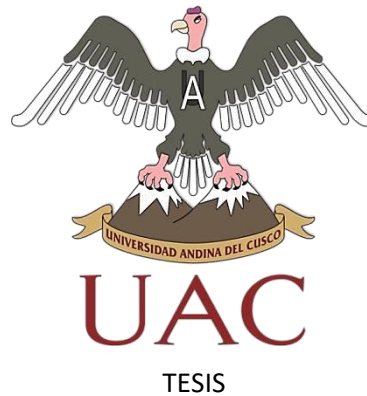




UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL PABELLÓN DE
INGENIERÍA DE LA UAC, SIN Y CON AISLADORES DE BASE Y
AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO SOMETIDOS A VIBRACIONES
ALEATORIAS**

Presentado por:

Bach. Becerra Acurio, Nuria Nataly

Bach. Valencia Pezo, Alvaro Eduardo

Para Optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Asesor:

Dr. Ing. Pezo Zegarra, Eliot

CUSCO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi padre, quien me enseñó lo que es perseverancia y la humildad, *“aunque las cosas se vean negras jamás rendirse, porque nada es imposible si te esfuerzas lo suficiente”*.

Becerra Acurio, Nuria

Esta tesis se la dedico a mi mamá, por su paciencia, por todo su apoyo y por no perder las esperanzas en mí, y a mi familia en general

Valencia Pezo, Alvaro



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los que nos apoyaron e incentivaron a culminar la presente tesis en especial a:

Dr. Ing. Eliot Pezo Zegarra, nuestro asesor por su apoyo incondicional, y su gran paciencia.

Julio Valencia Jimenez y Apolinaria Pezo Díaz, por su ímpetu y presión.

Sadam Hoosien Ayma V., por su jovialidad al momento de darnos ánimos a seguir adelante.



RESUMEN

El sismo es un fenómeno natural que produce gran destrucción en cualquier zona, los desastres son dependientes de su **intensidad** y **magnitud**; mitigar este efecto en cualquier estructura es campo de acción de la Ingeniería Civil a nivel mundial. El Perú es parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, debido al fenómeno de subducción entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, además presenta una sismicidad por fallas geológicas corticales, por tal razón, está expuesto a movimientos sísmicos que ocasionan daño estructural y pérdida de vidas. En la presente tesis se hace uso del análisis dinámico tiempo historia **“Fast no lineal”**, para los controladores sísmicos empleados (**aislador elastomérico con núcleo de plomo y disipador de fluido viscoso**), utilizando el software ETABS-2017 al bloque “B” del pabellón de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Andina del Cusco (UAC), sometido a 7 sismos reales, ocurridos en lugares con idéntica zona sísmica, los que fueron debidamente escalados; sismos sintéticos de comportamiento armónico y aceleraciones espectrales de la (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018) Diseño Sismorresistente. La estructura es analizada dinámicamente en **tres condiciones Base Fija, Base Aislada y Base Aislada con Amortiguamiento Viscoso**. Para el análisis de la estructura con base fija se utiliza la Norma E.030 Diseño Sismorresistente, (2018, para la estructura con base aislada, se utiliza la Norma E.031 Aislamiento Sísmico, (2019) Aislamiento Sísmico, y para la estructura con Base Aislada y Amortiguamiento Viscoso, se utiliza como complemento Norma UBC 97, (1997), con el objetivo de comparar la respuesta sísmica de la estructura de base aislada y estructura de base aislada con amortiguador viscoso, respecto de la estructura de base fija, llegando a determinar su **periodo natural** de vibración de la estructura de base fija en 0.653s en la dirección Y-Y, mientras que en el eje X-X es de 0.49s; Para la estructura aislada y aislada incorporada con amortiguamiento viscoso se determinó un periodo natural de vibración de 2.89s en la dirección Y-Y y en el eje X-X es de 2.76s. La respuesta de la estructura en términos de **fuerzas cortantes** se ven reducidas para la estructura con base aislada hasta en un 82.66% en el eje “Y” y 84.97% para el eje “X”. Para la estructura de base aislada incorporada con amortiguamiento viscoso en la base, se reduce hasta en un 77.15% en el eje “Y” y 84.92% en el eje “X” respecto de base fija. El **desplazamiento absoluto** del sistema de base aislada aumenta en un 1499.79% en el eje “X” y 1208.80% en el eje “Y” y en la estructura con aisladores con amortiguador viscoso, aumenta en 1499.79% en el eje “X” y 1120.61% en el eje “Y” respecto a la estructura de base fija correspondiente al primer nivel de entrepiso. En relación con los **desplazamientos**



relativos, el modelo de base aislada disminuye hasta en un 80.76% en el eje “X” y 70.66% en el eje “Y”; y para el modelo con aisladores incorporado con amortiguador viscoso, disminuye hasta en un 81.11% en el eje “X” y 62.87% en el eje “Y”. Llegando a la conclusión principal que la mejor respuesta sísmica la tiene el sistema de base aislada sin complemento alguno. El **factor de Amortiguamiento** para la estructura de Base Fija es de 4.67% en el Eje “X” y de 5.01% en el eje “Y”, en la estructura de Base Aislada es de 14.55% en el eje “X” y de 15.36% en el eje “Y” y en la Estructura de Base Aislada Amortiguada es de 14.45% en el eje “X” y de 15.08% en el eje “Y”.

Palabras Clave: Rápido no Lineal, Intensidad, Magnitud, Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo, Disipador de Fluido Viscoso.



ABSTRACT

The earthquake is a natural phenomenon that produces great destruction in populated areas where the knowledge of vibration control is insipient, disasters are dependent on their intensity and magnitude; Mitigating this effect in any structure is the field of action of Civil Engineering worldwide. Peru is part of the Pacific Ring of Fire, due to the subduction phenomenon between the Nazca and South American tectonic plates, it also presents seismicity due to cortical geological faults, for this reason, it is exposed to seismic movements that cause structural damage and loss of lives. In this thesis, the dynamic analysis time history “Fast non-linear” is used for the seismic controllers used (elastomeric isolator with lead core and viscous fluid dissipator), using the ETABS-2017 software to block “B” of the pavilion from the Faculty of Engineering and Architecture of the Andean University of Cusco (UAC), subjected to 7 real earthquakes, which occurred in places with the same seismic zone, which were duly scaled; Synthetic earthquakes with harmonic behavior and spectral accelerations of (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018) Seismic-resistant Design. The structure is dynamically analyzed in three conditions Fixed Base, Insulated Base and Insulated Base with Viscous Damping.

For the analysis of the structure with a fixed base, (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018) is used, for the structure with an isolated base, (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019) Seismic Isolation is used, and for the structure with an Insulated Base and Viscous Damping, is used as a complement (Norma UBC 97, 1997), with the objective of comparing the seismic response of the isolated base structure and the isolated base structure with viscous damper, with respect to the fixed base structure, determining its Natural period of vibration of the fixed base structure at 0.653s in the YY direction, for the isolated and isolated structure incorporated with viscous damping, a natural period of vibration of 2.89s was determined in the YY direction. The response of the structure in terms of shear forces is reduced for the structure with insulated base up to 82.97% in the "Y" axis and 88.30% for the "X" axis. For the insulated base structure incorporated with viscous damping in the base, it is reduced up to 82.88% in the “Y” axis and 88.39% in the “X” axis compared to the fixed base. The absolute displacement of the insulated base system increases by 1499.79% in the “X” axis and 1208.80% in the “Y” axis and in the structure with viscous damper insulators, it increases by 1546.31% in the “X” axis and 1120.61% on the “Y” axis with respect to the fixed base structure corresponding to the first mezzanine level. In relation to the relative displacements, the isolated base model decreases up to 80.76% in the “X” axis and 70.66% in the “Y” axis; and for the model with insulators incorporated with viscous damper, it decreases up to 81.11% on the “X”



axis and 62.87% on the “Y” axis. Reaching the main conclusion that the best seismic response is the isolated base system without any complement.

Key Words: Fast Nonlinear, Intensity, Magnitude, Lead Core Elastomeric Insulator, Viscous Fluid Dissipator.



INTRODUCCIÓN

El Perú se encuentra sobre la placa Sud Americana, que juntamente con la placa de Nazca forman parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, es por ello, la importancia del uso de mecanismos de control de vibraciones en las estructuras. A consecuencia de ello, en el año 2018 en el Perú se aprueba por decreto supremo N°030–2019-VIVIENDA la norma E.031 “Aislamiento Sísmico” la cual nos brinda el procedimiento para poder diseñar aisladores; dentro de los dispositivos de aislamiento el más usado es el Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo. En la (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018), nos indica, que para edificios de categoría A1 (Edificaciones Esenciales) en Zonas 3 y 4, se utilicen obligatoriamente dispositivos de aislamiento sísmico.

Un edificio de categoría A2 como el pabellón de Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC, al tener un diseño sin aislamiento sísmico, éste acepta daño y pérdida de funcionalidad; incluso si se considera sobre resistencia. Todas las normas de los países cuya sismicidad es alta aceptan los daños a la estructura al ser sometidos a sismos severos. Económicamente, es imposible, darle al edificio, la resistencia requerida frente a un sismo severo; incluso si se diera el caso de cuidar la estructura, no se podría asegurar el bienestar y/o confort de su contenido, por lo que se quiere asegurar la funcionalidad continúa traduciendo los objetivos del desempeño frente a los fenómenos sísmicos, materializándolos en procesos y restricciones; el que tendrá requisitos mínimos, metodología de análisis y diseño respaldada por normativa vigente.

Los aisladores y disipadores son dispositivos utilizados y patentados en varios países tales como: Chile, México, Estados Unidos, Japón como sistemas de protección sísmica de edificaciones.

Experiencias de uso de los dispositivos de control de vibración en el Perú, se presentan en los edificios como es el caso de las oficinas de Graña y Montero ubicada en Miraflores, Lima o la biblioteca de la UNI SMP-Lima o el Hospital Regional de Moquegua que presenta 6 bloques aislados demuestran la eficiencia de los dispositivos de control sísmico logrando reducir de manera significativa los daños (Antisismica, 2020).

Tomando estos antecedentes la presente investigación lleva por título “Evaluación Comparativa de la Respuesta Sísmica del Pabellón de Ingeniería de la UAC, sin y con Aisladores de Base y Amortiguadores de Fluido Viscoso sometidos a Vibraciones Aleatorias”.

Recientes sismos ocurridos en países pioneros en el desarrollo del control de vibraciones, han mostrado que los edificios diseñados y construidos de acuerdo con las normas técnicas más recientes proveen una buena respuesta sísmica, pero el tiempo y costo de reparación de los daños son grandes y costosas. Diversos esfuerzos en Estados Unidos, Japón y Rusia, se han



centrado en desarrollar criterios de diseño sísmico y procedimientos para asegurar objetivos específicos de desempeño estructural; el incremento en las fuerzas de diseño no mejora todos los aspectos del desempeño. Tres técnicas innovadoras han sido propuestas para usarse individualmente o en combinación, con la finalidad de mejorar el desempeño sísmico de los edificios: aislamiento sísmico, dispositivos suplementarios de disipación de energía y control estructural activo o híbrido (Sanches, 2016)

En el desarrollo de la presente tesis se realizó una evaluación comparativa, del sistema estructural convencional con y sin aislador elastomérico con núcleo de plomo y adicionalmente incorporando amortiguadores; comparando y observando las magnitudes de los parámetros de Respuesta Sísmica utilizando para su respectivo análisis la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E.030-2018, la norma peruana de aislación sísmica E.031 y la norma UBC-97 para el diseño de los amortiguadores mediante un modelamiento estructural con el software ETABS 2017, del cual se obtuvieron resultados que fueron analizados. Las tesis que se usaron como antecedentes, consideran un análisis comparativo entre el reforzamiento tradicional con placas y otro con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, amortiguadores magneteoreológicos, evaluación de la respuesta sísmica en función a la altura del edificio entre otros, y concluyen que el uso de los dispositivos actuando de forma independiente, otorgan mayor seguridad frente a un sismo siendo beneficioso en reparación post-sismo en comparación con el reforzamiento convencional de muros estructurales (placas).

El objetivo principal de la investigación fue evaluar comparativamente la respuesta sísmica de una edificación con y sin aisladores elastoméricos con núcleo de plomo y adicionado con amortiguador respecto al edificio convencional, contrastando en función de las magnitudes de los parámetros de respuesta sísmica. El desarrollo de la presente tesis de investigación consta de los capítulos mostrados a continuación.

Capítulo I: Planteamiento del Problema: Se describe el problema tanto general como los específicos, las justificaciones, los objetivos, las hipótesis, las variables, y las limitaciones de la investigación.

Capítulo II: Marco Teórico: En este capítulo, se presentan investigaciones relacionadas con el tema tomadas como antecedentes, así también se desarrollan los aspectos teóricos pertinentes.

Capítulo III: Metodología: En este capítulo, se señala el tipo, el nivel y método de la investigación, se indica también el diseño de la investigación, la población y la muestra, los instrumentos de recolección de datos e instrumentos de ingeniería, sus procedimientos respectivos, análisis de datos y el flujograma de ingeniería.



Capítulo IV: Resultados: Se desarrolló el análisis e interpretación de los resultados, para corroborar las hipótesis y cumplir los objetivos planteados. En éste se presenta resúmenes de los resultados obtenidos.

Capítulo V: Discusión: Este capítulo indica el contraste de los resultados con el marco teórico, comentarios de los resultados, aporte de la investigación, las conclusiones, recomendaciones producto de la investigación, los anexos y apéndices.



ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I: Planteamiento Del Problema	- 20 -
1. Identificación Del Problema	- 20 -
1.1. Descripción del problema.....	- 20 -
1.2. Formulación interrogativa del problema.....	- 22 -
1.2.1. Formulación interrogativa del problema general.	- 22 -
1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos.....	- 22 -
2. Justificación e importancia de la investigación	- 23 -
2.1. Justificación técnica.....	- 23 -
2.2. Justificación social.	- 24 -
2.3. Justificación por viabilidad.	- 24 -
2.4. Justificación por relevancia.	- 25 -
3. Limitaciones de la investigación	- 25 -
3.1. Primera limitación de lugar.	- 25 -
3.2. Segunda limitación de caso de estudio y análisis	- 25 -
3.3. Tercera limitación normativa.	- 26 -
3.4. Cuarta limitación procedencia de datos.	- 26 -
3.5. Quinta limitación caracterización de la estructura	- 27 -
4. Objetivos de la investigación	- 27 -
4.1. Objetivo general.	- 27 -
4.2. Objetivos Específicos.....	- 27 -
CAPITULO II: Marco Teórico	- 29 -
1. Antecedentes de la tesis.	- 29 -
1.1. Antecedentes a nivel nacional.....	- 29 -
1.2. Antecedentes a nivel internacional.	- 31 -
2. Aspectos teóricos pertinentes.....	- 33 -
2.1. Fallas activas y sismicidad en la ciudad del Cusco.	- 33 -
2.2. Aspectos de sismología	- 33 -



2.2.1. Magnitud	- 33 -
2.2.2. Intensidad.....	- 33 -
2.2.3. Duración efectiva de un sismo.....	- 34 -
2.2.4. Sismicidad.....	- 34 -
2.3. Dinámica estructural.	- 34 -
2.3.1. Introducción.	- 34 -
2.3.2. Conceptos de dinámica estructural	- 35 -
2.3.3. Ecuaciones de movimiento y métodos de solución.	- 36 -
2.3.4. Vibración Libre.....	- 37 -
2.3.5. Vibración libre amortiguado.	- 39 -
2.3.6. Vibración forzada.....	- 44 -
2.3.7. Respuesta Sísmica de sistemas lineales	- 50 -
2.4. Definición de la acción sísmica utilizando normativas.....	- 54 -
2.4.1. Normativa Sismorresistente Chilena Nch-433/96.....	- 54 -
2.4.2. Normativa Sismorresistente Mexicana	- 55 -
2.4.3. Normativa Sismorresistente Peruana E.030	- 56 -
2.4.4. Norma Técnica E. 031 Aislamiento Sísmico	- 64 -
2.4.5. Uniform Building Code (UBC)	- 72 -
2.5. Aisladores sísmicos.....	- 74 -
2.5.1. Introducción	- 74 -
2.5.2. Tipos de aisladores	- 75 -
2.6. Amortiguadores	- 82 -
2.7. Análisis Rápido No Lineal (Fast No Lineal)	- 84 -
2.8. Vectores Ritz y Eigen	- 84 -
2.8.1. Vectores propios.....	- 84 -
2.8.2. Vectores Ritz.....	- 85 -
2.8.3. Diferencia entre vectores Eigen y Ritz	- 85 -
2.9. Escalamiento de sismos.....	- 86 -
2.9.1. Factor de escala	- 86 -
2.9.2. Gráfico de resumen de sismos.....	- 86 -
2.9.3. Criterios de escalamiento de acelerogramas.....	- 86 -
2.9.4. Método simplificado para evaluar la confiabilidad del escalamiento.....	- 87 -
2.9.5. Número mínimo de aceleraciones.....	- 87 -
2.9.6. Procedimiento de análisis.....	- 88 -



3. Hipótesis	- 89 -
3.1. Hipótesis General	- 89 -
3.2. Sub Hipótesis	- 89 -
4. Definición de Variables	- 90 -
4.1. Variables Independientes	- 90 -
4.2. Variables dependientes	- 90 -
4.3. Cuadro de operacionalización de variables	- 90 -
CAPITULO III: Metodología	- 94 -
1. Metodología de la investigación	- 94 -
1.1. Enfoque de la investigación	- 94 -
1.2. Nivel o alcance de la investigación	- 94 -
1.3. Método de investigación	- 94 -
2. Diseño de la investigación	- 94 -
2.1. Diseño metodológico	- 94 -
2.2. Diseño de Ingeniería	- 94 -
3. Población y muestra	- 96 -
3.1. Población	- 96 -
3.1.1. Descripción de la población	- 96 -
3.1.2. Cuantificación de la población	- 96 -
3.2. Muestra	- 96 -
3.2.1. Descripción de la muestra	- 96 -
3.2.2. Cuantificación de la muestra	- 97 -
3.2.3. Método de muestreo	- 97 -
4. Instrumentos	- 97 -
3.4.1. Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos	- 97 -
3.4.2. Instrumentos de ingeniería	- 98 -
5. Procedimientos de recolección de datos	- 99 -
5.1. Metrado De Cargas	- 99 -
6. Procedimientos de Análisis de datos	- 100 -



6.1. Modelado	- 100 -
6.2. Determinación De Irregularidades	- 108 -
6.2.1. Irregularidades En Altura	- 108 -
6.2.2. Irregularidades En Planta.....	- 100 -
6.3. Determinación del Sistema Estructural	- 96 -
6.4. Proceso para escalar los sismos	- 97 -
6.5. Definición de Casos para utilizar	- 111 -
6.6. Diseño De Aisladores Elastoméricos.....	- 113 -
6.7. Modelamiento del aislador	- 149 -
6.8. Diseño de los amortiguadores.....	- 150 -
6.9. Modelamiento Del Amortiguador	- 152 -
CAPITULO IV: RESULTADOS	- 154 -
1. Análisis Tiempo Historia con Sismos Reales	- 154 -
1.1. Desplazamientos Máximos Relativos y Absolutos.....	- 154 -
1.2. Derivas Máximas de Entrepiso	- 156 -
1.3. Aceleraciones Máximas de Entrepiso.....	- 156 -
1.4. Fuerzas Cortantes Máximas de Entrepiso	- 157 -
1.5. Periodo y Frecuencia	- 158 -
1.6. Modos de Vibración	- 159 -
1.7. Factor de Amortiguamiento	- 162 -
1.8. Curva de Resonancia en desplazamientos.....	- 163 -
CAPITULO V: DISCUSIÓN	- 147 -
GLOSARIO.....	- 149 -
CONCLUSIONES	- 152 -
RECOMENDACIONES	- 154 -
REFERENCIAS.....	- 155 -
ANEXOS 01: LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN EN CAMPO.....	- 158 -
ANEXOS 02: ELABORACION DE MAQUETA PARA MARCO TEORICO	- 160 -



ANEXOS 03: MATRIZ DE CONSISTENCIA	- 147 -
ANEXIOS 04: CURVA HISTERETICA DE AISLADORES.....	- 147 -
ANEXO05: TURNITIN	- 148 -
ANEXO 05: UBICACIÓN DE LOS AISLADORES	- 147 -
ANEXO 06: UBICACIÓN DE LOS AMORTIGUADORES	- 148 -
APÉNDICES	- 147 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	- 56 -
Tabla 2	- 56 -
Tabla 3	- 57 -
Tabla 4:	- 57 -
Tabla 5	- 57 -
Tabla 6	- 58 -
Tabla 7	- 59 -
Tabla 8	- 59 -
Tabla 9	- 64 -
Tabla 10.....	- 74 -
Tabla 11	- 88 -
Tabla 12	- 98 -
Tabla 13:.....	- 96 -
Tabla 14	- 97 -
Tabla 15	- 98 -
Tabla 16.....	- 100 -
Tabla 17.....	- 102 -
Tabla 18	- 114 -
Tabla 19	- 115 -
Tabla 20	- 115 -
Tabla 21	- 146 -
Tabla 22	- 148 -
Tabla 23	- 150 -
Tabla 24	- 154 -
Tabla 25	- 155 -



Tabla 26	- 156 -
Tabla 27	- 156 -
Tabla 28.....	- 157 -
Tabla 29.....	- 158 -
Tabla 30	- 159 -
Tabla 31	- 160 -
Tabla 32.....	- 162 -
Tabla 33.....	- 147 -
Tabla 34.....	- 147 -
Tabla 35	- 147 -



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica del Distrito de San Jerónimo (fuente: ArcGis.com).....	- 21 -
Figura 2: Pabellon de Ingenierias y Arquitectura por Bloques de la UAC	- 26 -
Figura 3: Marco cortante de 2 niveles	- 37 -
Figura 4: Modelo matemático idealizado de un sistema de 1 grado de libertad (Bozzo et al, 2000) -	38 -
Figura 5: Movimiento Libre Amortiguado	- 40 -
Figura 6: Vibración libre de un sistema no amortiguado debido a un desplazamiento inicial arbitrario . -	41 -
Figura 7: Vibración libre de un sistema no amortiguado en su primer modo de vibración natural ..	- 41 -
Figura 8: Vibración de un sistema no amortiguado en su segundo modo de vibración natural.....	- 42 -
Figura 9: Sistema masa-resorte-amortiguador	- 45 -
Figura 10: Curva de espectro de respuesta para diferentes valores de amortiguamiento	- 45 -
Figura 11: Esquema de un instrumento para medir vibraciones	- 48 -
Figura 12: Amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez.....	- 49 -
Figura 13: Valores máximos de los desplazamientos laterales y fuerzas estáticas equivalentes laterales asociadas con el n-ésimo modo (Chopra et al, (2014)).....	- 54 -
Figura 14: Zonas Sísmicas (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018).....	- 56 -
Figura 15: figura representativa del aislador de base de fricción	- 76 -
Figura 16: Sistema pendular friccionante FPS.....	- 76 -
Figura 17: Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LRD).....	- 77 -
Figura 18: Aisladores elastoméricos de caucho de alto amortiguamiento (HDR).....	- 82 -
Figura 19: Amortiguadores fluido viscosos.....	- 83 -
Figura 20: turas de las grillas (ETABS 17).....	- 100 -
Figura 21: Definición de Ejes en Planta (ETABS 17)	- 100 -
Figura 22: Definición de Concreto de $f_c=250\text{kg/cm}^2$ (ETABS 17)	- 101 -
Figura 23: Definición de las propiedades del acero G60 (ETABS 17)	- 101 -
Figura 24: Creación de cada tipo de Columna (ETABS 17).....	- 102 -
Figura 25: Creación de las vigas (ETABS 17).....	- 102 -
Figura 26: Definición de Losa Aligerada (ETABS 17)	- 103 -
Figura 27: Definición de Losa Maciza (ETABS 17)	- 103 -
Figura 28: Definición de losa inclinada en escaleras (ETABS 17).....	- 104 -
Figura 29: Definición de losa para cubiertas (ETABS 17)	- 104 -
Figura 30: Definición las Secciones de Placa (ETABS 17).....	- 105 -
Figura 31: Render del Modelado completo (ETABS 17)	- 105 -
Figura 32: Asignación de Diafragmas por nivel (ETABS 17)	- 106 -



Figura 33: Asignación de las cargas de diseño (ETABS 17)	- 106 -
Figura 34: Cargas del modelo (ETABS 17).....	- 107 -
Figura 35: Espectro Sísmico (ETABS 17).....	- 107 -
Figura 36: Paquetes de carga, por norma y envolvente (ETABS 17).....	- 108 -
Figura 37: Vista en elevación Fuente Propia	- 99 -
Figura 38: Las columnas y placas paralelos entre sí.	- 103 -
Figura 39: Fuerzas Cortantes Y Momentos para las Columnas en Tn Nivel 1 (ETABS 17).....	- 96 -
Figura 40: Fuerzas Cortantes y Momentos para las Placas en Tn Nivel 1 (ETABS 17)	- 96 -
Figura 41: CISMID, registro sísmico de aceleraciones.	- 97 -
Figura 42: Registros Sísmicos Extraídos de CISMID.....	- 97 -
Figura 43: Sismo de diseño, de la estación: La Punta - Callao (CISMID, corregido por línea base)-	98 -
Figura 44: Definimos es Espectro Normativo para escalar Sismos (SeismoMatch)	- 98 -
Figura 45: Cargamos el sismo a escalar(SeismoMatch)	- 99 -
Figura 46: Se escalan sismos del análisis tiempo-historia (SeismoMatch)	- 99 -
Figura 47: Comparación Espectros Escalado, Normativo y Real de Caraveli EW	- 100 -
Figura 48: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Caraveli NS	- 100 -
Figura 49: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Santo Tomás EW	- 100 -
Figura 50: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Santo Tomás NS.....	- 101 -
Figura 51: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Tambomachay EW.....	- 101 -
Figura 52: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Tambomachay NS.....	- 101 -
Figura 53: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Ica EW	- 102 -
Figura 54: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Ica NS	- 102 -
Figura 55: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Pampamarca EW	- 102 -
Figura 56: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Pampamarca NS	- 103 -
Figura 57: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Lagunas (Iquitos) EW.	- 103 -
Figura 58: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Lagunas (Iquitos) NS.	- 103 -
Figura 59: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Puno EW.....	- 104 -
Figura 60: Comparación Espectro Escalado, Normativo y Real de Puno NS.....	- 104 -
Figura 61: Sismos Escalados Subidos al software (ETABS 17)	- 104 -
Figura 62: Análisis T.H. Con Sismos escalados	- 105 -
Figura 63: Acelerograma Ica EW	- 105 -
Figura 64: Acelerograma Ica NS	- 105 -
Figura 65: Acelerograma Caraveli EW	- 106 -
Figura 66: Acelerograma Caraveli NS	- 106 -
Figura 67: Acelerograma Pampamarca EW	- 106 -



Figura 68: Acelerograma Pampamarca NS	- 107 -
Figura 69: Acelerograma Puno- La Paz EW.....	- 107 -
Figura 70: Acelerograma Puno- La Paz NS.....	- 107 -
Figura 71: Acelerograma Santo Tomás EW	- 108 -
Figura 72: Acelerograma Santo Tomás NS	- 108 -
Figura 73: Acelerograma Tambomachay EW	- 108 -
Figura 74: Acelerograma Tambomachay NS	- 109 -
Figura 75: Acelerograma Lagunas EW	- 109 -
Figura 76: Acelerograma Lagunas NS	- 109 -
Figura 77: Excitaciones armónicas con amplitud de 1.125g con diferente Periodo (ETABS 17)	- 110 -
Figura 78: Análisis T.H. para las funciones armónicas (ETABS 17)	- 110 -
Figura 79: Modelo en 3D de la dirección de los sismos caso 1	- 111 -
Figura 80: Modelo en 3D de la dirección de los sismos caso 2	- 111 -
Figura 81: Funciones T.H. (ETABS 17).....	- 112 -
Figura 82: Análisis FNA Tiempo Historia (ETABS 17).....	- 112 -
Figura 83: Definimos la función pulso en el T.H (ETABS 17)	- 113 -
Figura 84: Análisis FNA Pulso (ETABS 17).....	- 113 -
Figura 85: Eje local X, correspondiente al eje Z (ETABS 17).....	- 149 -
Figura 86: Ejes locales U2 y U3, de los ejes laterales (ETABS 17).	- 149 -
Figura 87: Asignación de los 15 Aisladores (ETABS 17)	- 150 -
Figura 88: Asignación Propiedades al Amortiguador (ETABS 17).....	- 152 -
Figura 89: Distribución de los aisladores (LRB) en 3D.....	- 153 -
Figura 90: Comparación Desplazamientos Máximos Relativos	- 154 -
Figura 91: Comparación Desplazamientos máximos Absolutos	- 155 -
Figura 92.....	- 157 -
Figura 93: Comparación Fuerzas Cortantes máximas de Entrepiso.....	- 158 -
Figura 94: Comparación Primer Modo de Vibración Eje "Y"	- 159 -
Figura 95: Comparación Segundo Modo de Vibración Eje "Y"	- 160 -
Figura 96: Comparación Tercer Modo de Vibración Eje "Y"	- 160 -
Figura 97: Comparación Primer Modo de Vibración Eje "X"	- 161 -
Figura 98: Comparación Segundo Modo de Vibración Eje "X"	- 161 -
Figura 99: Comparación Tercer Modo de Vibración Eje "X"	- 161 -
Figura 100: Comparación Decremento Logarítmico para Eje "Y"	- 162 -
Figura 101: Comparación Decremento Logarítmico para Eje "X"	- 162 -
Figura 102: Comparación Resonancia Estructural en D. Relativos Cuarto Nivel Eje X	- 163 -



Figura 103: Comparación Resonancia Estructural en D. Relativos Cuarto Nivel Eje Y	- 163 -
Figura 104: Comparación Resonancia Estructural en D. Absolutos Cuarto Nivel Eje X.....	- 164 -
Figura 105: Comparación Resonancia Estructural en D. Absolutos Cuarto Nivel Eje Y	- 164 -
Figura 106: Verificación de medidas de longitud de vanos	- 158 -
Figura 107: Verificación de medidas de altura de vanos	- 158 -
Figura 108: Verificación de medidas de longitud de vanos	- 159 -
Figura 109: Verificación de medidas de la altura de las ventanas	- 159 -
Figura 110: Ensamblaje de maquetas	- 160 -
Figura 111: Ensamblaje de maqueta.....	- 160 -
Figura 112: Ensamblaje de base aislada	- 161 -
Figura 113: Ensayo en la mesa vibratoria.....	- 161 -



CAPITULO I: Planteamiento Del Problema

1. Identificación Del Problema

1.1. Descripción del problema.

El Perú es un país con sismicidad activa, cuya procedencia es el resultado principalmente del fenómeno de subducción, el que se da como consecuencia de la interacción de la placa de Nazca y la placa Sud-americana. En la placa sudamericana se presentan fallas geológicas también llamadas fallas corticales que generan la sismicidad local; en la región Cusco se tienen registrados por lo menos 53 fallas geológicas; de estas cinco se han activado en los últimos años, producto de movimientos terrestres y las violentas lluvias propias del sur del país, presenta fallas geológicas como: Tambomachay, Ccoricocha, Pachatusan, Zurite, Huanacauri, Chincheros, falla Urcos (Benavente et al, 2013). Estas fallas al desprender energía sísmica, generan el fenómeno de movimiento de base en todas las edificaciones de la región afectada; como consecuencia la estructura responde con movimiento lateral en sentido contrario al del suelo por efecto de la Fuerza de Inercia. Los efectos generados en la estructura son directamente proporcionales a la magnitud de los desplazamientos laterales relativos de entrepiso.

Según la literatura técnica actual, existen sistemas de control sísmico, entre los cuales se tienen los aisladores de base y disipadores de energía que reducen considerablemente los desplazamientos laterales relativos y las aceleraciones en las edificaciones. Antecedentes de sismos ocurridos, demuestran que estructuras de base fija son las que presentan desplazamientos laterales relativos considerables, los que en algunos casos llevaron al colapso de las mismas. Existe un daño irreparable en la estructura cuando la frecuencia de vibración de la estructura coincide con las frecuencias de vibración del sismo (fenómeno de resonancia estructural)

El pabellón de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC el mismo que está conformado por 6 bloques; presenta una edificación de base fija, es por esta razón que en el presente trabajo realiza un estudio en un bloque de dicho pabellón con la incorporación de aislador de base de tipo elastomérico con núcleo de plomo de acuerdo a la (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019) y a este último añadido con amortiguador de fluido viscoso en la base de acuerdo con la (Norma UBC 97, 1997) para comparar la respuesta sísmica de cada caso con el sistema de Base Fija, con la finalidad de determinar los beneficios de la incorporación de sistemas de control de vibración (aislador elastomérico con núcleo de plomo y amortiguador de fluido viscoso) frente a estructuras de base fija.



Para el estudio del presente trabajo, se realizó un análisis tiempo historia con 7 registros sísmicos correspondientes a la Zona 2, según (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018). Con respecto al espacio geográfico en donde se realizó la investigación en general, se ubica como parte de la facultad de Ingeniería y arquitectura, ubicada en La Urb. Larapa Grande A-5 en el Distrito de San Jerónimo, Provincia de Cusco, Departamento de Cusco, Perú.

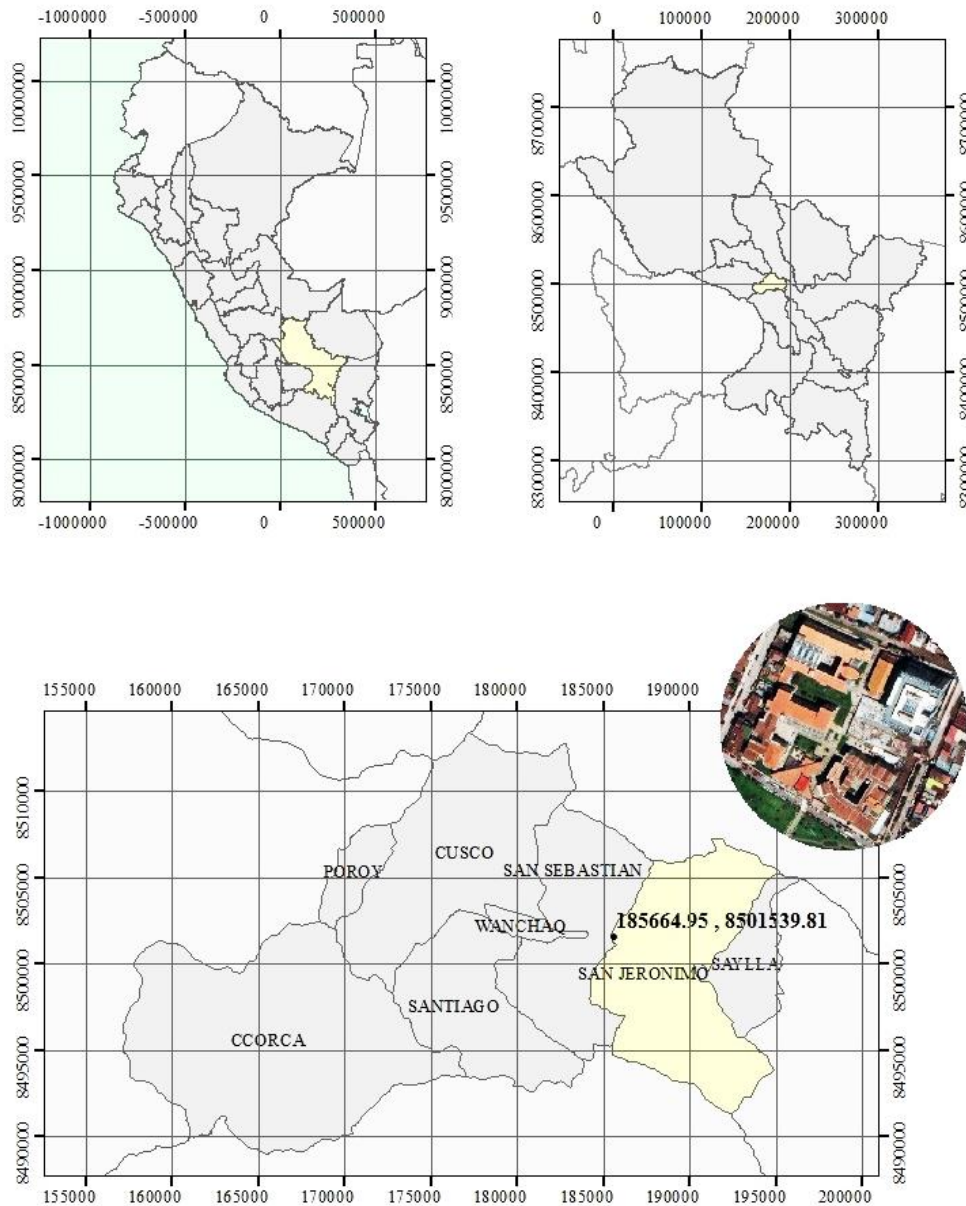


Figura 1: Ubicación geográfica del Distrito de San Jerónimo (fuente: ArcGis.com)

Zona 18 S, E 185664.95, N 8501539.81



1.2. Formulación interrogativa del problema.

1.2.1. Formulación interrogativa del problema general.

¿Cuál será el sistema que simulará mejor un movimiento de cuerpo rígido entre la Estructura de Base Fija, Estructura de Base Aislada con LRB y Estructura de Base Aislada con LRB incorporada con Amortiguador de fluido Viscoso realizando una Análisis Tiempo Historia utilizando Vibraciones Aleatorias (Cargas Sísmicas) en el bloque B de la estructura del Pabellón de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC"?

1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos

Problema específico N ° 01:

¿En qué porcentaje varía la deriva máxima de la estructura con base fija, en relación a la estructura con incorporación de aislador de base del tipo elastomérico con núcleo de plomo, y posteriormente este mismo sistema, adicionando un amortiguador de fluido viscoso; bajo los efectos de movimiento de base con carga sísmica realizando un análisis tiempo historia utilizando Vibraciones Aleatorias (Cargas Sísmicas) según el reglamento nacional (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019) en el bloque B de la estructura del Pabellón de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC"?

Problema específico N ° 02:

¿En qué porcentaje disminuirán las aceleraciones absolutas máximas de la estructura con base fija, en relación a la estructura con incorporación de aislador de base, del tipo elastomérico con núcleo de plomo y posteriormente este mismo sistema, adicionando un amortiguador de fluido viscoso; bajo los efectos de vibraciones aleatorias (Cargas sísmicas) según el reglamento nacional (Norma E.031 Aislamiento sísmico, 2019), en el bloque B de la estructura del Pabellón de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC"?

Problema específico N ° 03:

¿En qué porcentaje varía la Fuerza cortante de entrepiso de la estructura con base fija, en relación a la estructura con incorporación de aislador de base, del tipo elastomérico con núcleo de plomo y posteriormente este mismo sistema, adicionando un amortiguador de fluido viscoso; bajo los efectos de vibraciones aleatorias (carga sísmica) según el reglamento nacional (Norma



E.031 Aislamiento sísmico, 2019), en el bloque B de la estructura del Pabellón de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC?

Problema específico N ° 04:

¿Cuál será la variación de las propiedades dinámicas (periodo, frecuencia y modos de vibración) de la estructura con base fija, en relación con la estructura con incorporación de aislador de base, del tipo elastomérico con núcleo de plomo y posteriormente este mismo sistema, adicionando un amortiguador de fluido viscoso en el bloque B de la estructura del Pabellón de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC?

Problema específico N ° 05:

¿Qué desplazamiento y aceleración tendrá la base en el sistema aislado y aislado amortiguado?

Problema específico N ° 06:

¿Qué factor de amortiguamiento tendrá el sistema de base fija, el sistema de base aislada con LRB y el sistema de base aislada con amortiguador de fluido viscoso?

Problema específico N ° 07:

¿Cuáles serán los desplazamientos absolutos y relativos máximos bajo el efecto de resonancia inducida por vibraciones armónicas en base fija, base aislada con núcleo de plomo y base aislada incorporada con amortiguador de fluido viscoso?

2. Justificación e importancia de la investigación

2.1. Justificación técnica.

La presente investigación se apoya en los estudios de la Ingeniería Civil, dentro de su rama de estructuras, sub-rama de Ingeniería sísmica, en el área del control de vibraciones, cuyos avances tecnológicos en técnicas y dispositivos de sistemas de control de vibraciones son extensos. Para esta investigación se tomó en cuenta los sistemas pasivos de aislamiento de base de tipo neopreno con núcleo de plomo y los amortiguadores de fluido viscoso; los mismos que se sometieron a una evaluación comparativa a través de modelamientos estructurales, utilizando los parámetros de (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018), (Norma E.020 Cargas, 2006) y (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019), (recientemente aprobada), y para el diseño de los amortiguadores se utilizó la norma americana (Norma UBC 97, 1997).



2.2. Justificación social.

La presente investigación toma en cuenta la necesidad de una educación que garantice la seguridad y confort de los estudiantes en la ciudad del Cusco; es en centros de educación donde se concentran gran cantidad de estudiantes y no cuentan con un sistema de control de vibraciones, como es el caso de sistemas de aislamiento de base, que han demostrado ser muy eficaces por experiencia de países vecinos. La utilización de estos dispositivos de control sísmico de aislamiento de base, garantizan la seguridad y confort de los habitantes.

Además, la presente investigación forma parte de la literatura técnica para el aprendizaje y entendimiento de sistemas de control de vibración para los estudiantes de la UAC.

2.3. Justificación por viabilidad.

En la actualidad, los sistemas de control de vibraciones representan una opción viable para la prevención ante un evento telúrico. El país se encuentra en la zona del cinturón de fuego del pacífico, por lo tanto, no se debe hacer caso omiso al peligro que un sismo supone en las estructuras en las que usualmente se concentran una gran cantidad de personas.

En atención a ello, se presenta el siguiente estudio “Evaluación Comparativa de la Respuesta Sísmica del Pabellón de Ingeniería de la UAC, sin y con Aisladores de Base y Amortiguadores de Fluido Viscoso Sometidos a Vibraciones Aleatorias”

Para este estudio se tiene las facilidades para acceder a la información necesaria, la que actualmente es pública, como los planos de estructuras, estos fueron necesarios para el desarrollo de esta tesis. Así mismo se tiene las facilidades para acceder a la estructura, y contrastar de medidas con los planos y las medidas in situ. Se cuenta con las herramientas suficientes y necesarias para la recopilación y procesamiento de datos para hallar los resultados, como son: Microsoft Excel, Grapher 15, SeismoMatch 2018 y ETABS 17. Así como se cuenta con el acervo documentario con respecto a la normativa vigente: (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018), (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019) y (Norma E.020 Cargas, 2006); y para poder reforzar un poco los resultados se cuenta con una maqueta a escala para demostrar el funcionamiento de los aisladores y amortiguadores, sometido a una excitación armónica por medio de una mesa vibratoria.



2.4. Justificación por relevancia.

Esta investigación opto por utilizar los aisladores de base del tipo neopreno con núcleo de plomo por su capacidad de controlar el comportamiento dinámico de las estructuras sin ningún tipo de energía adicional (sistema de control pasivo) cuando son sometidos directamente a la excitación sísmica; debido a los grandes avances tecnológicos en este tema, existe una gran variedad de estos dispositivos que de forma pasiva pueden contribuyen a una mejor respuesta sísmica de la edificación con base aislada. Esta tecnología es desarrollada y usada en países con sismicidad alta para garantizar la continuidad de los servicios de todas las edificaciones y brindar el confort durante el evento sísmico. Es por esta razón que se opta por traer esta tecnología y adaptarla a nuestro medio para reducir los desplazamientos laterales de las edificaciones y brindad el confort de los habitantes de las edificaciones durante el evento sísmico.

3. Limitaciones de la investigación

3.1. Primera limitación de lugar.

La investigación se limitó a un bloque de los seis existentes de la edificación de uso Esencial, de nombre: “Pabellón de la facultad de ingenierías y arquitectura de la universidad andina del Cusco” que se encuentra ubicado en la ciudad del Cusco, en el distrito de San Jerónimo, Urbanización Larapa; el que se escogió para el estudio, es el único que se ajusta a las características recomendadas para el uso de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo debido a que en la diferente literatura revisada recomiendan el uso de aisladores para estructuras sin irregularidad de torsión.

3.2. Segunda limitación de caso de estudio y análisis

La investigación se limitó a estudiar y analizar las magnitudes de las propiedades dinámica de la estructura aislada y de base fija las (frecuencias y modos de vibración), y respuesta sísmica de la edificación (desplazamientos laterales y aceleraciones de los entrepisos) al bloque “B” del pabellón de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura de la UAC. con y sin aisladores de base elastomérico con núcleo de plomo y posteriormente añadiendo a este amortiguador de fluido viscoso mediante un modelamiento estructural en el software ETABS 17.

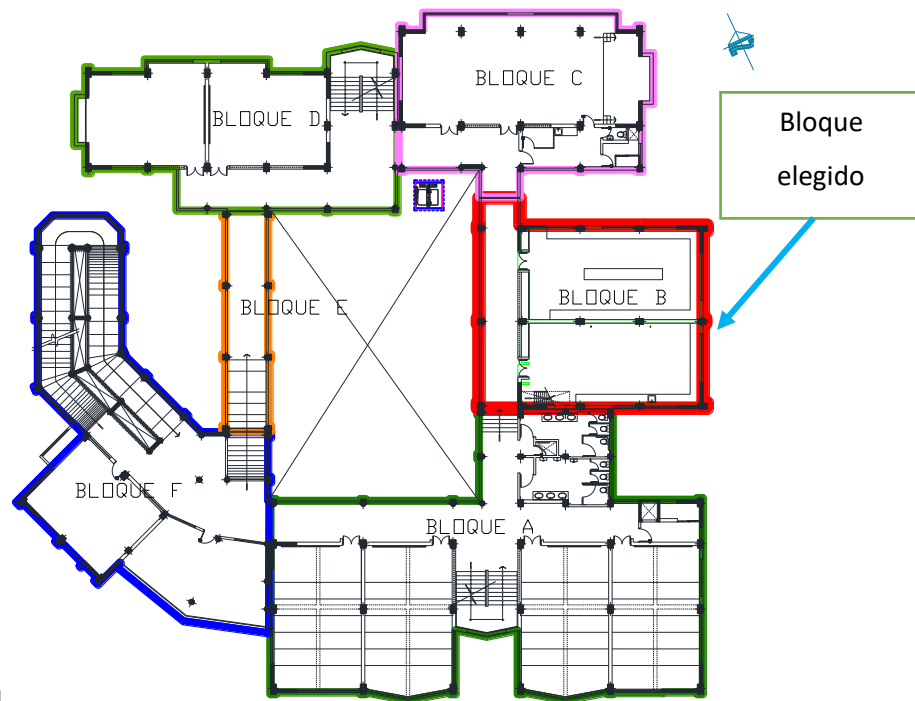


Figura 2: Pabellon de Ingenierias y Arquitectura por Bloques de la UAC

3.3. Tercera limitación normativa.

Esta investigación se limitó a lo estipulado en las siguientes normas o reglamentos:

- Norma Técnica Peruana de Diseño de Aisladores (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019).
- Norma Técnica Peruana de Diseño Sismorresistente (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018); para el análisis sísmico estático y dinámico (modal espectral y tiempo historia).
- Norma Técnica Peruana de Cargas (Norma E.020 Cargas, 2006); para el metrado de carga muerta y carga viva, y la obtención de los pesos unitarios.
- Norma Americana (Norma UBC 97, 1997) para el diseño del amortiguador empleado como complemento para el aislador.

3.4. Cuarta limitación procedencia de datos.

Los datos y resultados proceden de un modelamiento estructural, en base a los planos proporcionados por la oficina de infraestructura y obras de la UAC. El modelamiento y análisis estructural, se llevó a cabo con el software ETABS 2017, para el modelo se considera concreto de resistencia $f'c=280$ kg/cm² en todos los elementos estructurales,



obtenidas de los planos estructurales. Se utilizó también Microsoft Excel para cálculos complementarios.

Una gran limitante en el trabajo fue la versión estudiantil del programa SeismoMatch pues este considera una tolerancia de 0.3 y un número máximo de 30 iteraciones.

3.5. Quinta limitación caracterización de la estructura

La investigación se limitó a una edificación de uso Esencial A-2 (universidad) que cuenta con 05 niveles, 01 terraza, y un sistema de muros estructurales en el que la resistencia sísmica está dada predominantemente por muros estructurales sobre los que actúa por lo menos el 70 % de la fuerza cortante en la base. El pabellón esta cimentada sobre un suelo intermedio (S2), según el estudio de mecánica de suelos del expediente Técnico realizado por Liendo (2013), documento que fue facilitado por la unidad de Estructuras de la Universidad Andina del Cusco.

4. Objetivos de la investigación

4.1. Objetivo general.

Realizar una evaluación comparativa de movimiento de cuerpo rígido entre la Estructura de Base Fija, Estructura de Base Aislada con LRB y Estructura de Base Aislada con LRB incorporada con Amortiguador de fluido Viscoso mediante un Análisis Tiempo Utilizando Vibraciones Aleatorias (Cargas Sísmicas). Realizar una evaluación comparativa de cuerpo rígido entre la Estructura de Base Fija, Estructura de Base Aislada con LRB y Estructura de Base Aislada con LRB incorporada con Amortiguador de fluido Viscoso mediante un Análisis Tiempo Historia.

4.2. Objetivos Específicos.

Objetivo específico 01:

Calcular el porcentaje de variación de la deriva máxima del sistema estructural de base fija, en relación con el mismo sistema de base fija con la incorporación de aislador de base del tipo elastomérico con núcleo de plomo, y posteriormente añadiendo al sistema aislado un amortiguador de fluido viscoso; bajo los efectos de vibraciones aleatorias (Cargas Sísmicas), según (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019), del bloque “B” del Pabellón de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC”.



Objetivo específico 02:

Cuantificar el porcentaje de la variación de las aceleraciones absolutas máximas del sistema estructural de base fija, en relación al mismo sistema de base fija con la incorporación de aislador de base del tipo elastomérico con núcleo de plomo, y posteriormente añadiendo al sistema aislado un amortiguador de fluido viscoso; bajo los efectos de vibraciones aleatorias (Cargas sísmicas) según (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019) del bloque “B” de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC”.

Objetivo específico 03:

Cuantificar el porcentaje de variación de la fuerza cortante del sistema estructural de base fija, en relación con el mismo sistema estructural con la incorporación de aislador de base del tipo elastomérico con núcleo de plomo, y posteriormente añadiendo un amortiguador de fluido viscoso al sistema de base aislada; bajo los efectos de vibración aleatoria (carga sísmica) según (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019), del bloque “B” de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC”.

Objetivo específico 04:

Calcular la variación de las propiedades dinámicas del sistema estructural de base fija, en relación al mismo sistema de base fija con la incorporación aislador de base del tipo elastomérico con núcleo de plomo, y posteriormente añadiendo al sistema aislado un amortiguador de fluido viscoso; bajo los efectos de movimiento de base con carga sísmica según el reglamento sísmico vigente (Norma E.031 Aislamiento Sísmico, 2019), del bloque “B” de la "Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UAC”.

Objetivo específico 05:

Calcular los desplazamientos y las aceleraciones en la base en el sistema estructural de base aislada del tipo elastomérico con núcleo de plomo, y posteriormente añadiendo al sistema aislado un amortiguador de fluido viscoso.

Objetivo específico 06:

Determinar el Amortiguamiento la estructura de Base Fija, Estructura de Base Aislada con LRB y Estructura de Base Aislada con Amortiguador de Fluido Viscoso.

Objetivo específico 07:

Realizar una curva de resonancia con la acción de vibraciones armónicas de amplitud en función a (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018).



CAPITULO II:Marco Teórico

1. Antecedentes de la tesis.

1.1. Antecedentes a nivel nacional.

Título: “Evaluación del comportamiento sísmico del edificio “local institucional de ahorro y crédito cusco s.a.” frente a sismos de largo periodo de movimiento de terreno, representado por el registro sísmico de México 1985, considerando la incorporación de disipadores de energía de fluido viscoso”.

Institución: Universidad Andina del Cusco.

Autor: Vargas Condori Luis Miguel.

Año y lugar: 2014, Cusco – Perú.

RESUMEN:

En esta investigación se evalúa el comportamiento sísmico de la edificación “Local Institucional de la CMAC Cusco S.A” ante sismos de largo periodo de movimiento, representado por el registro sísmico de México 1958. Añadiendo a esta edificación 59 disipadores ubicados desde el primer piso hasta el décimo piso.

CONCLUSIÓN

Se logró obtener un amortiguamiento equivalente de 24.80% y se logró reducir la deriva un 47% esto con disipadores lineales, logrando así un nivel de comportamiento sísmico de seguridad.

Título: “Análisis comparativo de la respuesta sísmica aplicado al edificio de SEDA Cusco con y sin dispositivos reductores de energía sísmica (aisladores elastoméricos con núcleo de plomo y disipadores de energía de fluido viscoso) mediante un análisis sísmico dinámico”.

Institución: Universidad Andina del Cusco.

Autores: Quispe Ynga Jorge William Y Vargas Arias Rafael Mauricio.

Año y lugar: 2017, Cusco – Perú.

RESUMEN:

Se realizó el análisis del comportamiento sísmico de la edificación “La Nueva Sede Institucional de la Empresa Pública de Servicios Seda Cusco S.A” ante un sismo de diseño seleccionado de los registros sísmicos: Ocoña-2001, Moyobamba-2005 e Ica2007 Para evaluar el comportamiento sísmico utilizando dispositivos reductores de energía sísmica (Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo y Disipadores de fluido viscoso).



CONCLUSIÓN

Los reductores de energía sísmica (aislador elastomérico con núcleo de plomo y disipadores de energía de Fluido Viscoso) logran mejorar la respuesta sísmica, sus desplazamientos laterales acumulados en X (0.0775 para estructura con disipador de fluido viscoso, 0.1097 estructura con aislador LRB y 0.1379 para estructura reforzada) en Y (0.0964 para estructura con disipador de fluido viscoso, 0.1094 estructura con aislador LRB y 0.1832 para estructura reforzada); reduciendo desplazamientos y daños en los elementos estructurales, demostrando que la reducción de desplazamientos para este caso es mejor de los aisladores a comparación con los amortiguadores; el aislador presenta menor momento torsional a comparación de los amortiguadores, sin embargo el que logro mejor grado de amortiguamiento es el disipador de fluido viscoso de 25% amortiguamiento efectivo total en dirección X y de 28% en dirección Y; la fuerza cortante para la estructura con aisladores LRB es 276.83 T, mientras que la fuerza cortante para la estructura con disipadores de fluido viscoso es de 310.65 T y finalmente la incorporación del disipador de Fluido Viscoso representa un mayor costo de S/. 471,152.61 para una vida útil de 35 años.

Título: “Evaluación comparativa de la respuesta sísmica del sistema estructural convencional (dual) del “edificio aulas generales, laboratorios y otros de la uac” con y sin disipadores de energía de fluido viscoso; empleando un análisis sísmico dinámico (modal espectral y tiempo-historia)”.

Institución: Universidad Andina del Cusco.

Autor: Puma Gonzales, Victor.

Año: 2019, Cusco – Perú.

RESUMEN:

En el presente trabajo de investigación se evaluó comparativamente las magnitudes de los parámetros de respuesta sísmica del edificio Aulas Generales de la Universidad Andina del Cusco, en su estado actual y con la incorporación de disipadores de energía de fluido viscoso como refuerzo estructural; el mismo que demostró cumplir con el límite de deriva (0.007) para concreto armado, pero que cambio su comportamiento al someterlo a 3 sismos nacionales (Ica 2007, Moyobamba 2005, Ocoña 2001) y 2 sismos internacionales (México 1985, El Centro 1940) cada uno en sus 2 casos de análisis, no cumplió con el límite de deriva en la dirección y de análisis.



CONCLUSIÓN

Los desplazamientos se redujeron solamente en un 10.78%, y sus derivas en un 12.07%, las fuerzas cortantes para cada nivel en un 5.85% de todas en promedio y el amortiguamiento se incrementó en un 30%; siendo su porcentaje de variación máxima para la dirección X de 0.31% y para la dirección Y es 13%; y su fuerza cortante logró reducirse solamente en un 5.85%, siendo una estimación inicial la de reducir en un 40%.

1.2. Antecedentes a nivel internacional.

Título: “Estudio comparativo para determinar la eficiencia y aplicabilidad de aisladores sísmicos de base y diagonales con amortiguadores, como sistemas de protección sísmica de edificios de acero en la ciudad de Quito.”

Institución: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Autor: Gutiérrez Rodríguez Oscar Marcelo.

Año y Lugar: 2012, Quito – Ecuador.

RESUMEN:

El presente trabajo de investigación consiste en un estudio comparativo para determinar la eficiencia y aplicabilidad de sistemas de protección sísmica para estructuras de acero a ser construidas en la ciudad de Quito. En este estudio se proponen dos sistemas de protección de estructuras ante eventos sísmicos destructivos como son el aislamiento basal y la utilización de disipadores de energía ubicados en diagonales metálicas, sistemas que han tenido una gran aceptación en todo el mundo debido a los altísimos niveles de desempeño que se logra en estas estructuras durante eventos sísmicos severos, también se establecen requerimientos establecidos por la normativa AISC 341-10, modelando edificios de 5, 10, 15, 20 y 30 pisos.

CONCLUSIÓN

El aislamiento sísmico garantiza que durante un evento sísmico severo, la estructura se mantendrá en el rango elástico, cumpliendo la filosofía de diseño; la pérdida de eficiencia se debe a la forma del espectro de diseño; un parámetro importante es la amplificación de aceleraciones de entrada; Al aislar edificios cada vez más altos, el aislador va perdiendo progresivamente su eficiencia; La cortante incrementa en función al número de pisos en una dirección directamente proporcional y que a pesar del costo es viable dado que garantiza reducción sustancial o eliminación total de posibles daños.



El sistema de aisladores de masa sintonizada reduce un 43% los desplazamientos para edificios de baja altura, para edificios altos se puede controlar la aceleración el que se reduce en un 23%. Los edificios con pórticos son más eficientes para absorber cargas producidas en un sismo.

Tema: “Influência de um Amortecedor Magnetoreológico no Isolamento de Base de Edifícios sob Ação Sísmica”.

Institución: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Brasil.

Autor: Pezo Zegarra Eliot.

Año y lugar: 2016, Rio de Janeiro – Brazil.

RESUMEN:

Desarrolla la inclusión de amortiguador Magnetoreológico en un modelo tipo Shear Building.

CONCLUSIÓN

Para un edificio simple tipo shear building en la base (aislador) reduce los desplazamientos hasta en un 85% y las aceleraciones hasta en un 60%; y al varias la posición de la base al primer nivel la eficiencia de este dispositivo disminuye, reduce los desplazamientos hasta un 25% y las aceleraciones hasta en un 10%; en el análisis dinámico verifica que existe una importante influencia en el crecimiento de la fuerza axial en las columnas (debido a las sobrecargas), este crecimiento induce una modificación en la distribución de frecuencias naturales de la estructura, pasando de un contenido bajo de frecuencias a uno alto lo cual es perjudicial para la estructura porque podría llevar a la estructura a la resonancia.

Título: “Análisis comparativo del comportamiento sísmico dinámico de estructuras esenciales con aisladores de base del tipo elastomérico con núcleo de plomo IRB y disipadores tipo contraventeos restringidos al pandeo BRB, y su incidencia en la relación costo/beneficio del sistema estructural”

Institución: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil

Autor: Ruiz Carrillo Christian Nicolás y Torres Reino Ángel Ismael

Año y Lugar: 2019, Ambato – Ecuador.

RESUMEN:

Esta tesis compara el comportamiento estructural del sistema convencional aislado en la base y con el uso de disipadores sísmicos, en una estructura de uso esencial que tiene 7 pisos, los que se dividen en 2 bloques de 7738.12 m² y 9975.43 m² respectivamente, que estan separados por una junta. La ubicación es en la ciudad de Manta; en el que usa la metodología tiempo historia



no lineal, evalúa el desempeño de cada uno de los sistemas estructurales, utilizando registros sísmicos que representen las aceleraciones similares al sitio de implantación de la estructura en estudio. En el que se obtuvieron resultados de desplazamientos, derivas, energía del sistema, comportamientos histeréticos y niveles de desempeño con el apoyo del software ETABS 2016.

CONCLUSIÓN

Se dimensiona el aislador elastomérico con núcleo de plomo LRB siguiendo la norma ASCE 7-16 con el que se obtiene las propiedades del catálogo LT090G4-C Bridgestone, se determinaron secciones transversales para el LRB; Se obtuvieron el desempeño de los sistemas estructurales analizados, reduce las secciones de los elementos estructurales lo que significa un ahorro de 8%, los equipos hospitalarios que no deberán sufrir daños para su funcionamiento óptimo tras un evento sísmico, se obtuvieron desplazamientos máximos no supera el 4% de la altura total del edificio.

2.Aspectos teóricos pertinentes.

2.1.Fallas activas y sismicidad en la ciudad del Cusco.

(Benavente et al, 2013), Donde indica que el sistema de fallas Zurite-Cusco-Urcos-Sicuani tiene una longitud aproximada de 220 km con una dirección N 140° E, limita al oeste con el Altiplano oriental y por el este con la cordillera Oriental, este sistema de Fallas presentes es: Falla Zurite–Huarcocondo, Falla Tambomachay, Falla Cusco, Falla Chincheros, Falla Qoricocha, Falla Tamboray, Falla Pachatusan, Falla Urcos, Falla Amaru, Falla Antahuire y Falla de Paruro

2.2.Aspectos de sismología

(L Bozzo, 1995b) Define la severidad de los terrenos a través de los siguientes parámetros de los terremotos (Magnitud, Intensidad, duración efectiva de un sismo y sismicidad).

2.2.1.Magnitud

(L Bozzo, 1995b)Compara la energía liberada en el foco por distintos sismos, la energía total liberada es la suma de toda la energía liberada.

2.2.2.Intensidad

(L Bozzo, 1995b). Describe los daños que se causan luego del sismo en las estructuras.



2.2.3. Duración efectiva de un sismo

(L Bozzo, 1995b) Es el lapso del tiempo por el que se mantiene una vibración sísmica, la que normalmente está por encima de 0.5g.

2.2.4. Sismicidad

(L Bozzo, 1995b) Considera como el espacio tiempo en que las vibraciones telúricas tienen efecto sobre la superficie.

2.3. Dinámica estructural.

2.3.1. Introducción.

El comportamiento dinámico estructural de una edificación con base fija durante un sismo severo, tiene como resultado deformaciones permanentes, como consecuencia de un comportamiento plástico de los materiales del sistema estructural de la edificación durante dicho sismo.

Para (L Bozzo, 1995b) los criterios actuales de diseño requieren soportes a un sismo severo sin que llegue al colapso, aunque estos produzcan daños locales es por esto que se diseña y construye permitiendo deformaciones inelásticas sin pérdida de la resistencia.

La estructura se proyecta en el primer modo de vibración (modo fundamental) debido a que este modo es el más representativo respecto al resto, los demás modos son fuerzas adicionales simulando simplificada mente la participación de modos superiores (Chopra et al, 2014); durante la etapa conceptual de diseño al no tener muchos parámetros con precisión se emplea el método de integración para la solución de la ecuación diferencial que representa el comportamiento dinámico de la estructura, pero por el tiempo requerido para la preparación de los datos, análisis, diseño y comprobación de resultados en una integración no lineal de la fuerza del amortiguamiento.



2.3.2. Conceptos de dinámica estructural

2.3.2.1. Masa y peso

(García Reyes, 1998) La masa M , es una propiedad extensiva de la materia, es la cantidad de sustancia que se encuentra en todo cuerpo; invariable en cualquier lugar; mientras que el peso W es una medida de la fuerza necesaria para impartir una aceleración de g (gravedad) a la masa.

2.3.2.2. Rigidez

(García Reyes, 1998). Relación entre fuerzas externas y las deformaciones que estas logran inducir al cuerpo, usualmente se representa por la letra $k=P/x$ donde:

P: Fuerza Externa

X: Deformación

2.3.2.3. Amortiguamiento

(Chopra et al, 2014). Proceso mediante el cual la amplitud decrece de manera constante; esta puede calcularse de manera experimental mediante el empleo del decremento logarítmico.

2.3.2.4. Frecuencia y periodo

(Chopra et al, 2014). El periodo es el tiempo necesario para que un sistema no amortiguado un ciclo de vibración libre y la frecuencia es la inversa de este valor, también se suele relacionar con la frecuencia angular, es puede medir en Hertz o ciclos por minuto.

2.3.2.5. Ductilidad

(García Reyes, 1998). Es la capacidad del material de deformarse plásticamente sin romperse, siendo capaz de deformarse permanentemente y es apreciable en el rango inelástico antes de que falle; la capacidad de absorción de energía y la disipación, depende de la ductilidad del material. Cuando este valor se determina de una gráfico esfuerzo-deformación, se denomina ductilidad de deformación.



2.3.3. Ecuaciones de movimiento y métodos de solución.

2.3.3.1. Grado de libertad

Según (Bozzo et al, 2000) es el número total de componentes de desplazamiento que indica la posición deformada.

Se necesita idealizar un sistema estructural con masa concentrada soportado por una estructura sin masa, siendo éstas elásticas lineales y/o inelásticas para ser sometidas a fuerza Dinámica o desplazamientos inducidos por una fuerza externa.

En la literatura técnica de dinámica estructural, existe dos tipos de solución de las ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento dinámico de una estructura o sistema estructural, una de ellas es la solución analítica, donde se encuentra una función matemática que representa dicho comportamiento dinámico, la otra solución es la numérica, que se utiliza cuando no se puede solucionar la integral de la ecuación diferencial. Teniendo en la literatura los siguientes métodos: método numérico y método analítico.

En la presente tesis, solo se estudió a partir de la explicación de las fórmulas que describen el comportamiento dinámico de las estructuras mediante la solución analítica.

2.3.3.2. Equilibrio dinámico

(Chopra et al, 2014) Encontraremos el equilibrio dinámico en función al principio de D'Alembert, tomando de base a la fuerza de inercia (FI) es igual a la derivada respecto al tiempo de la masa "M" multiplicada por la cantidad de movimiento:

$$FI = \frac{-d(M * v)}{dt} = -M * \frac{d(v)}{d(t)} = -M \ddot{x} \quad (1)$$

Donde:

M: masa

v: velocidad

\ddot{x} : Aceleración

t: tiempo

FI: fuerza inercial

Resultando la fuerza de inercia igual a la masa “M” por la aceleración negativa “ \ddot{x} ”.

2.3.3.3. Ecuaciones de movimiento y sus métodos de solución

(Chopra et al, 2014) Se desarrollaron ecuaciones de movimiento para un sistema simplificado de varios grados de libertad (VGDL) en donde se identifica la cortante, las fuerzas elásticas (f_s), el amortiguamiento (f_d) y la inercia; después los se representa sometidos a fuerzas externas o a movimientos de terreno inducidos por sismos; la formulación para el análisis de la respuesta sísmica está sujeta a sistemas que son sometidos a un movimiento de terreno especialmente variable y a sistemas inelásticos; se describe los métodos para la resolución de las ecuaciones diferenciales que controlan los movimientos de la estructura y la organización del estudio del análisis dinámico de los sistemas de VGDL.

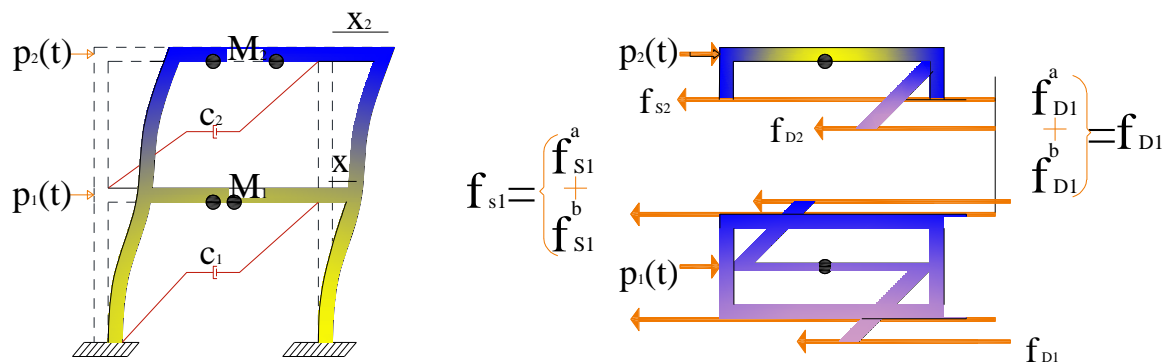


Figura 3: Marco cortante de 2 niveles

Es un marco cortante de dos niveles en el que se desarrollan las ecuaciones para los sistemas de VGDL. La masa se distribuye en todo el edificio idealizándola concentrada en cada nivel de los pisos; al igual como se trabajaba en 1GDL, la disipación de la energía se representa por un sistema de amortiguamiento viscoso lineal y se asocia a la deformación de cada piso; el número de desplazamientos independientes se denominará número de grados de libertad porque proporcionará las posiciones desplazadas de las masas con respecto a su posición de equilibrio original.

2.3.4. Vibración Libre

2.3.4.1. Para un grado de libertad

(Chopra et al, 2014) Una estructura experimenta vibración libre, si su posición inicial de equilibrio estática es perturbada dejándose vibrar por la excitación dinámica externa o por una

condición inicial de desplazamiento o velocidad diferente de cero; este tipo de movimientos se observan solucionando la Ec. (3), cuyos resultados analíticos describen la vibración libre de la masa del sistema de 1GDL.

En la práctica este sistema sirve para determinar su frecuencia de vibración natural del sistema.

Idealizando un sistema estructural de 1GDL mediante un sistema masa-resorte, el movimiento se inicia de acuerdo con las condiciones iniciales impuestas, como son un cierto desplazamiento $x(0)$ y una velocidad $\dot{x}(0)$ en un tiempo cero (0). El sistema experimenta una alteración alrededor de su posición de equilibrio estático, y que este mismo movimiento se repite cada cierto periodo, denominado como movimiento armónico simple.

$$T = \frac{2\pi}{W_n} \tag{2}$$

Donde:

T: es el periodo de vibración.

La estructura es idealizada en una masa concentrada M y rigidez lateral K. La ecuación que denota el desplazamiento lateral en el tiempo de la estructura idealizada sin amortiguamiento ni excitación externa es:

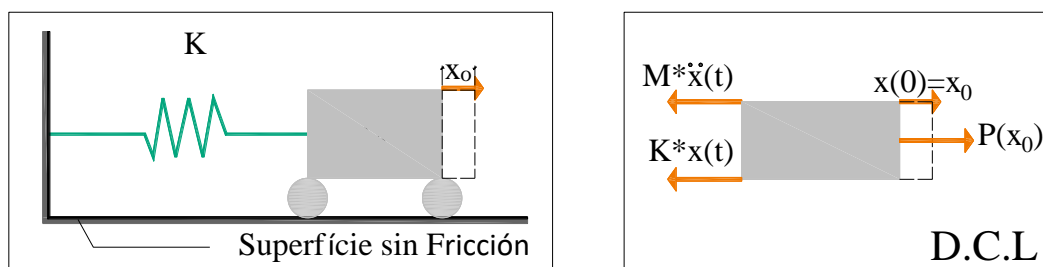


Figura 4: Modelo matemático idealizado de un sistema de 1 grado de libertad (Bozzo et al, 2000)

$$M * \ddot{x}(t) + K * x(t) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{M * \ddot{x}(t) + K * x(t) = 0}{M} \tag{4}$$

Nos quedaría

$$\ddot{x}(t) + \frac{K}{M} * x(t) = 0 \tag{5}$$



Entonces la frecuencia natural del sistema viene dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

Donde:

M: masa equivalente del sistema

$x(t)$: desplazamiento de la masa en el tiempo.

$\ddot{x}(t)$: Aceleración de la masa en el tiempo.

K: Rigidez equivalente del sistema.

Para la Solución de la ecuación de movimiento del sistema de un solo grado de libertad, representada por la Ec. (3); la masa del sistema idealizado tiene las siguientes condiciones iniciales $\ddot{x}(t) = 0$ y $x(t) = 0$.

2.3.5. Vibración libre amortiguado.

(Chopra et al, 2014) El proceso por el cual la vibración disminuye de manera constante está directamente relacionado con la propiedad de Amortiguamiento (C) de los materiales, en el cual la energía cinética y de deformación del sistema vibratorio se disipará mediante esta propiedad.

Entonces la Ec. (3), queda la siguiente forma.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (7)$$

Donde:

C: amortiguamiento viscoso equivalente del sistema

$$C = 2 * M * \zeta * \omega_n \quad (8)$$

Donde:

ζ : Factor de Amortiguamiento

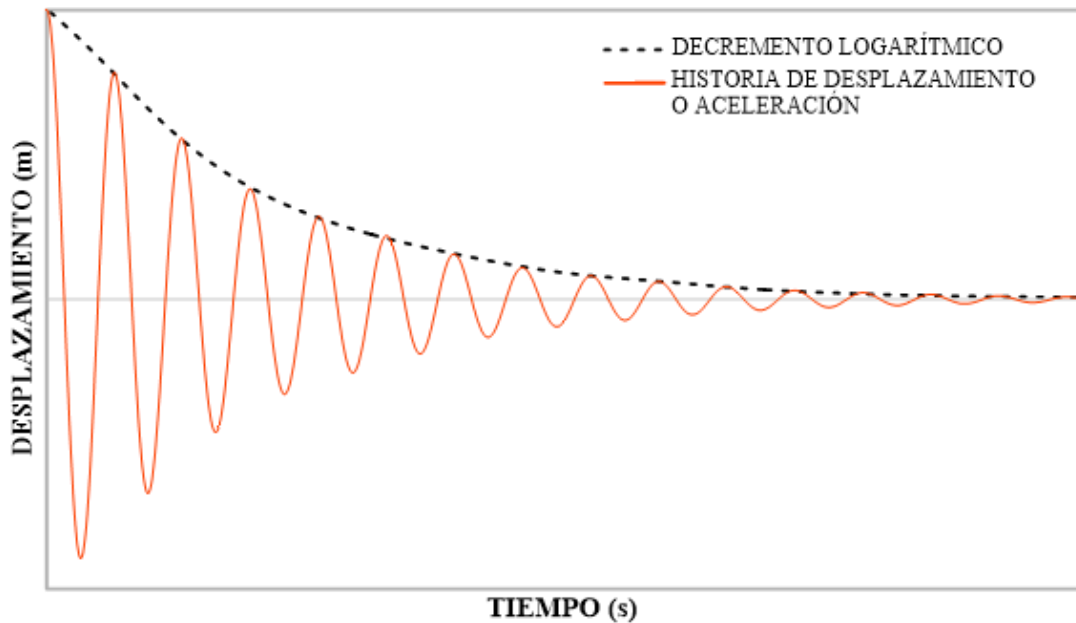


Figura 5: Movimiento Libre Amortiguado

2.3.5.1. Vibración Libre en varios grados de libertad

2.3.5.1.1. Sistemas sin amortiguamiento

(Chopra et al, 2014) Se ve los sistemas lineales de VGDL cuya ecuación sin amortiguamiento para una fuerza externa $p(t)=0$ será:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [k] \cdot \{x\} = \{0\} \quad (9)$$

Cuya ecuación es acoplada a la matriz de masa, a la matriz de rigidez o puede ser a ambas. Se presenta la vibración en modo gráfico de cualquier sistema de VGDL para comprender los términos cualitativos donde la cortante de los niveles de la vibración libre, la rigidez de entresijos y las masas concentradas en cada nivel se podrán observar con una función de tiempo.

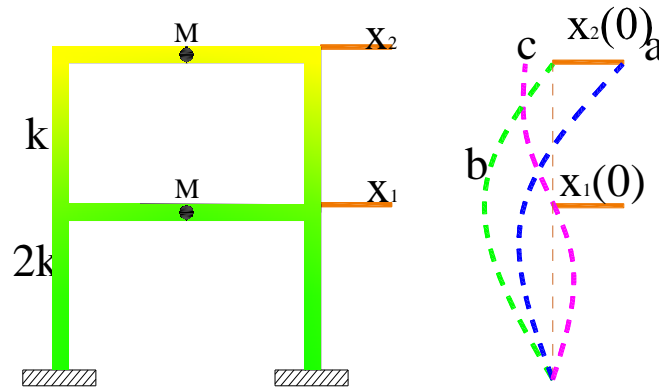


Figura 6: Vibración libre de un sistema no amortiguado

En la Figura 6, se muestra los diferentes modos de vibración y sus respectivas frecuencias, cuando la vibración libre del sistema no amortiguada inicial es arbitraria, podemos observar en el lado derecho de la Figura 6, la forma modificada en los instantes de tiempo a, b y c. Además se observa que los desplazamientos para cada grado de libertad comienzan en condiciones iniciales, $x=0 \quad \dot{x} = 0$.

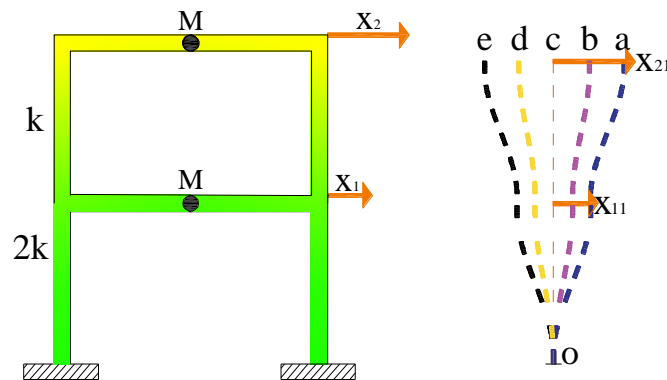


Figura 7: Vibración libre de un sistema no amortiguado en su primer modo de vibración natural

En la Figura 7 Se observa el punto de desplazamiento 0, llamado nodo no se moverá en absoluto, en el primer modo de vibración no encontramos ningún nodo, pero a medida que el número de modos aumente el número de nodos también lo hará.

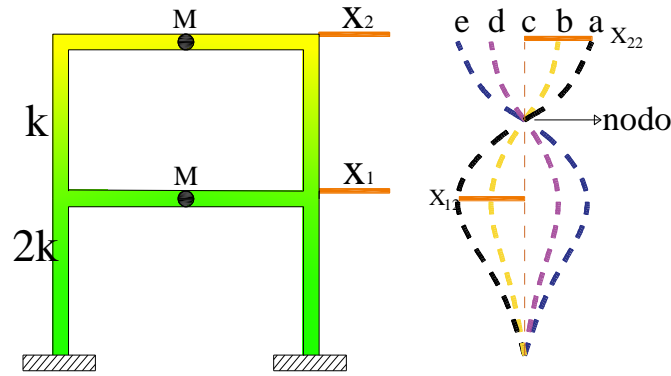


Figura 8: Vibración de un sistema no amortiguado en su segundo modo de vibración natural

El periodo natural de vibración de un sistema de VGDL en el tiempo requerido para un ciclo de movimiento armónico simple, es el mayor periodo de todos periodos obtenidos.

2.3.5.1.2.Frecuencias y modos de vibración naturales

(Chopra et al, 2014) Su solución dará a conocer las frecuencias y los modos naturales de un sistema cuya gráfica demostrará que la vibración libre de este sistema no amortiguado en sus modalidades de vibración natural para un sistema de 2 grados de libertad podrá describirse matemáticamente como:

$$[-\lambda * [M] + [K]] * \{C\} = \{0\} \tag{10}$$

La raíz cuadrada de los autovalores, representan las frecuencias naturales:

$$\omega_i = \sqrt{\lambda} \tag{11}$$

Para determinar las frecuencias y modos de vibración de un sistema de varios grados de libertad, se determina matemáticamente problemas de autovalor y autovector, representadas mediante:

$$[[-\lambda * [M] + [K]]] = 0 \tag{12}$$

Los autovalores en dinámica estructural representan a las frecuencias de vibración y los autovectores representan los modos de vibración.

En un sistema de “n” grados de libertad, se obtendrán “n” frecuencias y “n” modos de vibración.

2.3.5.1.3.Matriz Modal

(Chopra et al, 2014) Si se tiene N valores propios y N modos naturales ensamblaremos una matriz compacta; si el modo natural corresponde a la frecuencia natural teniendo los elementos



de grados de libertad entonces los vectores se mostrarán en una matriz cuadrada; cada columna representara un modo de vibración:

$$\phi = [\phi_{jn}] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \dots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Llamada matriz modal ϕ , al multiplicarlo por la masa y por la frecuencia natural está corresponderá a la matriz espectral cuyo valor característico será la multiplicación de su respuesta por la rigidez.

2.3.5.1.4. Ortogonalidad en los modos

(Chopra et al, 2014) Se puede determinar los modos naturales correspondientes a las diferentes frecuencias. Cuando $\Omega_n \neq \Omega_r$.

$$[\phi]_n^T * [k] * [\phi]_r = 0 \quad (14)$$

$$\phi_n^T * m * \phi_r = 0 \quad (15)$$

2.3.5.1.5. Interpretación de la ortogonalidad modal

(Chopra et al, 2014) El trabajo realizado por fuerzas inerciales del n-ésimo modo al pasar a través de los desplazamientos del r-ésimo modo es igual a 0

$$x_n(t) = q_n(t) * \phi_n \quad (16)$$

2.3.5.1.6. Sistemas con amortiguamiento

(Chopra et al, 2014) Recordando la ecuación del sistema a vibración libre incluyendo el amortiguamiento donde deseamos encontrar el desplazamiento en función al tiempo $x(t)$ que satisfaga las condiciones iniciales. La solución varía en función del tipo de amortiguamiento, puede ser clásico o no clásico. Si la matriz de amortiguamiento satisface la siguiente ecuación:

$$c * m^{-1} * k = k * m^{-1} * c \quad (17)$$

Donde:

c: coeficiente de amortiguamiento



k: rigidez

m: masa

Cuando C satisfaga la Ec. (17) el sistema de amortiguamiento es clásico.

C.2.7. Solución de ecuaciones de vibración libre: sistemas amortiguación clásica

(Chopra et al, 2014) Se toma un sistema clásico con N ecuaciones diferenciales desacopladas:

$$[M]_n * \{\ddot{q}\}_n + [C]_n * \{\dot{q}\}_n + [k]_n * \{q\}_n = 0 \quad (18)$$

La que tendrá la misma forma que para un sistema de 1GDL, de ese modo la razón de amortiguamiento podrá definirse para cada modo de una manera análoga. El amortiguamiento influye en las frecuencias y en los periodos de vibración natural de un sistema de VGDL, entonces el efecto del amortiguamiento en las frecuencias y en los periodos naturales será pequeño para razones de amortiguamientos menores a 20%, intervalo incluyente a estructuras prácticas.

En un sistema de VGDL clásicamente amortiguado, que es sometido a un vibración libre es su modo natural n , su amplitud de desplazamiento en cualquier grado de libertad disminuye con cada ciclo de vibración; esta tasa de decaimiento depende de la fracción de amortiguamiento en ese modo; por consiguiente la fracción de amortiguamiento en un modo natural de un sistema de VGDL puede determinarse a partir de la prueba de vibración libre alrededor de su posición de equilibrio estático; la desventaja de este método es la aplicación y la liberación de la fuerza externa para que la estructura vibre en un solo modo fundamental; una vez las contribuciones a la respuesta de los modos más altos se han amortiguado, la vibración libre se encontrará en modo fundamental y la fracción de amortiguamiento para este modo podrá acuñarse a partir de la tasa de decaimiento de las amplitudes de vibración.

2.3.6. Vibración forzada

2.3.6.1. Vibración forzada amortiguada

2.3.6.1.1. Para un grado de libertad

(Chopra et al, 2014) Si se excita a la estructura de 1GDL con una fuerza dinámica $P(t)$ mostrada en la ecuación que representa el comportamiento dinámico de la estructura bajo carga dinámica externa se modifica de la siguiente forma:

$$M * \ddot{x}(t) + C * \dot{x}(t) + K * x(t) = P(t) \quad (19)$$

$$P(t) = P_o * \text{Sin}(\Omega * t) \quad (20)$$

Donde:

Ω : Frecuencia de excitación

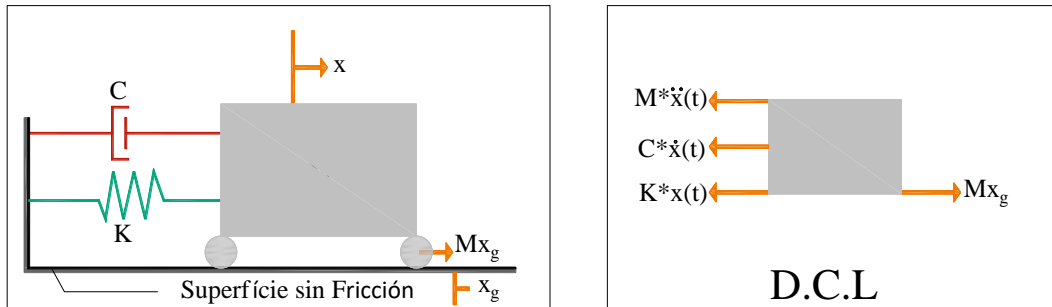


Figura 9: Sistema masa-resorte-amortiguador

2.3.6.1.1.1. Factores de amplificación dinámica

(Chopra et al, 2014) Factores de respuesta de deformación, de la velocidad y de la aceleración, son adimensionales y definen la amplitud de las cantidades. Estos resultan de la relación entre los factores de respuesta estáticos entre los dinámicos.

$$CI = \frac{x_{Est}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_o}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\xi * \Omega}{\omega_o}\right)^2}} = \frac{x_{Est}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi * r)^2}} \quad (21)$$

$$AD = \frac{CI}{x_{Est}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2 * \xi * r)^2}} \quad (22)$$

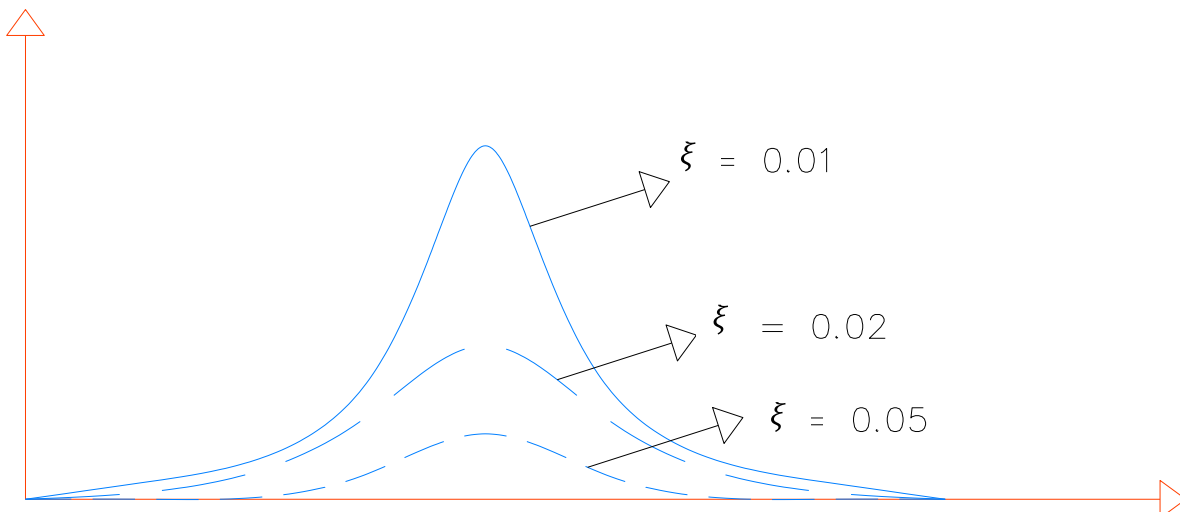


Figura 10: Curva de espectro de respuesta para diferentes valores de amortiguamiento



2.3.6.1.1.2.Ecuación de movimiento: para una estructura con excitación de base

(Chopra et al, 2014) El desplazamiento del terreno, producido por una excitación sísmica se define por x_g , el desplazamiento global o absoluto de la masa excitada sísmicamente está dado por x^t , el desplazamiento de la masa por “x”, entonces la ecuación será:

$$x^t(t) = x_g(t) + x(t) \quad (23)$$

$$M \ddot{x}^*(t) + C \dot{x}^*(t) + K x^*(t) = M \ddot{x}_g \quad (24)$$

Dónde:

\ddot{x}_g : Aceleración del suelo

2.3.6.1.1.3.Respuestas a una excitación de base armónica

Se incluye el amortiguamiento viscoso a la ecuación diferencial ante una fuerza armónica será:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = A_o \text{sen}(\Omega t) \quad (25)$$

Donde:

A_o : Amplitud de la aceleración armónica.

Siendo sometida a condiciones iniciales en la que su solución particular será

$$C \cos(\Omega t) + D \text{sen}(\Omega t) \quad (26)$$

Donde:

$$C = \frac{P_o}{k} \frac{1 - (\Omega/\omega_n)^2}{\left[1 - (\Omega/\omega_n)^2\right]^2 + \left[2\zeta(\Omega/\omega_n)\right]^2} \quad (27)$$

$$D = \frac{P_o}{k} * \frac{-2\zeta \Omega/\omega_n}{\left[1 - (\Omega/\omega_n)^2\right]^2 + \left[2\zeta(\Omega/\omega_n)\right]^2} \quad (28)$$

Y su solución complementaria es la respuesta en vibración libre

$$X(t) = e^{-\zeta \omega_n t} (A \cos(\omega_D t) + B \text{sen}(\omega_D t)) \quad (29)$$

Dónde:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (30)$$

Donde la solución completa para la Ec.(25) Será:



$$X(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(A \cos(\omega_D t) + B \sin(\omega_D t) \right) + C \cos(\omega_n t) + D \sin(\omega_n t) \quad (31)$$

Solución transitoria

Solución estacionaria

A y B son constantes a determinar por procedimientos estándar en condiciones iniciales. La diferencia de las dos respuestas es la respuesta libre, el mismo que decae exponencialmente con el tiempo, que dependerá de Ω/ω_n , cuando la vibración libre es insignificante se le denominara respuesta transitoria; la respuesta forzada permanece entonces se llamara respuesta estacionaria.

2.3.6.1.1.4. Transmisión de fuerza y aislamiento de vibraciones

Se considera el sistema masa-resorte-amortiguamiento que será sometido a una fuerza armónica transmitida a la base:

$$f_T = k * x(t) + c * \dot{x}(t) \quad (32)$$

Donde:

f_T : fuerza total

La transmisibilidad se graficará en función a la relación de frecuencias Ω/ω_n para varios valores de fracción de amortiguamiento ζ , en el que se eligen las escalas logarítmicas para resaltar los máximos valores.

Será necesario tener amortiguamiento suficiente para limitar la energía transmitida al pasar a través de la resonancia sin exceder la fuerza que se transmite a las velocidades.

2.3.6.1.1.5. Instrumento para medir vibraciones

(Chopra et al, 2014) Los registros de los movimientos resultantes dan una idea de la respuesta de la estructura durante los sismos, el elemento básico de estos instrumentos es un transductor; es un sistema masa-resorte amortiguador montado dentro de un marco rígido unido a la superficie.

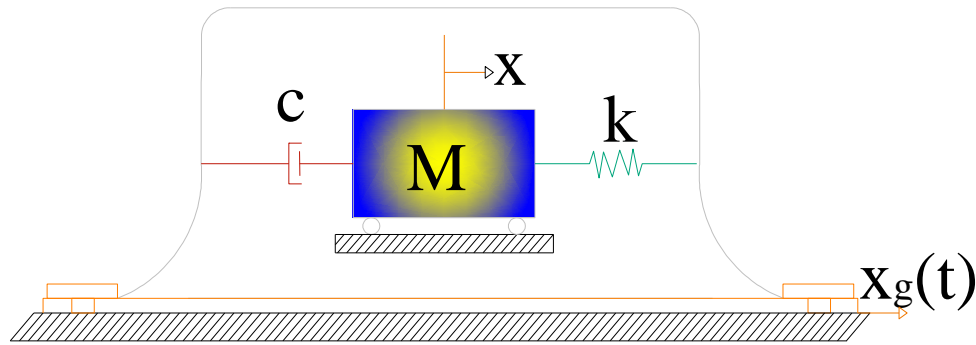


Figura 11: Esquema de un instrumento para medir vibraciones

Es necesario 3 transductores distintos para poder medir en las 3 coordenadas del movimiento; analizar el principio subyacente en el diseño para medir las vibraciones del desplazamiento relativo proporcionara el soporte de las aceleraciones y velocidades.

2.3.6.1.2. Para varios grados de libertad

(Chopra et al, 2014) Al tener la dificultad determinando los coeficientes de la matriz de amortiguamiento de las dimensiones estructurales, el tamaño de los elementos estructurales y sus propiedades de amortiguamiento de las propiedades de los materiales estructurales a usar; por lo que este valor se especifica en las fracciones de amortiguamiento modal, muchas veces no es suficiente para determinar los sistemas lineales con amortiguamiento clásico.

2.3.6.1.2.1. Estimación de fracciones de amortiguamiento modal

(Chopra et al, 2014) Las propiedades del amortiguamiento y los periodos naturales de vibración de una estructura es difícil analizarla por lo que evaluar la seguridad sísmica de una estructura tendrá un método experimental que incluya amortiguamiento; los datos que son más útiles de conseguir son de aquellas estructuras sometidas a movimientos del terreno que no se han deformado en un intervalo inelástico. Cuando se dispone los datos sobre el amortiguamiento determinados a través de movimientos sísmicos registrados en estructuras de diferentes tipos que utilicen diferentes materiales; estos datos servirían de base para estimar fracciones de amortiguamiento a una estructura existente cuya seguridad sísmica deba tomarse en cuenta para diseñar una nueva; hasta acumular una base de datos amplia donde la selección de fracciones de amortiguamiento sean datos disponibles.



2.3.6.1.2.1.1. Análisis de amortiguamiento clásico

(Chopra et al, 2014) Es una idealización apropiada cuando los mecanismos de amortiguamiento se distribuyen en toda la estructura y son similares.

2.3.6.1.2.1.2. Amortiguamiento de Rayleigh

(Chopra et al, 2014) Se toma el amortiguamiento proporcional a la masa y un amortiguamiento proporcional a la rigidez en donde la matriz C será diagonal considerando las propiedades de ortogonalidad modal tratándose de matrices físicamente representativas de los modelos de amortiguamiento; relacionando las fracciones de amortiguamiento modal para un sistema de amortiguamiento proporcional a la masa generalizando para el n -ésimo término y su fracción de amortiguamiento modal que será inversamente proporcional a la frecuencia natural; este coeficiente de amortiguamiento proporcional a la masa se conoce a partir de la ecuación:

$$c = a_0 * M \tag{33}$$

$$c = a_1 * k \tag{34}$$

Dónde:

a_0 y a_1 son constantes con unidades en s^{-1} y s respectivamente

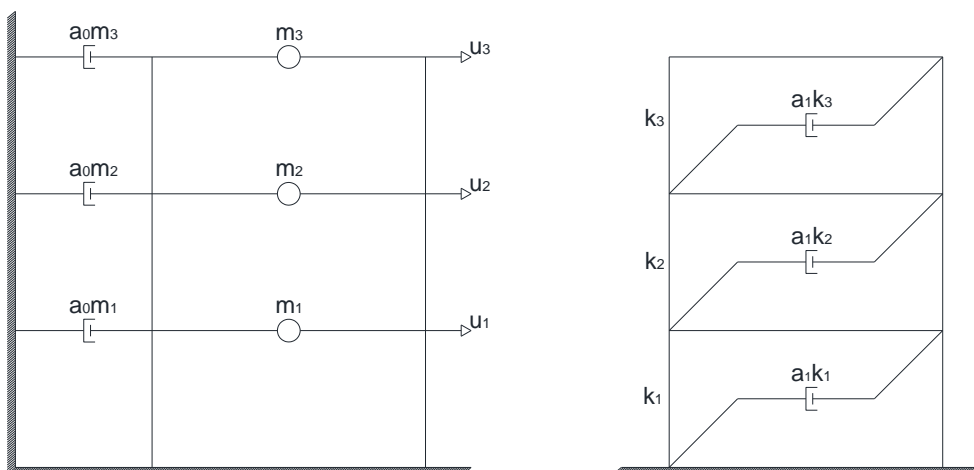


Figura 12: Amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez



2.3.6.1.2.1.3. Amortiguamiento de Caughey

Para calcular las fracciones de amortiguamiento en más de dos modos utilizaremos una matriz de amortiguamiento clásico conocido como amortiguamiento de Caughey

$$c = M \sum_{l=0}^{N-1} a_l * [M^{-1} * K]^l \quad (35)$$

Donde N es el número de grados de libertad y a_l son constantes, solo los dos primeros terminos serán igual al amortiguamiento de Rayleigh; a_l podrá determinarse a partir de las fracciones de amortiguamiento especificada en los modos de vibración.

2.3.7. Respuesta Sísmica de sistemas lineales

2.3.7.1. Para un grado de libertad

2.3.7.1.1. Historia de Respuesta

(Chopra et al, 2014) La respuesta del desplazamiento en un sistema de 1GDL dependerá de su periodo de vibración natural y su fracción de amortiguamiento; un periodo de vibración mayor es consecuencia de un desplazamiento mayor en la estructura.

El desplazamiento se evaluará mediante análisis dinámico, sus fuerzas internas se evaluarán por análisis estático en cada instante de tiempo utilizando el método de *fuerzas estáticas equivalentes* f_s , para relacionarlo a las fuerzas sísmicas especificadas en los códigos de construcción como:

$$f_s(t) = k * x(t) * f \quad (36)$$

2.3.7.1.2. Concepto del espectro de respuesta

(Villafañe et al, 2018), El espectro de respuesta fue inicialmente propuesto por Maurice Biot en el Instituto Tecnológico de California en 1932, él propuso formalmente los espectros de respuesta elástica, y luego fue desarrollado por Housner, Newmark y muchos otros investigadores. El espectro de respuesta proporciona un medio conveniente para simplificar una respuesta máxima dentro de los sistemas lineales de 1GDL y de su fuerza restitutiva del terreno, añadiendo la aplicación de la dinámica estructural al diseño de estructuras y los requisitos de la fuerza lateral dentro de los códigos de construcción; el parámetro que relaciona la cantidad de



respuesta (x_0) con la frecuencia circular lo denominaremos espectro de respuesta. Siendo posible definir la variación de los espectros de respuesta en función de la cantidad de respuesta que se grafique:

$$\begin{aligned}x_o(T_n, \zeta) &\equiv \text{máx}|x(t, T_n, \zeta)| \\ \dot{x}_o(T_n, \zeta) &\equiv \text{máx}|\dot{x}(t, T_n, \zeta)| \\ \ddot{x}_o(T_n, \zeta) &\equiv \text{máx}|\ddot{x}(t, T_n, \zeta)|\end{aligned}\quad (37)$$

2.3.7.1.3. Espectro de respuesta de deformación de pseudo-velocidad y pseudo-aceleración

(Chopra et al, 2014) Se analiza el espectro de respuesta de deformación en función a los espectros de respuesta de pseudo-velocidad y pseudo-aceleración para el estudio de las características de los espectros de respuesta.

2.3.7.2. Para varios grados de libertad

(Chopra et al, 2014) Se toma sistemas ideales como sistemas de masa concentrada, se calcula la respuesta estructural en función del tiempo cuando el sistema se somete a una aceleración dada por el terreno $\ddot{x}_g(t)$; el análisis del análisis de la respuesta ayudará a configurar una estructura arbitraria especificado para edificios de varios niveles con planta simétrica aunque también es válido para aquellos que tengan planta a-simétrica incluyendo un análisis de la respuesta torsional de los que tienen planta simétrica. La combinación de las respuestas estructurales determinados por el análisis independiente de cada componente de excitación dará una respuesta de los sistemas lineales a una excitación con varios componentes y su análisis de la respuesta de una estructura sometida a movimientos dados en cada apoyo.

Se calcula la respuesta máxima de una estructura durante su sismo partiendo del espectro de respuesta o diseño sísmico sin analizar la historia de la respuesta de la estructura, este procedimiento se llama análisis del espectro de respuesta, no es una predicción exacta de la respuesta máxima, pero proporciona una estimación cercana para la aplicación del diseño estructural; normalmente utilizada en estructuras cuyos componentes individuales son sometidas a traslación del terreno.



2.3.7.2.1. Edificios de varios niveles con planta simétrica

(Chopra et al, 2014) Cuyos diafragmas de piso serán rígidas y plantas que tienen ejes ortogonales de simetría sometidos a movimiento horizontal de terreno en dirección a cualquiera de sus ejes. Será conveniente usar el procedimiento de análisis con referencia a un solo marco que podrá aplicarse simultáneamente a los demás.

2.3.7.2.2. Respuesta total

Será la respuesta de la totalidad de los modos que proporcionará la respuesta del edificio a distintos niveles cuya respuesta está referida al n-eximo modo cuyo procedimiento nos da las aceleraciones en cada nivel y las fuerzas impulsadas por el sismo a la estructura.

Para un edificio de planta simétrica su respuesta en N niveles se dará alrededor de dos ejes ortogonales al movimiento sísmico del terreno en dirección de uno de sus ejes de simetría que puede calcularse con una función del tiempo por el procedimiento de respuesta total:

1. Se define la aceleración del terreno en cada intervalo de tiempo.
2. Se define sus propiedades estructurales, la matriz de masa, matriz de rigidez lateral y se estima las fracciones del amortiguamiento modal.
3. Se define las frecuencias y los modos naturales de vibración.
4. Se determina los componentes modales de la distribución de la fuerza sísmica efectiva.
5. Se determina la contribución de la respuesta del n-eximo modo mediante:
 - a. Análisis estático de una estructura sometida a fuerzas laterales para hallar la respuesta estática modal.
 - b. Determinar las pseudo aceleraciones del n-eximo modo de vibración de un sistema de 1GDL a aceleraciones de terreno por métodos números de tiempo.
 - c. Determinaremos la respuesta de n-eximo modo.
6. Combinar las contribuciones modales para determinar la respuesta total.

2.3.7.2.3. Idealización estructural y respuesta sísmica

(Chopra et al, 2014) Es coincidencia que la respuesta calculada con la respuesta real de una estructura durante el sismo depende de la calidad de la idealización estructural, con el aumento de los niveles de movimiento, periodos naturales y fracciones de amortiguamiento aumentan; para producir un cambio de periodo en donde se puede describir el comportamiento de la estructura por medio del intervalo completo de amplitudes de deformación se idealiza una



estructura no lineal cuyas propiedades de rigidez y amortiguamiento serán variables con su nivel de deformación. Si los periodos calculados, los modos y las fracciones de amortiguamiento se estiman representando las propiedades durante el sismo usaremos el procedimiento del análisis modal cuya precisión predecirá a la respuesta lineal. Los periodos y los modos naturales se calculan partiendo de la idealización de la estructura, lo que determina la respuesta de la idealización como la calidad; por lo que los elementos estructurales y no estructurales que contribuyen a la masa y a la rigidez de la estructura en las amplitudes de movimiento se incluirán en la idealización estructural.

2.3.7.2.4. Respuesta máxima del espectro de respuesta sísmica

(Chopra et al, 2014) El análisis de la historia proporciona una respuesta estructural en función al tiempo pero su diseño estructural se basa en los valores máximos de las fuerzas y las deformaciones presentadas durante la respuesta esperada en un sismo; para los sistemas de 1GDL la respuesta puede determinarse a partir del espectro de respuesta al movimiento del terreno sin necesidad de un análisis de la historia de la respuesta, pero para sistemas de VGDL se pueden calcular partiendo del espectro de respuesta cuyo resultado no es exacto pero es suficiente para precisar las aplicaciones del diseño estructural.

2.3.7.2.5. Interpretación del análisis del espectro de respuesta

Procedimiento para el análisis dinámico de una estructura que será sometida a excitación sísmica reducida a una serie de análisis estáticos, para cada modo considerado; el análisis estático proporciona respuesta modal estática la que multiplicaremos por la ordenada espectral para obtener la respuesta modal máxima. El análisis del espectro de respuesta es un procedimiento del análisis dinámico por utilizar propiedades de vibración (frecuencias naturales, modos naturales y fracciones de amortiguamiento modal) y las características Dinámicas del movimiento del terreno por medio de su espectro de respuesta.

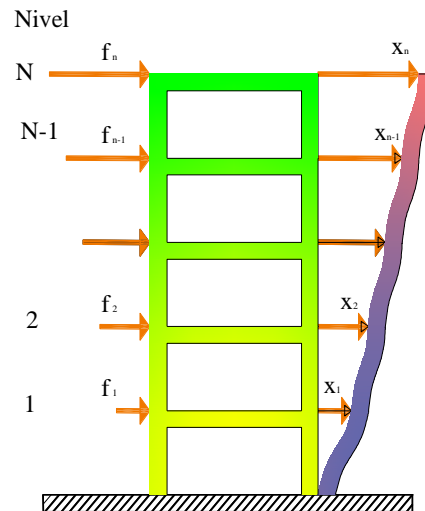


Figura 13: Valores máximos de los desplazamientos laterales y fuerzas estáticas equivalentes laterales asociadas con el n-ésimo modo (Chopra et al, (2014)).

2.4. Definición de la acción sísmica utilizando normativas

Las normativas se rigen a criterios de descomposición y superposición modal, estas varían en función de los parámetros que consideren como: la severidad de los terremotos, el periodo fundamental del edificio, las condiciones locales del suelo y otros parámetros que indican dichas normas.

2.4.1. Normativa Sismorresistente Chilena Nch-433/96.

(Normativa Sismorresistente Chilena, 1996) Esta normativa específica al coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas por ductilidad donde R (factor de modificación varía entre 2 y 7); el mapa de zonificación chilena define 3 regiones con aceleraciones de 0.2 g, 0.3 g y 0.4 g; su importancia se divide entre A, B, C y D con un factor de amplificación máximo de 1.2; cuyas condiciones locales de suelo se clasifican en 4 tipos: I, II, III y IV; que varían desde roca hasta suelo blando.

El desplazamiento relativo máximo entre pisos medido desde el centro de masas para cada dirección de análisis será: $\Delta_{lim} = 0.02h$

Donde h, es la altura de entrepiso (sin multiplicar desplazamientos por R); el desplazamiento en cualquier otro punto será de 0.01 h para limitar los efectos de torsión.

El análisis estático tendrá la ecuación siguiente:

$$V = C_s * I * W \quad (38)$$



Donde:

C: coeficiente sísmico.

I: coeficiente relativo al edificio.

P: peso total del edificio sobre el nivel basal

Donde el coeficiente sísmico dependerá del tipo de edificio, la zona sísmica y las condiciones locales del suelo. En la normativa no existe ningún requisito explícito para detalles dúctiles.

2.4.2. Normativa Sismorresistente Mexicana

(Normativa de Diseño Por Sismo, 2004) Proponen la siguiente expresión fundamental:

$$V = \frac{C_s}{Q} * W \quad (39)$$

Donde:

C_s : Coeficiente sísmico

Q : coeficiente de reducción de las fuerzas en función del periodo estructural, el sistema estructural y el periodo del suelo.

En esta normativa no se aplica el factor de uso tampoco la importancia del edificio; C_s se obtendrá directamente de tablas en función de la zona sísmica y las condiciones locales del suelo. El concepto de ductilidad tampoco es explícito debido a una corrección luego del terremoto de 1985 en donde se concluye que una de las causas fue que omitieron el coeficiente de reducción por ductilidad, es por ello que las condiciones de muchos pórticos necesitan requisitos especiales de ductilidad.

2.4.3. Normativa Sismorresistente Peruana E.030

2.4.3.1. Zonificación



Figura 14: Zonas Sísmicas (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Tabla 1

Factores de zona (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

2.4.3.2. Perfiles de Suelo

- Perfil I Tipo S0: Roca Dura
- Perfil I Tipo S1: Roca o Suelos Muy Rígidos
- Perfil I Tipo S2: Suelos Intermedios
- Perfil I Tipo S3: Suelos Blandos
- Perfil I Tipo S4: Condiciones Excepcionales

Tabla 2

Clasificación perfiles de suelo (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Clasificación de los Perfiles de Suelo			
Perfil	\bar{V}_s	\dot{N}_{60}	\bar{S}_u
S0	> 1500 m/s	-	-
S1	500 m/s a 1500 m/s	> 50	> 100 kPa
S2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S3	180 m/s >	15 >	25 kPa a 50 kPa
S4	Clasificación basada en el EMS (Estudio de mecánica de Suelos)		



2.4.3.3. Parámetros de Sitio (S, TP y TL)

Tabla 3

Factor de suelo "S" (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Factor de suelo "S"				
Suelo zona	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
Z ₄	0.80	1.00	1.05	1.10
Z ₃	0.80	1.00	1.15	1.20
Z ₂	0.80	1.00	1.20	1.40
Z ₁	0.80	1.00	1.60	2.00

Tabla 4:

Periodos T_P y T_L

	Períodos "T _P " Y "T _L "			
	Perfil de suelo			
	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
T _P (s)	0.3	0.4	0.6	1.0
T _L (s)	3.0	2.5	2.0	1.6

2.4.3.4. Factor de Amplificación Sísmica (C)

$$T < T_p \quad C = 2.5 \quad (40)$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 * \left(\frac{T_p}{T} \right) \quad (41)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 * \frac{(T_p * T_L)}{T^2} \quad (42)$$

Este coeficiente se interpreta como el factor de amplificación de la aceleración estructural respecto de la aceleración en el suelo.

2.4.3.5. Categoría de las Edificaciones y Factor de Uso (U)

Para edificios con aislamiento sísmico en la base se podrá considerar U = 1

2.4.3.6. Categoría y Sistemas Estructurales

Tabla 5

Categoría de edificaciones y Factor "U" (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Categoría	Descripción	Factor "U"
Edificaciones Esenciales (A)	A1: Establecimientos de salud del Sector Salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud	Ver nota 1



	A2: Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra un sismo severo tales como: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, locales municipales, centrales de comunicaciones. Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. Edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre, tales como instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades.	1.5
Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se considerarán depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento	1.3
Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1
Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares	Ver nota 2

Nota 1: Las nuevas edificaciones de categoría A1 tendrán aislamiento sísmico en la base cuando se encuentren en las zonas sísmicas 4 y 3. En las zonas sísmicas 1 y 2, la entidad responsable podrá decidir si usa o no aislamiento sísmico. Si no se utiliza aislamiento sísmico en las zonas sísmicas 1 y 2, el valor de U será como mínimo 1,5.

2.4.3.7. Sistemas Estructurales

1. Estructuras de Concreto Armado

Tabla 6

Sistema estructural (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

% Cortante	
Pórticos	80 % de la fuerza cortante en la base actúa sobre las columnas de los pórticos
Muros Estructurales	Muros estructurales sobre los que actúa por lo menos el 70 % de la fuerza cortante en la base.
Dual	La fuerza cortante que toman los muros está entre 20 % y 70 % del cortante en la base del edificio.



Edificaciones de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL)

Resistencia sísmica y de cargas de gravedad está dada por muros de concreto armado de espesores reducidos; prescinde de extremos confinados y el refuerzo vertical se dispone en una sola capa.

Categoría y Sistemas Estructurales

Tabla 7

Categoría Y Sistema Estructural (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Categoría de la Edificación	Zona	Sistema Estructural
A1	4 y 3	Aislamiento Sísmico con cualquier sistema estructural.
	2 y 1	Estructuras de acero tipo SCBF, OCBF y EBF. Estructuras de concreto: Sistema Dual, Muros de Concreto Armado. Albañilería Armada o Confinada
A2	4, 3 y 2	Estructuras de acero tipo SCBF, OCBF y EBF. Estructuras de concreto: Sistema Dual, Muros de Concreto Armado. Albañilería Armada o Confinada
	1	Cualquier sistema.
B	4, 3 y 2	Estructuras de acero tipo SMF, IMF, SCBF, OCBF y EBF. Estructuras de concreto: Pórticos, Sistema Dual, Muros de Concreto Armado. Albañilería Armada o Confinada. Estructuras de madera
	1	Cualquier sistema.
C	4, 3, 2 y 1	Cualquier sistema.

2.4.3.8. Sistemas Estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas (R₀)

Tabla 8

Sistemas Estructurales (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Sistema Estructura	Coeficiente Básico de Reducción R₀ (*)
Acero: Pórticos	
Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	6
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8



Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

2.4.3.9.Regularidad Estructural

Estructuras Regulares son las que, en su configuración resistente a cargas laterales, no presentan las irregularidades.

Estructuras Irregulares son aquellas que presentan una o más de las irregularidades indicadas en las Tablas.

2.4.3.10.Factores de Irregularidad (I_a , I_p)

El factor I_a se determinará como el menor de los valores de la Tabla N° 8 de la (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018) correspondiente a las irregularidades estructurales existentes en altura en las dos direcciones de análisis.

El factor I_p se determinará como el menor de los valores de la Tabla N° 9 de la (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018) correspondiente a las irregularidades estructurales existentes en planta en las dos direcciones de análisis.

Coefficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmicas, R

El coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas se determinará como el producto del coeficiente R_0 determinado a partir de la Tabla 6 y de los factores I_a , I_p obtenidos de las Tablas N° 8 y N° 9.

$$R = R_0 * I_a * I_p \quad (43)$$

Propone la siguiente expresión:

$$V = \frac{Z * U * C * S}{R} * W \quad (44)$$

Donde

Z: es zonificación sísmica en función a la distribución espacial sísmica observada; para un periodo de 50 años varía desde 0.10 g hasta 0.45 g Tabla 1.



S: es factor suelo y varía en función a la zona y el tipo de suelo con valores desde 0.8 hasta 2.

C: es factor de amplificación sísmica, está en función al Periodo del suelo y de la estructura.

U: es el factor de categoría de la estructura y factor de uso, esta divide a las estructuras en 4 tipos de edificios, toma valores desde 1 hasta 2 dependiendo la importancia de la estructura Tabla 5.

R: es la regularidad estructural y está en función de Ro: coeficiente básico de Reducción de las fuerzas sísmicas, Ia irregularidad en altura e Ip irregularidad en planta.

El Coeficiente sísmico es definido por

$$C_s = Z * U * C * S \quad (45)$$

2.4.3.11. Análisis Estructural

Para estructuras regulares, el análisis podrá hacerse considerando que el total de la fuerza sísmica actúa independientemente en dos direcciones ortogonales predominantes; en irregulares se considerará el caso más desfavorable.

Solicitaciones sísmicas verticales se considerarán en el diseño de los elementos verticales, en elementos horizontales de gran luz, en elementos post o pre tensados y en los voladizos o salientes de un edificio. Se considera que la fuerza sísmica vertical actúa en los elementos simultáneamente con la fuerza sísmica horizontal y en el sentido más desfavorable para el análisis.

2.4.3.12. Modelos para el Análisis

El modelo para el análisis deberá considerar una distribución espacial de masas y rigideces que sean adecuadas para calcular los aspectos más significativos del comportamiento dinámico de la estructura.

Para propósito de esta Norma las estructuras de concreto armado y albañilería podrán ser analizadas considerando las inercias de las secciones brutas, ignorando la figuración y el refuerzo. Para edificios en los que se pueda razonablemente suponer que los sistemas de piso funcionan como diafragmas rígidos, se podrá usar un modelo con masas concentradas y tres grados de libertad por diafragma, asociados a dos componentes ortogonales de traslación



horizontal y una rotación. En tal caso, las deformaciones de los elementos deberán compatibilizarse mediante la condición de diafragma rígido y la distribución en planta de las fuerzas horizontales deberá hacerse en función a las rigideces de los elementos resistentes.

Deberá verificarse que los diafragmas tengan la rigidez y resistencia, suficientes para asegurar la distribución antes mencionada, en caso contrario, deberá tomarse en cuenta su flexibilidad para la distribución de las fuerzas sísmicas. El modelo estructural deberá incluir la tabiquería que no esté debidamente aislada. Para los pisos que no constituyan diafragmas rígidos, los elementos resistentes serán diseñados para las fuerzas horizontales que directamente les corresponde.

En los edificios cuyos elementos estructurales predominantes sean muros, se deberá considerar un modelo que tome en cuenta la interacción entre muros en direcciones perpendiculares (muros en H, muros en T y muros en L).

Estimación del Peso (P) El peso (P), se calcula adicionando a la carga permanente y total de la edificación un porcentaje de la carga viva o sobrecarga que se determina de la siguiente manera:

- 1) En edificaciones de las categorías A y B, se tomará el 50 % de la carga viva.
- 2) En edificaciones de la categoría C, se tomará el 25 % de la carga viva.
- 3) En depósitos, el 80 % del peso total que es posible almacenar.
- 4) En azoteas y techos en general se tomará el 25 % de la carga viva.
- 5) En estructuras de tanques, silos y estructuras similares se considerará el 100 % de la carga que puede contener.

Procedimientos de Análisis Sísmico. - Deberá utilizarse uno de los procedimientos siguientes:

- Análisis estático o de fuerzas estáticas equivalentes.
- Análisis dinámico modal espectral.

El análisis se hará considerando un modelo de comportamiento lineal y elástico con las sollicitaciones sísmicas reducidas.

2.4.3.13. Análisis Dinámico Modal Espectral

Cualquier estructura puede ser diseñada usando los resultados de los análisis dinámicos por combinación modal espectral según lo especificado en este numeral. **Modos de Vibración** Los



modos de vibración podrán determinarse por un procedimiento de análisis que considere apropiadamente las características de rigidez y la distribución de las masas. En cada dirección se considerarán aquellos modos de vibración cuya suma de masas efectivas sea por lo menos el 90 % de la masa total, pero deberá tomarse en cuenta por lo menos los tres primeros modos predominantes en la dirección de análisis.

2.4.3.14. Aceleración Espectral

Para cada una de las direcciones horizontales analizadas se utilizará un espectro inelástico de pseudo-aceleraciones definido por:

$$S_a = \frac{Z * U * C * S}{R} * g \quad (46)$$

Para el análisis en la dirección vertical podrá usarse un espectro con valores iguales a los 2/3 del espectro empleado para las direcciones horizontales.

2.4.3.15. Fuerza Cortante Mínima

Para cada una de las direcciones consideradas en el análisis, la fuerza cortante en el primer entresque del edificio no podrá ser menor que el 80 % del valor calculado según **Análisis Estático o de Fuerzas Estáticas Equivalentes** para estructuras regulares, ni menor que el 90 % para estructuras irregulares. Si fuera necesario incrementar el cortante para cumplir los mínimos señalados, se deberán escalar proporcionalmente todos los otros resultados obtenidos, excepto los desplazamientos.

2.4.3.16. Tratamiento de Resultados

En caso se utilicen por lo menos siete juegos de registros del movimiento del suelo, las fuerzas de diseño, las deformaciones en los elementos y las distorsiones de entresque se evaluarán a partir de los promedios de los correspondientes resultados máximos obtenidos en los distintos análisis. Si se utilizaran menos de siete juegos de registros, las fuerzas de diseño, las deformaciones y las distorsiones de entresque serán evaluadas a partir de los máximos valores obtenidos de todos los análisis.

Las distorsiones máximas de entresque no deberán exceder de 1,25 veces de los valores indicados en la Tabla 9



Límites, distorsión de entrepiso. Las deformaciones en los elementos no excederán de 2/3 de aquellas para las que perderían la capacidad portante para cargas verticales o para las que se tendría una pérdida de resistencia en exceso a 30 %.

2.4.3.17. Requisitos De Rigidez, Resistencia Y Ductilidad

Determinación de Desplazamientos Laterales

Desplazamientos laterales se calcularán multiplicando por 0,75 R los resultados obtenidos del análisis lineal y elástico y para las Irregulares se multiplicaras por R.

Desplazamientos Laterales Relativos Admisibles

Tabla 9

Límites, distorsión de entrepiso (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018)

Material Predominante	(Δ_i/h_{ei})
Concreto Armado	0,007
Acero	0,010
Albañilería	0,005
Madera	0,010
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0,005

Los límites de la distorsión (deriva) para estructuras de uso industrial serán establecidos por el proyectista, pero en ningún caso excederán el doble de los valores de esta Tabla 9.

Redundancia

Cuando sobre un solo elemento de la estructura, muro o pórtico, actúa una fuerza de 30 % o más del total de la fuerza cortante horizontal en cualquier entrepiso, dicho elemento deberá diseñarse para el 125 % de dicha fuerza (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018).

2.4.4. Norma Técnica E. 031 Aislamiento Sísmico

2.4.4.1. disposiciones generales

Aislador: Elemento estructural verticalmente rígido y horizontalmente flexible.

Amortiguamiento Efectivo: Energía disipada en la respuesta cíclica.

Desplazamiento traslacional: Desplazamiento lateral máximo, excluyendo desplazamiento torsional natural y accidental.



Interfaz de Aislamiento: Lugar donde se encuentra el aislador, limitada en la parte superior con la superestructura y en la inferior con la subestructura o cimentación.

Nivel de Base: Primer nivel por encima del interfaz de aislamiento; incluye vigas, columnas, losas, capiteles y elementos de conexión.

Rigidez Efectiva o Secante: Relación entre Fuerza y desplazamiento laterales.

Scragging: Degradación temporal de las propiedades mecánicas de los aisladores elastomérico.

Sismo Máximo Considerado (SMC): 1.5 veces el sismo de diseño especificado en la E.030.

Sistema de Aislamiento: Incluye aisladores, elementos que transfieren fuerzas entre elementos del sistema como vigas, losas, capiteles y conexiones.

Sistema de restricción de desplazamientos: Elementos que controlan progresivamente el desplazamiento lateral.

Sistema de restricción contra viento: Dispositivos independientes.

2.4.4.2.Requisitos del diseño

2.4.4.2.1.Desarrollo y presentación del proyecto

2.4.4.2.1.1.Características Técnicas para indicar en los planos

Configuración del sistema estructural: calificación de irregularidades y sus restricciones

Sistema de Aislamiento sísmico: tomando en cuenta las condiciones ambientales, la fuerza de viento, resistencia a fuego, fuerza a la restitución lateral, restricción al desplazamiento, estabilidad por carga vertical, volteo, monitoreo inspección y reemplazo

Sistema Estructural: distribución de la fuerza horizontal, separación entre edificios, estructuras que no son edificios

Elementos estructurales y componentes no estructurales: Componentes sobre la interfaz de aislamiento, componentes que cruzan la interfaz de aislamiento, componentes por debajo de la interfaz de aislamiento, componentes estructurales de grandes luces.

Efectos de las cargas sísmicas y combinaciones de carga

Propiedades del sistema de aislamiento sísmico: propiedades nominales de un aislador (3 ciclos de ensayo), propiedades límites de los componentes del sistema de aislamiento sísmico, factores de modificación de las propiedades, límite superior y límite inferior del comportamiento fuerza-desplazamiento de los componentes del sistema de aislamiento sísmico, propiedades del sistema de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo, límite superior y límite inferior de las propiedades del sistema de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo



2.4.4.2.1.2. Selección del procedimiento de análisis para estructuras aisladas

1. Diseño de las estructuras sísmicamente aisladas
2. Análisis estático o de fuerzas estáticas equivalentes
3. Análisis dinámico

2.4.4.2.1.3. Procedimiento de fuerzas estáticas equivalentes

1. Características de deformación del sistema de aislamiento sísmico
2. Desplazamientos laterales considerados para el diseño
3. Fuerzas laterales mínimas requeridas para el diseño
4. Distribución vertical de la fuerza
5. Límites de la distorsión angular de entrepiso o deriva

2.4.4.2.1.4. Procedimiento de análisis dinámico

1. Modelo estructural de la edificación
2. Descripción del procedimiento
3. Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos

2.4.4.3. Revisión del diseño

Criterios para la revisión del diseño: del diseño y los programas requeridos, realizada por un especialista, que deben incluir espectros de respuesta y registro de aceleración, selección de los de los dispositivos, programa de ensayos de los prototipos, diseño final de las instalaciones.

2.4.4.3.1. Ensayos

Validación de propiedades de los aisladores

Fuerza-deformación y amortiguamiento utilizados en el análisis y diseño, deben ser verificadas con anterioridad a su uso.

Componentes del aislamiento deben ser ensayados incluyendo el sistema de restricción.

Los ensayos especificados deben emplearse para validar propiedades.

Laboratorio deberá contar con certificación de acuerdo al ASTM E04 o similar.

Fabricante debe acreditar que realizó los ensayos de caracterización de propiedades y de alta performance de aisladores sísmicos en un laboratorio reconocido a nivel mundial.

El fabricante es responsable de la calidad y procesos de fabricación de todos los insumos.



Ensayos de Cualificación: Cuantificar los efectos de calentamiento debido a cargas cíclicas, velocidad de cargas cíclicas, velocidad de carga, scragging, variabilidad e incertidumbre, exposición medioambiental y contaminación.

Ensayos de los aisladores Prototipo.

Se fabricarán dos aisladores prototipo a escala natural, idénticos a los aisladores de obra, por cada tipo y tamaño diferente que exista dentro del sistema de aislamiento.

Las pruebas deben incluir efecto de los sistemas de restricción. La capacidad máxima debe ser considerada mediante ensayos.

Los ensayos serán realizados preferentemente antes de la fabricación de aisladores de obra.

Aisladores usados en el ensayo de prototipos no deben ser usados en la obra.

Secuencia y ciclo de los ensayos de los aisladores prototipo:

1. Ensayos deben realizarse a una carga vertical igual al promedio del 100% de la carga viva más el 50% de efectos debido a la carga viva en todas las unidades de aislamiento.
2. Los ensayos deben incluir como mínimo:
 - 2.1. Veinte ciclos completos con inversión de carga, para una fuerza correspondiente a la fuerza lateral de diseño para viento.
 - 2.2. Cualquiera de las siguientes secuencias:
 - 2.2.1. Tres Ciclos completos en cada uno de los siguientes desplazamientos: 0.25 DM, 0.5 DM, 0.67 DM y 1 DM, donde DM está determinado de acuerdo con:

$$D_M = \frac{(S_{aM} * T_M^2)}{4 * \pi^2 * B_M} \quad (47)$$

donde:

S_{aM} : Ordenada del espectro elástico de pseudo aceleraciones correspondiente al sismo máximo, en mm/s².

$$S_{aM} = 1.5 * Z * U * C * S g \quad (48)$$

T_M : Periodo Efectivo de la estructura sísmicamente aislada asociado al desplazamiento traslacional D_M en la dirección de análisis.

P: Peso de la estructura.

k_M : Rigidez efectiva (secante) del sistema de aislamiento en la dirección de análisis, calculada de la siguiente forma:

$$k_M = \frac{(\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|)}{2D_M} \quad (49)$$



$\sum|F_M^+|$: Sumatoria de los valores positivos en todos los aisladores del sistema de aislamiento para un desplazamiento positivo igual al desplazamiento D_M , en kN.

$\sum|F_M^-|$: Sumatoria de los valores absolutos de las fuerzas en todos los aisladores del sistema de aislamiento para un desplazamiento negativo igual al desplazamiento D_M , en kN.

g : Aceleración de la gravedad.

B_M : Factor de amortiguamiento, correspondiente a la razón entre la ordenada espectral para 5% de amortiguamiento efectivo β_M correspondiente al desplazamiento traslacional D_M , que se indica en la siguiente tabla:

Factor de amortiguamiento β_M	
Amortiguamiento efectivo β_M	Factor B_M
≤ 2	0.8
5	1
10	1.2
20	1.5
30	1.7
≥ 40	1.9

β_M : se basará en el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento determinado en concordancia con:

$$\beta_M = \frac{(\sum E_M)}{(2 * \pi * k_M * D_M^2)} \quad (50)$$

$\sum E_M$: Energía total disipada por el sistema durante un ciclo completo de respuesta al desplazamiento D_M , en kN-mm.

La secuencia subsiguiente realizada dinámicamente con un periodo efectivo T_M con un ciclo completo de carga y descarga para cada una de las siguientes amplitudes de desplazamiento: 1 DM, 0.67 DM, 0.5 DM y 0.25 DM; aplicando luego una secuencia análoga y un ciclo completo para cada una de las amplitudes de desplazamiento 0.25 DM, 0.5 DM, 0.67 DM y 1 DM. Se permite un intervalo de reposo entre estas dos secuencias.

Tres ciclos completos al desplazamiento traslacional 1 DM.

Cualquiera de las siguientes secuencias:

Ciclos completos a 0.75 veces el desplazamiento traslacional, 0.75 DM.

La prueba anterior llevada de forma dinámica con un periodo efectivo DM. Esta prueba puede incluir conjuntos separados de varios ciclos de carga, donde cada conjunto consiste en no menos de cinco ciclos continuos.



Adicionalmente a lo anterior se debe realizar combinaciones de carga máxima y mínima:

Carga vertical máxima

$$Carga\ vertical\ máxima : 1.25(CM + CV) + 1(CSH + CSV) + 0.2 * CN \quad (51)$$

Carga vertical mínima

$$Carga\ vertical\ mínima : 0.9 * CM - 1(CSH + CSV) \quad (52)$$

CM: Carga muerta.

CV: Carga Viva.

CSH: Carga sísmica horizontal.

CSV: Carga sísmica vertical $0.5(1.5ZS)CM$.

CN: Carga de nieve.

1. En estos ensayos las cargas verticales combinadas se deben considerar como la fuerza de compresión promedio en todos los aisladores del mismo tipo tamaño.
2. Valores de carga axial y desplazamiento serán mayores a los determinados utilizando límite superior e inferior.
3. El periodo efectivo T_M es más bajo que el determinado por análisis utilizando límite superior e inferior.

Desplazamiento total

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) * \left(\frac{12 * e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (53)$$

Donde:

D_M = Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico, en la dirección de análisis, como se indica en la ecuación 6, expresado en mm .

y = Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la solicitación sísmica considerada, expresada en mm.

e = Excentricidad obtenida como la suma de la distancia en planta entre el centro de masa de la estructura sobre la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico, más la excentricidad accidental, tomada como 5% de la mayor dimensión en planta del edificio en dirección perpendicular a la de la fuerza sísmica considerada, expresada en mm.

b = Dimensión menor de la proyección en planta de la estructura, medida perpendicularmente a la dimensión mayor, d , expresada en mm.

d = Dimensión mayor de la proyección en planta de la estructura, expresada en mm .



PT = Razón entre el período traslacional efectivo del sistema de aislamiento sísmico y el período rotacional efectivo del sistema de aislamiento sísmico; calculada mediante un análisis dinámico o como se indica en la ecuación 9, pero no requiere ser menor que 1:

$$P_T = \frac{1}{r_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (54)$$

Donde:

r_a = Radio de giro del sistema de aislamiento sísmico, expresado en mm, el cual es igual a en sistemas de aislamiento con planta rectangular de dimensiones b x d.

N = Número de aisladores.

x_i, y_i = Distancias horizontales entre el centro de masas del sistema de aislamiento sísmico y el aislador i-ésimo, medidas en las direcciones de los ejes del sistema de aislamiento sísmico, expresadas en mm.

2.4.4.3.2. fuerzas laterales mínimas requeridas para el diseño

2.4.4.3.2.1. Fuerza lateral sísmica mínima V_h

$$V_h = k_M * D_M \quad (55)$$

Donde:

k_M = Rigidez efectiva (secante) del sistema de aislamiento sísmico en la dirección horizontal de análisis, calculada con la Ec. (49), expresada en kN/mm.

D_M = Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico, en la dirección de análisis, como se indica en la Ec. (47), expresado en mm.

2.4.4.3.2.2. Fuerza de corte mínima V

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_o} \quad (56)$$

Donde:

R_a = Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre el sistema de aislamiento sísmico, calculado como $3/8R_0$, pero no menor que 1 ni mayor que 2.

R_0 = Coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre base fija, dependiente de las características de la estructura, definido en la Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente.



V_{st} = Fuerza cortante no reducida actuante sobre los elementos por encima del nivel de base, como se indica en la ecuación 12, expresada en kN.

$$V_{st} = V_b \left(\frac{P_s}{P} \right)^{(1-2.5\beta_M)} \quad (57)$$

Donde:

P = Peso sísmico de la estructura sobre la interfaz de aislamiento, determinado según la Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente, expresado en kN.

P_s = Peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interfaz de aislamiento, calculado en forma similar a P pero sin incluir el nivel de base, expresado en kN.

β_M = Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico para el desplazamiento traslacional DM según la Ec. (50) (expresado como fracción del amortiguamiento crítico).

2.4.4.3.2.2.1.Límites de V_s

El valor de la fuerza cortante en la base sobre el sistema de aislamiento sísmico. V_s , debe ser mayor o igual que el máximo valor de:

- a. La fuerza sísmica lateral requerida por la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente para una estructura con base fija, con un peso igual al peso sísmico efectivo (P_s) y un período igual al período del sistema de aislamiento sísmico (TM) calculado con las propiedades correspondientes al límite superior y considerando $U=1$.
- b. La fuerza cortante en la base correspondiente a la carga de viento de diseño factorada.
- c. La fuerza lateral sísmica (V_{st}), calculada con la ecuación de la presente Norma Técnica y con V_b igual a la fuerza requerida para activar plenamente el sistema de aislamiento sísmico utilizando el mayor valor de los siguientes:
 - Las propiedades del sistema de aislamiento sísmico correspondientes al límite superior.
 - 1,5 veces las propiedades nominales, requeridas para activar completamente el sistema de aislamiento sísmico.
 - La capacidad máxima de un sistema “fusible” de restricción al viento.
 - La fuerza de fricción de ruptura de un sistema de deslizamiento, o.
 - La fuerza para cero desplazamientos de un sistema de deslizamiento después de un ciclo dinámico completo de movimiento de amplitud DM.

2.4.4.3.3.DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LA FUERZA

$$F_1 = \frac{(V_b - V_{st})}{R_a} \quad (58)$$



$$F_i = \frac{p_i * h_i^k}{\sum_{j=2}^n p_j * h_j^k} * V_s \quad (i > 1) \quad (59)$$

$$k = 14 * \beta_M * T_f \quad (60)$$

Donde:

F_1 = Fuerza sísmica lateral en el nivel de base, expresada en kN

F_i = Fuerza sísmica lateral en el nivel i, expresada en kN

h_i = Altura del nivel i respecto al nivel de base, expresada en mm

n = Número de pisos de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.

P_i = Parte del peso P que se ubica en o se asigna al nivel i, expresada en kN.

R_a = Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre el sistema de aislamiento sísmico, calculado como $3/8R_0$, pero no menor que 1 ni mayor que 2.

T_f = Periodo fundamental de la estructura considerada con base fija, en la dirección de análisis, evaluado con cualquiera de los procedimientos indicados en la (Norma E.030 Diseño Sismorresistente, 2018), expresado en segundos.

V_b = Fuerza cortante total en el sistema de aislamiento sísmico o en los elementos bajo el nivel de aislamiento, como se indica en la Ec. (55), expresada en kN .

V_s = Fuerza cortante en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento sísmico, como se prescribe en la Ec. (56) y con los límites indicados en el numeral 21.3 del artículo 21 de la presente Norma Técnica, expresada en kN .

V_{st} = Fuerza cortante no reducida actuante sobre los elementos por encima del nivel de base, como se indica en la Ec.(57), expresada en kN .

β_M = Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico para el desplazamiento traslacional según la Ec. (50)(expresado como fracción del amortiguamiento crítico).

2.4.5.Uniform Building Code (UBC)

(Norma UBC 97, 1997) indica que para el diseño del amortiguador debemos tener definido a que deriva deseamos llegar con la incorporación de estos, según esta normativa se tiene el siguiente procedimiento para el diseño del amortiguador:

1. Para hallar el amortiguamiento viscoso en X o Y tendremos en cuenta el factor de reducción de respuesta "B"



$$B = \frac{D_{\max}}{D_{\text{objeto}}} \quad (61)$$

Donde:

D_{objeto} = relación daño-deriva (referencias la norma E.031)

D_{\max} = deriva máxima obtenida del análisis dinámico tiempo historia con sismo de diseño, con la siguiente ecuación:

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{inh})}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})} \quad (62)$$

Donde:

β_{inh} : amortiguamiento inherente del estructura (suele ser el 20%)

β_{eff} : amortiguamiento efectivo.

$$\beta_H = \beta_{eff} - \beta_{inh} \quad (63)$$

Donde

β_H : Amortiguamiento Viscoso

2. Para el cálculo de la rigidez axial del brazo metálico:

$$K = \frac{E * A}{L} \quad (64)$$

Donde:

K: Es la rigidez del brazo metálico

E: Módulo de elasticidad del acero

A: Área del brazo

L: Longitud del brazo rígido

3. Calcularemos el coeficiente de amortiguamiento

$$\Sigma C_j = \frac{\beta_H * 2\pi * A^{1-\alpha} * \omega^{2-\alpha} (\Sigma m_l * \phi_l^2)}{\lambda (\Sigma \phi_{rj}^{1+\alpha} * \cos^{1+\alpha} \theta_j)} \quad (65)$$

Donde:

C_j : amortiguamiento para un amortiguador.

β_H : amortiguamiento viscoso de la estructura

A: amplitud de desplazamiento del módulo fundamental (desplazamiento modal de la losa del último nivel)

ω : frecuencia angular



- m_i : masa del nivel i
- ϕ_i : desplazamiento de nivel i (con nuestro sismo de diseño)
- λ : parámetro lambda
- ϕ_{ij} : desplazamiento relativo entre
- α : exponente alfa .
- θ_j : ángulo de inclinación del disipador j

Tabla 10

Valores de λ respecto de velocidad α

Exponente α	Parámetro λ
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3

$$C_j = \frac{\sum C_j}{N_{disipadores}} \quad (66)$$

Donde:

N: Número de disipares

2.5. Aisladores sísmicos

2.5.1. Introducción

Los aisladores dinámicos necesitan dispositivos para mantener los desplazamientos máximos horizontales dentro del límite de diseño, los que añaden condiciones de no linealidad, lo que requiere modelizar el impacto de base y los bordes para el acervo de amplificaciones dinámicas, una desventaja de esto es la disminución del aislamiento dinámico aun cuando no existen límites claramente definidos siendo los valores aceptados de entre 5 y 40cm para sismos severos hasta el doble de los mismos para extremos (Buckle y Mayes 1990; Skinner et al. 1993)

(Korswagen et al, 2012) Aislar sísmicamente un edificio consiste en poder desacoplar horizontalmente a la estructura del suelo, donde el sistema de aislación y sus dispositivos de aislación pueden variar de acuerdo con las necesidades o preferencias de quien lo diseñe.



Los dispositivos de aislación son elementos estructurales muy flexibles en la dirección horizontal y sumamente rígidos en la vertical que permiten grandes deformaciones horizontales ante las sollicitaciones sísmicas.

Donde el sistema de aislación se entiende a grupo conformado por elementos estructurales que incluye a todos a los aisladores, sus conexiones y a los elementos estructurales que transmiten fuerza entre el sistema de aislación y la superestructura (se encuentra por encima del sistema de aislación) y subestructura (se encuentra por encima del sistema de aislación). Al límite imaginario entre la superestructura y la subestructura se le conoce como interfase de aislación.

Entre los principales tipos de aisladores tenemos a:

- los aisladores elastoméricos de caucho de bajo amortiguamiento (LRD),
- los aisladores con núcleo de plomo (LRB),
- los aisladores de alto amortiguamiento (HDR)
- el sistema de péndulo de fricción invertido y de doble curvatura.

2.5.2. Tipos de aisladores

2.5.2.1. Aislador de base de fricción

Es un sistema donde la estructura se apoya sobre juntas deslizantes y estas fuerzas de fricción tienden a oponerse al movimiento disipado de energía (Mostaghel y Tandakuchi 1983; Kelly y Beucke 1983; Constantinou y Tadjbakhsh 1984; Fan et al. 1988; Bozzo et al. 1990; Dorka 1994; Tsopelas y Constantinou 1994) (Bozzo et al, 2000)

Para un aislador de fricción tipo Coulomb en el que se asume las superficies siempre en contacto, se verificar la condición de no deslizamiento para determinar la continuidad de la masa deslizante o fija a la cimentación cuyo coeficiente de fricción varia con la naturaleza de las superficies deslizantes, velocidad relativa y presión en el instante; cuya desventaja que al incrementar la presión de contacto se reduce el coeficiente de fricción afectándose también a la masa.

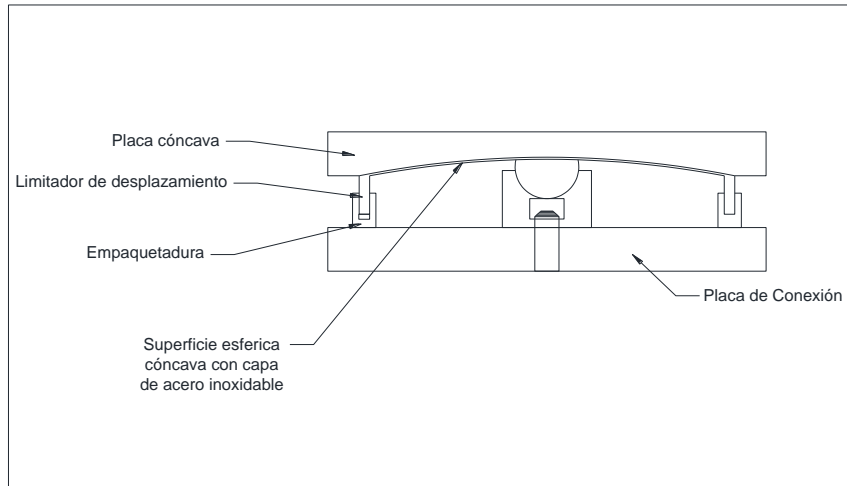


Figura 15: figura representativa del aislador de base de fricción

2.5.2.2. Sistema pendular friccionante FPS

Mejora al anterior al tener una fuerza restitutiva, que evita desplazamientos remanentes por estar entre las placas deslizantes curvadas. Este sistema emplea el peso propio de la estructura para recentrar el edificio (Mokkha et al. 1990; Zayas et al. 1988; Zayas et al. 1990) (Bozzo et al, 2000).

La fuerza restitutiva se puede obtener por resortes externos o placas deslizantes curvas, la rigidez deslizante es necesaria para definir el periodo de la conexión, este se usa para definir el periodo de la estructura perfectamente rígida; Cuya desventaja si la masa se detiene la condición de no deslizamiento es válida durante la fase de \dot{x} bes cero; El coeficiente varía entre 0.05 y 0.15.

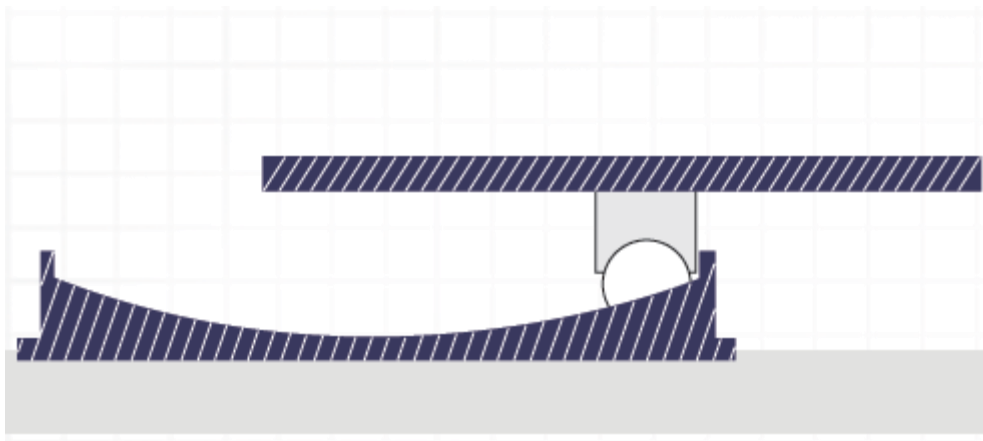


Figura 16: Sistema pendular friccionante FPS



2.5.2.3. Aisladores elastoméricos

2.5.2.3.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LRD)

(Bozzo et al, 2000) También llamados aisladores elastoméricos de caucho natural. Fueron usados sin refuerzo o placa de conexión; pero era necesario aumentar la rigidez vertical, entonces se debía reforzar intercalando láminas de acero con capas de caucho, entonces la rigidez vertical que era cientos de veces la rigidez horizontal.

(Korswagen et al, 2012) Los LRD intercalan capas de acero y caucho, colocados dentro de un molde, serán sometidos a temperatura de 140°C por seis horas. Después la reacción del epóxico de las capas y el caucho se vulcaniza, entonces se vuelve elástica, debiendo ser la adhesión resistente antes de que falle la goma y su capacidad para resistir cargas incrementa.

Existen una placa de acero que se colocan arriba y abajo del aislador, que no dejan que el núcleo se mueva y evitar la compresión del caucho ante cargas de gravedad. En la Figura 17 se muestran en corte el sistema LRD.

El amortiguamiento de este tipo de aisladores está entre el 5 y 10%, por lo que a veces es necesario usar algún amortiguador adicional. La fuerza cortante y la deformación lateral tienen una relación lineal.

Ventajas de LRD:

- Fáciles de modelar y fabricar.



Figura 17: Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LRD)



2.5.2.3.2. Aislador elastomérico con núcleo de plomo LRB

(Korswagen et al, 2012) Es el más usado, su configuración comprende capas de neopreno vulcanizado a las planchas metálicas, su periodo fundamental está por encima de la base fija lo que evita amplificaciones dinámicas (Fang et al. 1988) (Bozzo et al, 2000).

El amortiguamiento equivalente para el neopreno varía en función del nivel de su deformación, para deformaciones bajas es de 0.3 y para las más altas se reduce a 0.05, el valor recomendado es de 0.1; un factor adicional de la inestabilidad de los aisladores de neopreno es su pandeo; el desplazamiento horizontal en la base del aislador sumada a la carga axial soportada produce una inestabilidad similar a la de una columna normal pero inferior por la baja rigidez del neopreno.

Una desventaja es el momento de vuelco producido por las cargas laterales el que puede ocasionar en términos científicos esfuerzos de tracción que sean mayores a los de compresión por el peso propio del edificio, ya que los aisladores están sometidos a grandes fuerzas de tracción los mismos que dependerán de la esbeltez del edificio cuyos estudios experimentales fueron hechos por (Griffith et al. 1990a; Griffith et al. 1990b), por lo que se recomienda proyectar estructuras con una relación baja entre altura y ancho, sin embargo hay estudios sobre el diseño de estructuras en la que los apoyos de neopreno están sometidos a tracción (Griffith et al. 1990b).

Por la gran variedad de apoyos de neopreno y sus distintas características además de transferir las fuerzas de la superestructura a la sub estructura (Correa et al, 2011), disipan y aíslan los desplazamientos de traslación y rotación debido a la expansión térmica, contracción, deflexión, cargas dinámicas y vibraciones constituidos por caucho natural y sintético que combina la rigidez y el amortiguamiento en un solo elemento, cuya constitución es un elemento Elastomérico vulcanizado en una sola pieza adherida a las placas y sus componentes son:

- Policloropeno (neopreno virgen)
- Polisopreno natural (caucho natural)

Las ventajas del neopreno sobre las del caucho natural es su comportamiento a baja temperatura, mayor resistencia y menor deterioro bajo condiciones ambientales. La inclusión de los refuerzos tiende a incrementar el amortiguamiento histerético logrando la rigidez vertical porque se disminuye el efecto del pandeo en las caras laterales con una deflexión mínima.



Para el modelamiento de un apoyo de neopreno es importante saber el módulo de elasticidad transversal de la goma Elastomérico, el que relaciona las fuerzas horizontales que se aplican sobre el apoyo con las fuerzas horizontales propias cuyo valor suele estar comprendido entre 0.06 y 2.07 MP (AASHTO 14-IA, 2008).

Para el cálculo de desplazamientos máximos laterales

$$D_M = \frac{S_{aM} * (T_M)^2}{4 * \pi^2 * B_M} \quad (67)$$

Dónde:

S_{aM} = ordenada del espectro elástico de Pseudo aceleraciones del sismo máximo considerado.

$$S_{aM} = 1.5 * Z * U * C * S_g \quad (68)$$

Para el cálculo de los desplazamientos totales

$$D_{TM} = D_M * \left(1 + \frac{y}{P_T^2} * \frac{12 * e}{b^2 + d^2}\right) \quad (69)$$

Donde:

y,x= distancia entre el CR del sistema de aisladores y el elemento de interés (aislador más alejado) medido perpendicularmente a la dirección del sismo considerado.

d= dimensión corta en planta de la estructura.

b= dimensión larga en planta de la estructura.

e= excentricidad actual más accidental.

P_T = Relación del periodo traslacional efectivo de todo el sistema de aislamiento sísmico y el periodo, cuya fórmula es:

$$P_T = \frac{1}{r_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (70)$$

Donde:

N= Cantidad de aisladores

r_a = Radio de giro del sistema de aislamiento sísmico

$$r_a = \frac{1}{12} \sqrt{b^2 + d^2} \quad (71)$$

Tendremos en cuenta que:

$$D_{TM} \leq 1.1 * D_M \quad (72)$$



Para calcular el diámetro de aislador tendremos dos opciones

$$D_1 = 1.5 * D_{TM} \quad (73)$$

Y la opción 2 que es:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 * P_{u \max}}{\pi * \sigma_{\max \text{ perm}}}} \quad (74)$$

Donde:

$$\sigma = 8 \text{MPa} = 815.777 \text{ T/m}^2.$$

La carga Axial última tendrá la siguiente ecuación

$$P_{u \max} = 1.25 * CM + 1.25 * CV + SISMO \quad (75)$$

Donde:

$P_{u \max}$ = Envolvente o se puede considerar que la carga de sismo es 0.30 de la carga muerta.

El área que necesitaremos para el aislador lo definiremos como la relación entre la rigidez y la carga axial última.

$$\text{Área} = \frac{\text{Carga axial última}}{\text{Rigidez a la compresión}} \quad (76)$$

Para calcular Qd

$$\frac{Q_d}{W} = (3\% - 10\%) \quad (77)$$

Con las cargas de servicio = $CM + 0.5CV$ Se determinará el peso (W) que recibe cada aislador, se puede determinar el peso promedio para cada tipo de aislador. Teniendo en cuenta estas relaciones de Q_d/W se determina Q_d para cada tipo de aislador; donde Q_d (Fuerza Característica de cada aislador – (Antisismica, 2020))

Para calcular el diámetro de núcleo de plomo

$$A_{\text{plomo}} = \frac{f_y}{\sigma_y} (10 \text{MPa} \text{ o } 1500 \text{psi}) \quad (78)$$

Dónde:

$$f_y = 1.10 * Q_d \quad (79)$$

$$D_L = \sqrt{\frac{4 * 1.10 * Q_d}{\pi * \sigma_y}} \quad (80)$$

En el catálogo DIS (Antisismica, 2020) para diámetro hay un rango de DL, el cálculo debe encontrarse en ese rango.

B.4.3. Criterios Generales De Modelación



Materiales utilizados

- Acero: los elementos estarán conformados por acero estructural 60° con un límite de fluencia de 4200 kg/cm.
- Concreto: se utiliza concreto que estará en las losas con una resistencia característica a compresión f'_c cuyo módulo de elasticidad es $15000\sqrt{f'_c}$.

Estructuras con aislamiento sísmico

La ductilidad global se alcanza por plastificación local de estos elementos estructurales, en particular en los extremos de barras (vigas y columnas), donde es más fácil y eficiente proporcionar detalles que aseguran la ductilidad.

Debido a diversas incertidumbres es difícil estimar de forma precisa, mediante un análisis no lineal, las demandas de ductilidad local en cada parte de la estructura.

En el proceso de diseño sismorresistente de una estructura, se define un coeficiente sísmico, que es la relación de la cortante en la base V y el peso total de la estructura W , es decir $C_S = V/W$. Este coeficiente se representa gráficamente en función del periodo fundamental del edificio. Una estructura debe resistir adicionalmente la diferencia entre el coeficiente sísmico requerido por un terremoto severo y el correspondiente al nivel de las fuerzas de diseño proporcionadas por la normativa. Esta observación es particularmente importante considerando que un edificio aislado tendrá un comportamiento prácticamente lineal elástico.

2.5.2.3.3. Aisladores elastoméricos de caucho de alto amortiguamiento (HDR)

(Korswagen et al, 2012) Los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) en sistenéis es caucho modificado con aditivos (tales como aceites, carbón en polvo, resinas, polímeros u otros elementos que le permiten alcanzar un mayor amortiguamiento por sí solos), intercalado con láminas de acero y en la parte superior e inferior se les coloca una placa de acero para confinar el núcleo.

Su amortiguamiento varía entre el 10 y 20% para deformaciones angulares menores a $\alpha=2$. Para producir ciclos estables pasa por un proceso llamado scragging en el cual se le somete a varios ciclos de deformación y se logran ciclos estables para deformaciones menores. La relación entre la fuerza cortante y la deformación es lineal como se observa en la; sin embargo, forma un bucle que encierra un área menor a los LRB.



Es importante notar que al agregarle aditivos al caucho se le modifican algunas propiedades mecánicas como la elongación a la ruptura. Otra desventaja es que éste tipo de aisladores se deterioran más rápidamente.



Figura 18: Aisladores elastoméricos de caucho de alto amortiguamiento (HDR)

2.6. Amortiguadores

(Martinez Rodrigo, 2009) Dentro del estudio de control pasivo para estructuras, se considera las características de la masa, rigidez y amortiguamiento, esta respuesta dinámica usa el movimiento propio y movimiento externo de la estructura, el control pasivo usa la rigidización conocido también como el aumento de la masa estructural, para que estos disipen parte de la energía introducida por la fuente de excitación; cualquier respuesta dinámica dependerá del amortiguamiento.

Cuando las vibraciones verticales son extremas, es cuando el aumento de amortiguamiento debe añadir el amortiguador fluido-viscoso (FVD13).

En un FVD se tiene un pistón de fuerza donde el flujo de un fluido tiene una elevada viscosidad, este se encuentra dentro de un recipiente cilíndrico, el que tiene pequeños orificios cuya función es alivianar la carga.

Este sistema de disipación de energía, cuando es sometido a diferentes velocidades entre sus extremos, logra conseguir una fuerza axial la que es proporcional a la velocidad sometida.



Con el tiempo el diseño del amortiguador puede hacer que no oponga resistencia en su longitud, este no interfiere en la rigidez, tampoco en los valores de frecuencias naturales de la estructura, aunque tiene una pequeña probabilidad en donde su comportamiento sea predecible.

Ventajas del amortiguador FVD:

- Se disipa la energía en un mayor rango de frecuencias, trabaja también en resonancias, así como con los Amortiguadores de Masa Sintonizada (TMD14).
- Su funcionamiento esta apegado a los principios de fricción o plastificación, como en el caso de los Disipadores Metálicos o por Fricción, pero estos son costosos porque se sustituyen periódicamente, lo que se puede solucionar con FVD sin partes mecánicas que dura más tiempo.
- Las fuerzas que recibe la estructura son menores.
- Su configuración hace estable el comportamiento del disipador además de conservar el fluido disipativo frente a la temperatura.

En 1960 es cuando se acondicionaron el uso a estructuras civiles, fue entonces que más de 10000 amortiguadores de tipo viscoelástico fueron colocadas en cada una de las torres gemelas del World Trade Center en Nueva York, con el fin de minimizar vibraciones de viento. En la actualidad estos pasaron a formar parte del diseño sismorresistente.



Figura 19: Amortiguadores fluido viscosos