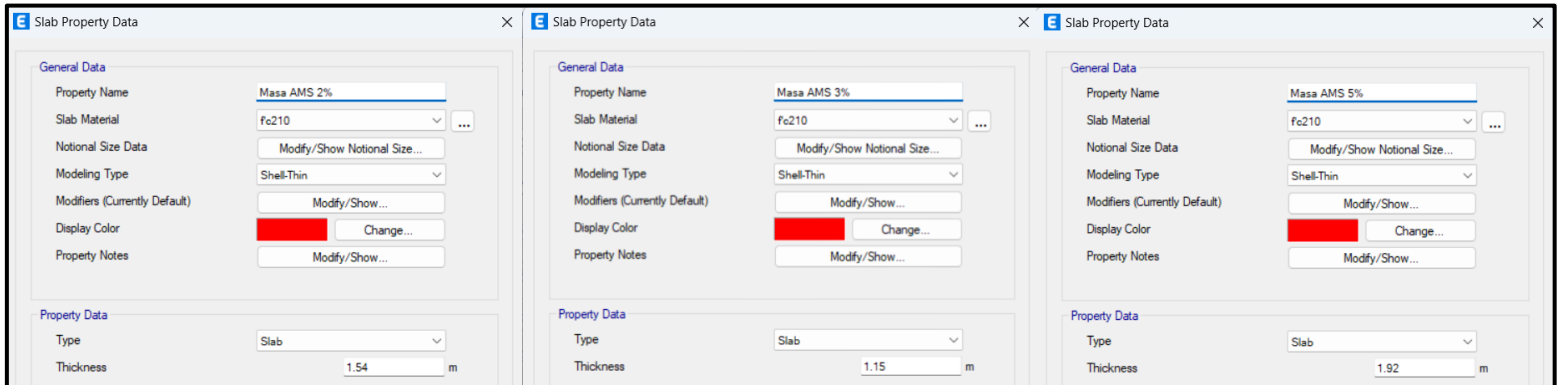


Figura 30 Definición de bloques de concreto para 2%, 3% y 5%. Fuente: Software Etabs v21.

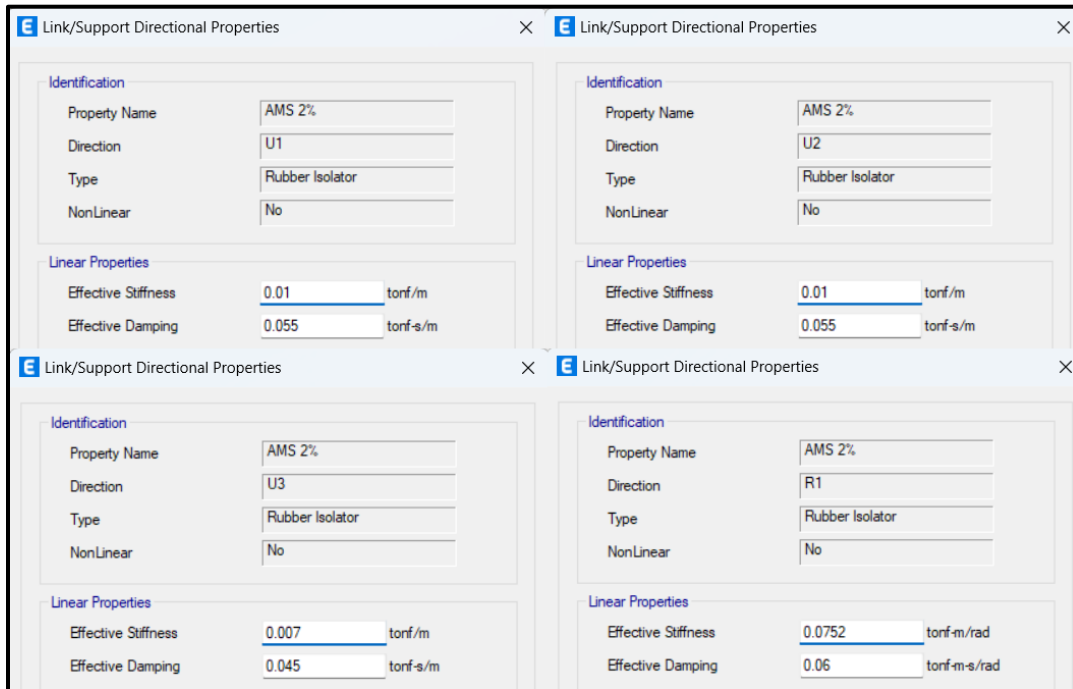


Figura 31 Definición de los parámetros de rigidez y amortiguamiento para AMS (2%). Fuente: Software Etabs v21.

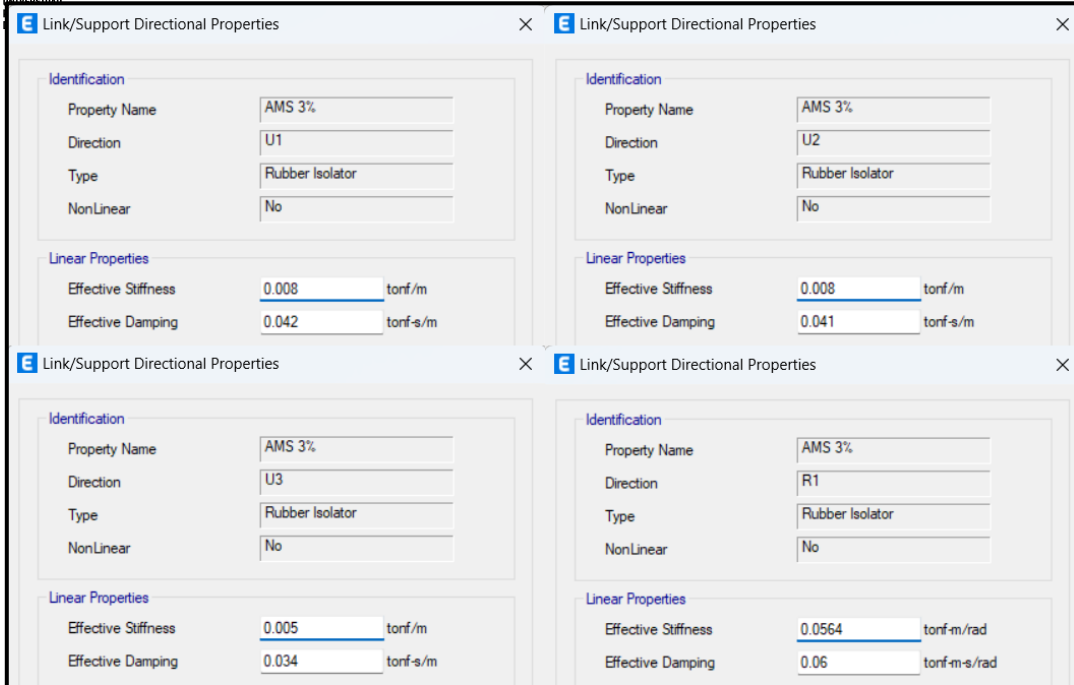


Figura 33 Definición de los parámetros de rigidez y amortiguamiento para AMS (3%).  
Fuente: Software Etabs v21.

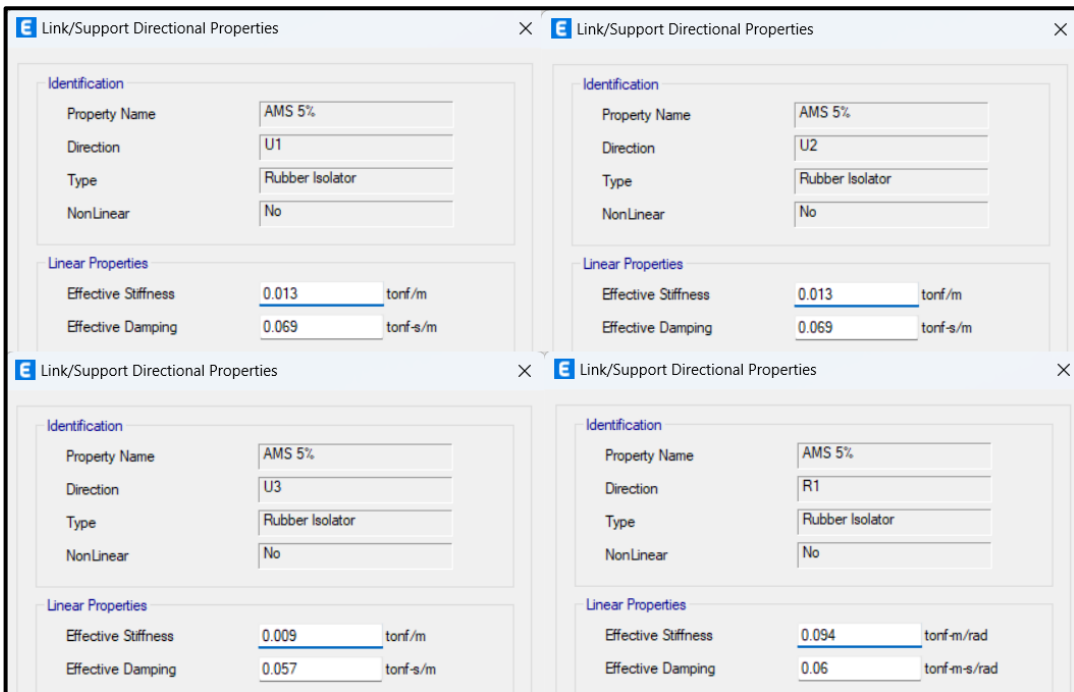


Figura 32 Definición de los parámetros de rigidez y amortiguamiento para AMS (5%).  
Fuente: Software Etabs v21.

### - Ubicación de Amortiguador de Masa Sintonizada

Se consideró detenidamente la ubicación óptima del Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) en la parte superior de la estructura, eligiendo las columnas centrales de la matriz estructural 3x4 para soportar los cuatro aisladores que, a su vez, sostendrán el bloque de concreto. Esta disposición central del AMS garantiza una mayor eficiencia en la mitigación de los desplazamientos laterales de la edificación, permitiendo una distribución uniforme de las cargas dinámicas y maximizando la eficacia del sistema de control de vibraciones. En las siguientes figuras se detallan las ubicaciones precisas del AMS para los distintos escenarios considerados, así como los valores de las derivas máximas en las direcciones X y Y.

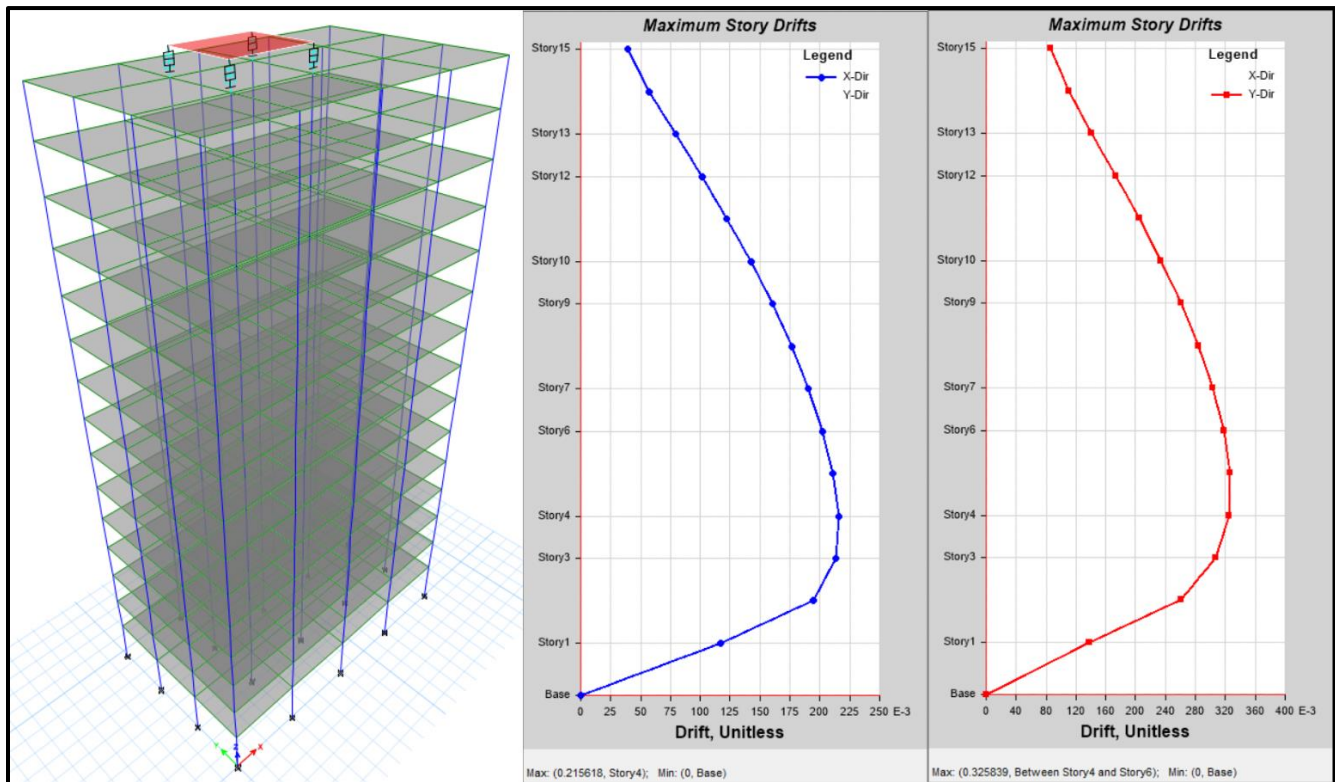


Figura 34 Ubicación y máximas derivas en X y Y para AMS (2%). Fuente: Software Etabs v21.

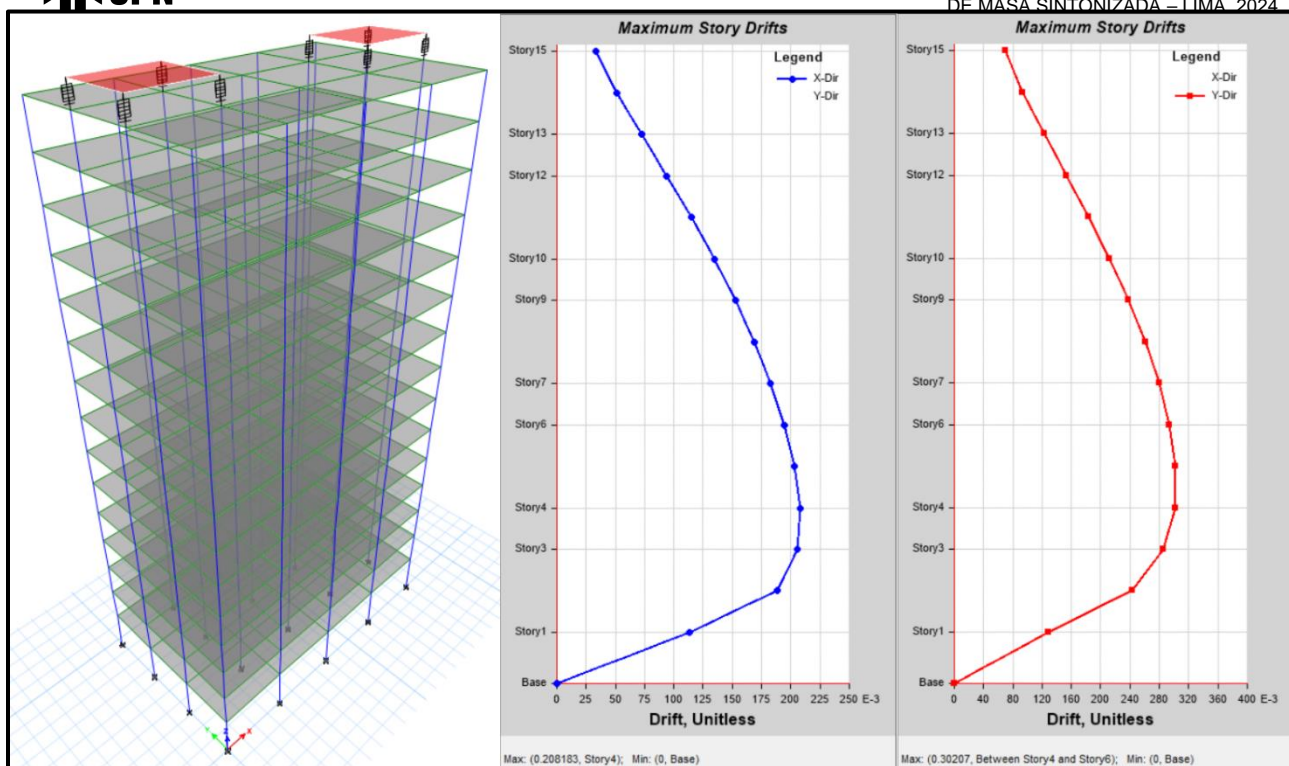


Figura 36 Ubicación y máximas derivas en X y Y para AMS (3%). Fuente: Software Etabs v21.

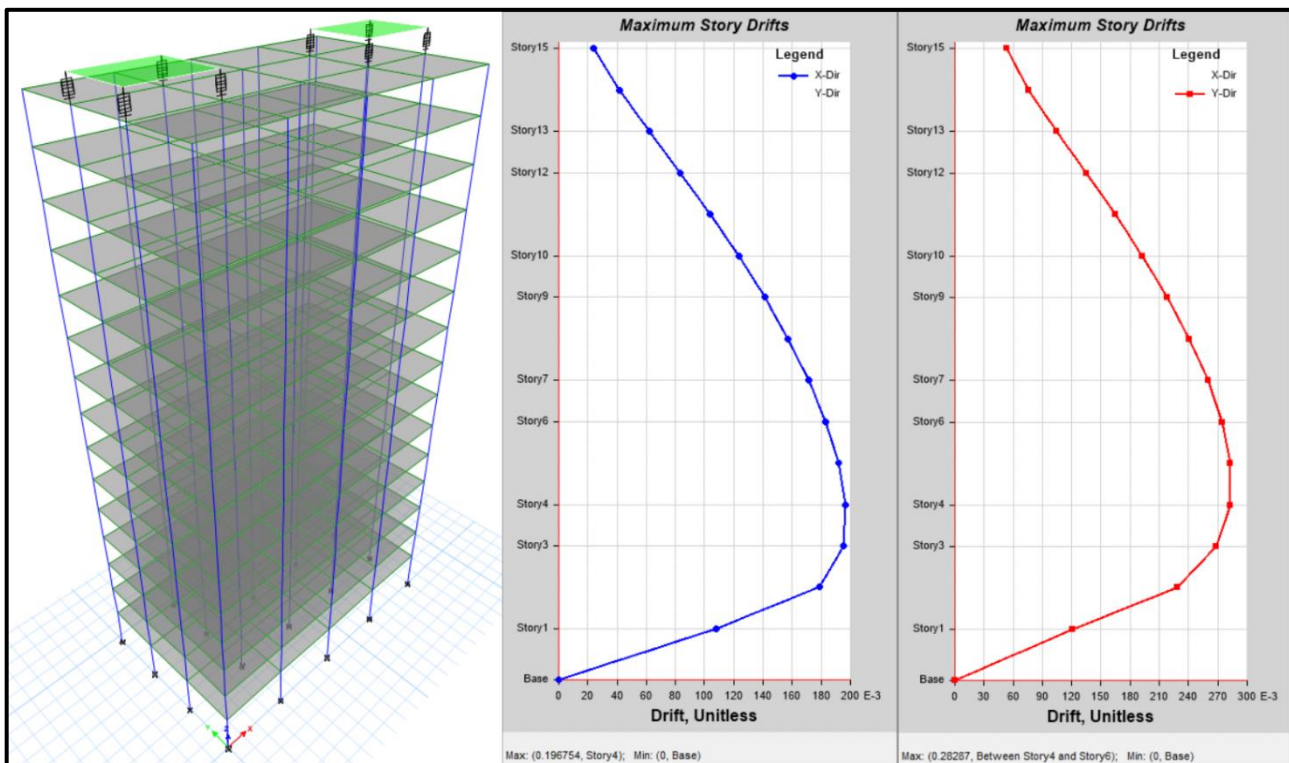


Figura 35 Ubicación y máximas derivas en X y Y para AMS (5%). Fuente: Software Etabs v21.

## Resultado de la investigación

Con base en los resultados presentados, se desarrollaron tablas comparativas que permiten evaluar la variación en las derivas, desplazamientos laterales y el primer modo de vibración de la estructura, tanto con cómo sin la incorporación del Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) para los diferentes casos estudiados (2%, 3% y 5%). Estos resultados serán posteriormente representados gráficamente de manera simultánea, facilitando la visualización de las variaciones en todos los escenarios. Es importante destacar que los porcentajes de variación fueron calculados utilizando la fórmula especificada a continuación.

$$\Delta = \frac{V_2 - V_1}{V_1} * 100$$

Donde:

$V_2$ : Nuevo valor

$V_1$ : Valor original

### Derivas Máximas de Entrepiso

*Tabla 16 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje X para AMS (2%).  
Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Derivas Máximas sin AMS X-X	(0.85*R) Norma	Derivas Máximas con AMS X-X	(0.85*R) Norma	Variación Porcentual
15	0.0519	0.3531	0.0391	0.2658	25%
14	0.0714	0.4855	0.0574	0.3905	20%
13	0.0942	0.6403	0.0793	0.5391	16%
12	0.1169	0.7951	0.1013	0.6889	13%
11	0.1386	0.9422	0.1224	0.8324	12%

10	0.1586	1.0784	0.1421	0.9662	10%
9	0.1768	1.2023	0.1601	1.0886	9%
8	0.1931	1.3128	0.1762	1.1982	9%
7	0.2072	1.4090	0.1903	1.2938	8%
6	0.2190	1.4889	0.2020	1.3734	8%
5	0.2278	1.5490	0.2108	1.4336	7%
4	0.2324	1.5802	0.2156	1.4662	7%
3	0.229	1.559	0.213	1.450	7%
2	0.209	1.422	0.195	1.324	7%
1	0.126	0.856	0.117	0.797	7%

Tabla 17 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje Y para AMS (2%).  
Fuente: Elaboración Propia.

Niveles	Derivas Máximas sin AMS Y-Y	(0.85*R) Norma	Derivas Máximas con AMS Y-Y	(0.85*R) Norma	Variación Porcentual
15	0.1026	0.6974	0.0858	0.5832	16%
14	0.1278	0.8688	0.1103	0.7500	14%
13	0.1588	1.0800	0.1409	0.9579	11%
12	0.1911	1.2998	0.1729	1.1759	10%
11	0.2225	1.5130	0.2042	1.3888	8%
10	0.2517	1.7116	0.2336	1.5883	7%
9	0.2781	1.8911	0.2602	1.7694	6%
8	0.3011	2.0476	0.2836	1.9283	6%
7	0.3202	2.1773	0.3030	2.0606	5%
6	0.3344	2.2737	0.3177	2.1601	5%
5	0.3420	2.3254	0.3258	2.2157	5%
4	0.3397	2.3101	0.3244	2.2062	4%
3	0.3211	2.1832	0.3072	2.0889	4%
2	0.2726	1.8535	0.2612	1.7764	4%
1	0.1434	0.9748	0.1376	0.9359	4%

Como se observa en los cuadros presentados para ambos escenarios sísmicos en las direcciones X e Y, se logró una mejora en las derivas máximas de entrepiso en el nivel 4 de la estructura, con reducciones del 7% y 4% respectivamente, al considerar una relación de masa del 2% para el Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS).

*Tabla 18 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje X para AMS (3%).  
 Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Derivas Máximas sin AMS X-X	(0.85*R) Norma	Derivas Máximas con AMS X-X	(0.85*R) Norma	Variación Porcentual
15	0.0519	0.3531	0.0329	0.2239	37%
14	0.0714	0.4855	0.0510	0.3468	29%
13	0.0942	0.6403	0.0725	0.4929	23%
12	0.1169	0.7951	0.0942	0.6409	19%
11	0.1386	0.9422	0.1151	0.7830	17%
10	0.1586	1.0784	0.1347	0.9158	15%
9	0.1768	1.2023	0.1526	1.0376	14%
8	0.1931	1.3128	0.1686	1.1468	13%
7	0.2072	1.4090	0.1827	1.2422	12%
6	0.2190	1.4889	0.1944	1.3218	11%
5	0.2278	1.5490	0.2033	1.3823	11%
4	0.2324	1.5802	0.2082	1.4156	10%
3	0.229	1.559	0.206	1.401	10%
2	0.209	1.422	0.188	1.281	10%
1	0.126	0.856	0.113	0.772	10%

*Tabla 19 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje Y para AMS (3%).  
 Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Derivas Máximas sin AMS Y-Y	(0.85*R) Norma	Derivas Máximas con AMS Y-Y	(0.85*R) Norma	Variación Porcentual
15	0.1026	0.6974	0.0693	0.4713	32%
14	0.1278	0.8688	0.0929	0.6314	27%
13	0.1588	1.0800	0.1223	0.8313	23%
12	0.1911	1.2998	0.1532	1.0415	20%
11	0.2225	1.5130	0.1834	1.2473	18%
10	0.2517	1.7116	0.2119	1.4408	16%
9	0.2781	1.8911	0.2378	1.6168	15%
8	0.3011	2.0476	0.2605	1.7714	13%
7	0.3202	2.1773	0.2795	1.9006	13%
6	0.3344	2.2737	0.2939	1.9983	12%
5	0.3420	2.3254	0.3021	2.0541	12%
4	0.3397	2.3101	0.3012	2.0479	11%
3	0.321	2.183	0.285	1.940	11%

2	0.273	1.854	0.243	1.650	11%
1	0.143	0.975	0.128	0.869	11%

Al incrementar la relación de masa al 3%, se observa un aumento en las derivas máximas de entrepiso, alcanzando un 10% y 11% en los escenarios sísmicos para las direcciones X e Y, respectivamente. Este incremento sugiere una respuesta estructural más sensible a las variaciones en la relación de masa del Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS), lo cual debe ser considerado en el diseño para optimizar la eficacia del AMS.

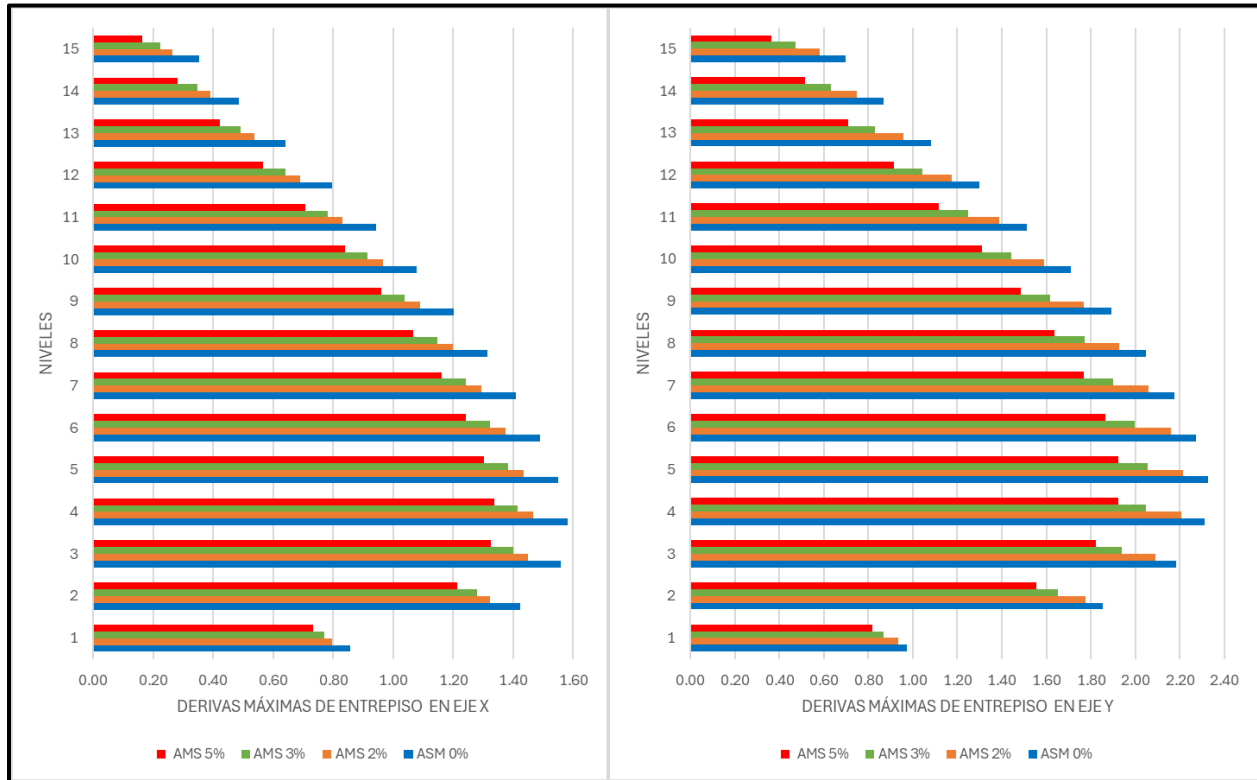
*Tabla 20 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje X para AMS (5%).  
Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Derivas Máximas sin AMS X-X	(0.85*R) Norma	Derivas Máximas con AMS X-X	(0.85*R) Norma	Variación Porcentual
15	0.0519	0.3531	0.0240	0.1635	54%
14	0.0714	0.4855	0.0414	0.2813	42%
13	0.0942	0.6403	0.0622	0.4232	34%
12	0.1169	0.7951	0.0835	0.5678	29%
11	0.1386	0.9422	0.1040	0.7074	25%
10	0.1586	1.0784	0.1233	0.8385	22%
9	0.1768	1.2023	0.1411	0.9592	20%
8	0.1931	1.3128	0.1570	1.0677	19%
7	0.2072	1.4090	0.1710	1.1628	17%
6	0.2190	1.4889	0.1827	1.2424	17%
5	0.2278	1.5490	0.1917	1.3033	16%
4	0.2324	1.5802	0.1968	1.3379	15%
3	0.229	1.559	0.195	1.326	15%
2	0.209	1.422	0.179	1.214	15%
1	0.126	0.856	0.108	0.732	14%

*Tabla 21 Cuadro comparativo de variación de derivas máximas en eje Y para AMS (5%).  
Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Derivas Máximas sin AMS Y-Y	(0.85*R) Norma	Derivas Máximas con AMS Y-Y	(0.85*R) Norma	Variación Porcentual
15	0.1026	0.6974	0.0534	0.3633	48%
14	0.1278	0.8688	0.0760	0.5167	41%
13	0.1588	1.0800	0.1045	0.7107	34%
12	0.1911	1.2998	0.1347	0.9160	30%
11	0.2225	1.5130	0.1644	1.1182	26%
10	0.2517	1.7116	0.1925	1.3092	24%
9	0.2781	1.8911	0.2182	1.4836	22%
8	0.3011	2.0476	0.2408	1.6375	20%
7	0.3202	2.1773	0.2598	1.7667	19%
6	0.3344	2.2737	0.2743	1.8654	18%
5	0.3420	2.3254	0.2829	1.9235	17%
4	0.3397	2.3101	0.2827	1.9222	17%
3	0.321	2.183	0.268	1.824	16%
2	0.273	1.854	0.228	1.553	16%
1	0.143	0.975	0.120	0.818	16%

Finalmente, al incrementar la relación de masa al 5%, se observa una incidencia aún más significativa en la reducción de las derivas máximas de entrepiso, como se evidencia en los cuadros previamente presentados. Los porcentajes de mejora aumentan a 15% y 17% para los escenarios sísmicos en las direcciones X e Y, respectivamente. A continuación, se presentan las gráficas comparativas que ilustran la influencia del Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) en los casos con relaciones de masa del 2%, 3% y 5%, permitiendo una visualización más clara de la mejora global en las derivas de entrepiso en los distintos niveles de la estructura.



*Figura 37 Comparativo global de derivas máximas de entrepisos para eje X e Y. Fuente: Elaboración Propia.*

Como se aprecia en la Figura 37, el aumento de la relación de masa mejora notablemente la respuesta sísmica de la estructura aporticada de 15 niveles frente a excitaciones sísmicas. Específicamente, al considerar una relación de masa del 5%, se logra una reducción promedio de hasta un 16% en la deriva máxima de entrepiso, evidenciando la eficacia del Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) en la mitigación de los desplazamientos laterales.

## Desplazamiento Lateral

Tabla 22 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje X para AMS (2%). Fuente: Elaboración Propia.

Niveles	Desplazamientos Laterales sin AMS X-X	Desplazamientos Laterales con AMS X-X	Variación Porcentual
15	639.5479	579.8194	9%
14	626.4969	570.0894	9%
13	608.5157	555.6777	9%
12	584.7322	535.6722	8%
11	555.0685	509.9580	8%
10	519.7547	478.7278	8%
9	479.1588	442.3185	8%
8	433.7237	401.1484	8%
7	383.9471	355.6968	7%
6	330.3819	306.5014	7%
5	273.6595	254.1775	7%
4	214.5590	199.4798	7%
3	154.2049	143.4842	7%
2	94.6176	88.1001	7%
1	40.2616	37.5127	7%

Tabla 23 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje Y para AMS (2%). Fuente: Elaboración Propia.

Niveles	Desplazamientos Laterales sin AMS Y-Y	Desplazamientos Laterales con AMS Y-Y	Variación Porcentual
15	965.4074	903.8997	6%
14	939.3864	882.1939	6%
13	906.9590	854.2222	6%
12	866.5795	818.3969	6%
11	817.8266	774.2539	5%
10	760.8745	721.9259	5%
9	696.2226	661.8792	5%
8	624.5724	594.7907	5%
7	546.7844	521.5028	5%
6	463.8930	443.0338	4%

5	377.1885	360.6522	4%
4	288.4096	276.0572	4%
3	200.1520	191.7676	4%
2	116.7147	111.9329	4%
1	45.8736	44.0403	4%

Los cuadros presentados muestran una disminución en los desplazamientos laterales al aplicar una relación de masa del 2% en los escenarios sísmicos para las direcciones X e Y. Aunque se observó una reducción en los desplazamientos, los valores fueron moderados, con disminuciones de 9% y 6% respectivamente.

*Tabla 24 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje X para AMS (3%). Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Desplazamientos Laterales sin AMS X-X	Desplazamientos Laterales con AMS X-X	Variación Porcentual
15	639.5479	552.8448	14%
14	626.4969	544.7278	13%
13	608.5157	531.9757	13%
12	584.7322	513.7074	12%
11	555.0685	489.7959	12%
10	519.7547	460.4218	11%
9	479.1588	425.9092	11%
8	433.7237	386.6658	11%
7	383.9471	343.1620	11%
6	330.3819	295.9280	10%
5	273.6595	245.5709	10%
4	214.5590	192.8339	10%
3	154.2049	138.7712	10%
2	94.6176	85.2430	10%
1	40.2616	36.3120	10%

*Tabla 25 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje Y para AMS (3%). Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Desplazamientos Laterales sin AMS Y-Y	Desplazamientos Laterales con AMS Y-Y	Variación Porcentual
15	965.4074	824.2481	15%
14	939.3864	806.8197	14%

13	906.9590	783.3633	14%
12	866.5795	752.3449	13%
11	817.8266	713.3009	13%
10	760.8745	666.3400	12%
9	696.2226	611.8975	12%
8	624.5724	550.6179	12%
7	546.7844	483.3085	12%
6	463.8930	410.9454	11%
5	377.1885	334.7439	11%
4	288.4096	256.3284	11%
3	200.1520	178.0916	11%
2	116.7147	103.9414	11%
1	45.8736	40.8809	11%

En las Tablas 24 y 25 se presentan comparativos para los modelos con la incorporación de un AMS considerando una relación de masa del 3%. Este escenario muestra una mejora más notable en comparación con el modelo anterior, aunque no alcanza la optimización deseada. A continuación, se presentarán los comparativos correspondientes al último caso de estudio de esta investigación, lo que permitirá evaluar de manera integral la efectividad de las distintas configuraciones del AMS.

*Tabla 26 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje X para AMS (5%). Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Desplazamientos Laterales sin AMS X-X	Desplazamientos Laterales con AMS X-X	Variación Porcentual
15	639.5479	511.5295	20%
14	626.4969	505.7741	19%
13	608.5157	495.5224	19%
12	584.7322	479.8951	18%
11	555.0685	458.7413	17%
10	519.7547	432.2170	17%
9	479.1588	400.6236	16%
8	433.7237	364.3494	16%
7	383.9471	323.8490	16%
6	330.3819	279.6383	15%
5	273.6595	232.3104	15%
4	214.5590	182.5900	15%
3	154.2049	131.4990	15%

2	94.6176	80.8254	15%
1	40.2616	34.4484	14%

*Tabla 27 Cuadro comparativo de variación de desplazamientos laterales máximos por nivel en eje Y para AMS (5%). Fuente: Elaboración Propia.*

Niveles	Desplazamientos Laterales sin AMS Y-Y	Desplazamientos Laterales con AMS Y-Y	Variación Porcentual
15	965.4074	755.8936	22%
14	939.3864	742.6370	21%
13	906.9590	723.5473	20%
12	866.5795	697.0972	20%
11	817.8266	662.7964	19%
10	760.8745	620.7171	18%
9	696.2226	571.2594	18%
8	624.5724	515.0355	18%
7	546.7844	452.8223	17%
6	463.8930	385.5646	17%
5	377.1885	314.4388	17%
4	288.4096	241.0122	16%
3	200.1520	167.5792	16%
2	116.7147	97.8641	16%
1	45.8736	38.5087	16%

Tras la presentación de los últimos comparativos para la estructura con una relación de masa del 5%, se observa una optimización significativa en la reducción de desplazamientos en el nivel 15, el más crítico, con disminuciones del 20% y 22% para los escenarios sísmicos en las direcciones X e Y, respectivamente. Finalmente, se presentará un análisis gráfico global que comparará todos los casos de relación de masa (2%, 3% y 5%), permitiendo visualizar de manera más clara la reducción progresiva en los desplazamientos laterales a medida que se incrementa la relación de masa.

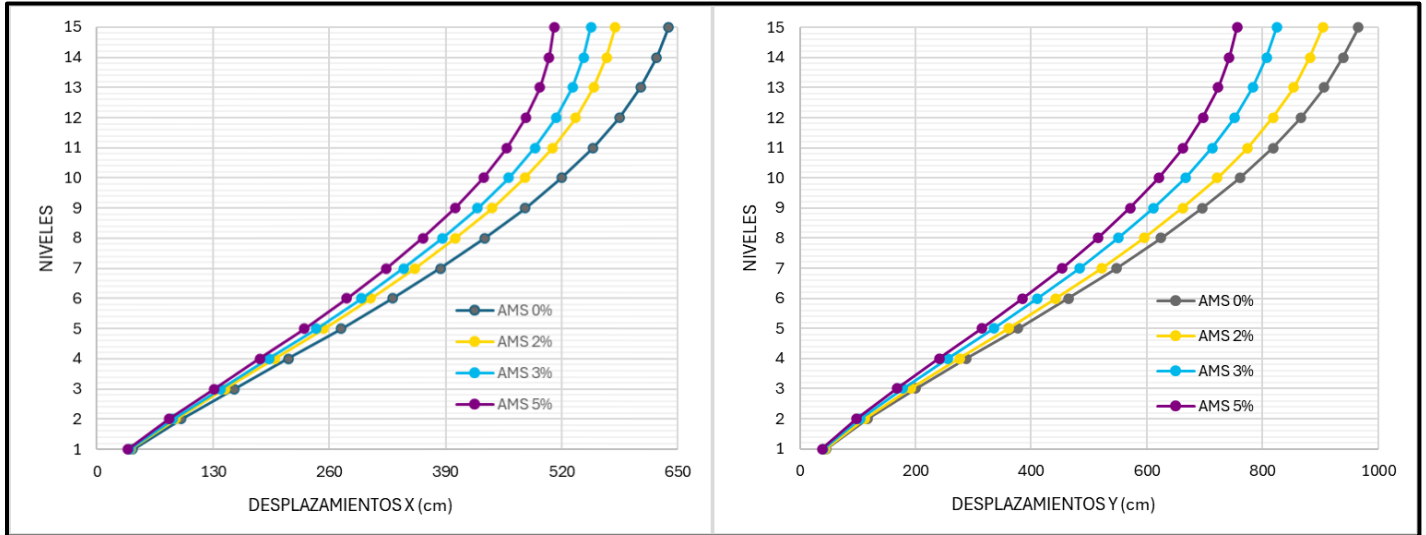


Figura 38 Comparativo global de desplazamientos laterales máximos por nivel para eje X e Y. Fuente: Elaboración Propia.

Según lo ilustrado en la Figura 38, se confirma la eficacia de la respuesta dinámica de la estructura con la incorporación del AMS en los distintos escenarios analizados. Sin embargo, los casos con una relación de masa del 2% y 3% no mostraron una reducción tan significativa en comparación con el escenario en el que se aplicó una relación de masa del 5%, que resultó ser más efectivo en la mitigación de los desplazamientos laterales.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### Discusión de los resultados

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se valida la hipótesis general propuesta, que establece una reducción significativa en los desplazamientos laterales del edificio aporricado ubicado en Lima, Perú, logrando una mejora del 20%.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran una reducción significativa en los desplazamientos laterales máximos de la estructura, superando los hallazgos reportados por (Matos Nuñez, 2024). Esta mejora se atribuye a la utilización de relaciones de masa superiores al 1% en una estructura ejemplificada, en contraste con el estudio, que evaluó una edificación existente de 15 niveles con una relación de masa del 1%. La implementación de mayores relaciones de masa ha permitido una mitigación más efectiva de las distorsiones laterales. De manera similar, los hallazgos reportados por (Arbizu Pillaca, 2022) indicaron reducciones del 21.94% y 14.01% en las direcciones X e Y, respectivamente, para las derivas, y del 25.33% y 22.7% en los desplazamientos laterales. Estas cifras se lograron bajo una relación de masa del 1%. La similitud en los resultados puede atribuirse al hecho de que el estudio se centró en una edificación existente. Es importante resaltar que cada estructura es única, con comportamientos y características particulares. Por tanto, los parámetros de diseño deben ajustarse a las condiciones específicas de la estructura y al tipo de amortiguador o disipador sísmico utilizado, garantizando que se satisfagan periodos de vibración similares y se considere un porcentaje adecuado del peso total de la edificación, de acuerdo con su uso y capacidad de sobrecarga.

En contraste con los resultados obtenidos por (Quispe Rojas & Rojas Arquiniño, 2020) que reportaron una mejora en la respuesta dinámica de la estructura con una reducción de derivas del 3.86% en la dirección X y 5.43% en la dirección Y, y en los desplazamientos laterales una disminución del 3.86% y 3.08% en las direcciones X e Y respectivamente, el presente estudio muestra resultados más significativos. Esta discrepancia se atribuye principalmente a la mayor rigidez inherente de la estructura evaluada en el estudio anterior y al menor factor de relación de masa considerado, lo que limitó la efectividad de la reducción de desplazamientos y derivas.

### **Conclusiones**

De acuerdo con los objetivos planteados en la presente investigación, se han alcanzado las siguientes conclusiones, las cuales proporcionan una respuesta sólida y coherente a lo propuesto inicialmente, fundamentadas en los resultados obtenidos.

1. Los parámetros establecidos para el diseño del AMS han demostrado influir positivamente en la respuesta dinámica de la estructura, validando su optimización y cumplimiento con uno de los objetivos específicos planteados. Esto se debe a que el AMS agrega masa, rigidez y amortiguamiento a la edificación, mejorando significativamente su comportamiento frente a cargas sísmicas.
2. La incorporación del AMS en la idealización de la estructura propuesta de 15 niveles demostró una mejora significativa en su respuesta dinámica, dado que el AMS proporciona amortiguamiento y rigidez adicionales, lo que reduce tanto los desplazamientos laterales como las derivas máximas de entrepiso. Las mejoras

alcanzadas en los desplazamientos laterales fueron del 20.02% y 21.70% para las direcciones X e Y, respectivamente. En cuanto a las derivas máximas de entrepiso, se observó una mejora de hasta 53.70% y 47.91% en el último nivel de la estructura, también en las direcciones X e Y, respectivamente.

## Referencias

- Aldama, A., Gómez, C., & Guillén, B. (2007). *ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA*. San José.
- Alhuay, M., & Arco, A. (2021). *Desplazamientos Laterales de Edificios Aportados de Concreto Armado, analizando el Cambio de Geometría del Diafragma en Andahuaylas, Apurimac - 2021*. Apurimac.
- Aliante Aravena, E. J. (2009). *Control de Efectos Torsionales en un Edificio Asimétrico de Hormigón Armado con Amortiguadores de Masa Sintonizados*.
- Álvarez, V. E. (2015). *El Terremoto del 31 de mayo del 1970 y el estado peruano: mitigación de riesgos y plan de reconstrucción urbana para las zonas afectadas por la catástrofe*. Lima.
- Ambrosini, D., Cuitiño, G., & Rebeco, J. (2004). Eficiencia de Amortiguadores de Masa Sintonizados en Estructuras Sismorresistentes. *Mecánica Computacional*, 447-462.
- Arbizu Pillaca, M. O. (2022). *Respuesta Sísmica de una edificación de 15 niveles con amortiguador de masa sintonizada en el distrito del Tambo-Junin*. Huancayo.
- Arias Gómez, J., Villasís Keever, M., & Miranda Novales, M. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 201-206. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=486755023011>
- Blanco Blasco, A. (1990). *Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado*.
- Borja Suárez, M. (2016). *Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros*. Chiclayo.
- Breshi, L., & Castillo, A. (2015). Uso de amortiguador de masa sintonizada en ingeniería estructural: edificio parque araucano en santiago de chile. *Dirección de publicaciones Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*. doi:<http://dx.doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.234>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2011). Protección Sísmica de Estructuras Sistema de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. *Corporación de Desarrollo Tecnológico*, pág. 13.
- Centro Terwilliger de Innovación en Vivienda Perú. (2018). *SITUACIÓN DE LA VIVIENDA PARA LA BASE DE LA PIRÁMIDE*. Lima. Obtenido de EL CENTRO TERWILLIGER DE INNOVACIÓN EN VIVIENDA PERÚ.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. Pearson Educación.

- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). *Principle of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press.
- Connor, J. J. (2003). *Introduction to Structural Motion Control*. Prentice Hall Pearson Education.
- Gutiérrez Rodríguez, O. M. (2016). *Estudio Comparativo para determinar la eficiencia y aplicabilidad de los aisladores sísmicos de base y diagonales con amortiguadores, como sistema de protección sísmica en edificios de acero en la ciudad de Quito*.
- Hernandez Mendoza, S., & Duana Avila, D. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 51-53. doi:<https://doi.org/10.29057/icea.v9i17.6019>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGRAW-HILL / Interamericana Editores.
- Huerta Ramírez, L. C. (2017). *Análisis Comparativo del comportamiento estructural del CPU-UNASAM con disipadores de energía de fluido viscoso*.
- Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2019). *Damping Technologies for tall buildings*. Matthew Deans.
- López, P. L. (2004). Población Muestra y Muestreo. *Punto Cero*, 69-74. Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&nrm=iso)
- Lozada Ramos, H. G., & Rivera Alfaro, F. F. (2021). *Reducción de desplazamientos Laterales en edificios con sistema estructural de pórticos de 7 a 10 pisos utilizando amortiguadores de masa sintonizada*. Arequipa.
- Matos Nuñez, J. (2024). *Influencia de la incorporación de amortiguadores de masa sintonizada en una edificación multifamiliar de 15 pisos con 2 sótanos, ubicado en El tambo - Huancayo*. Huancayo.
- Pittí, R. B. (2013). Estado del arte de los sistemas de protección sísmica para edificios. *Core*, 26.
- Quispe Rojas, J. A., & Rojas Arquiñigo, A. J. (2020). *Mejoramiento de la respuesta dinámica en un edificio de 26 niveles incorporando amortiguadores de masa sintonizada en Jesús María*. Lima.
- Reboredo, A. B. (1996). *El análisis dinámico de construcciones sismo resistentes*. Mendoza.
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Fondo Editorial Euniversidad EAFIT.

- Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A., & Chung, R. (1996). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Wiley Online Library*. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199706\)26:6%3C617::AID-EQE664%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199706)26:6%3C617::AID-EQE664%3E3.0.CO;2-Z)
- Salinas Basualdo, R. (2019). *Fundamentos del Análisis Dinámico de Estructuras*. Lima: CISMID-FIC-UNI.
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2020). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima.
- Warburton, G. B. (1982). Warburton, G.B. (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. , 10, 381-401. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 381-401.