



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y EDUCACIÓN  
CONTINUA  
MAESTRIA INGENIERIA ESTRUCTURAL Y SISMICA

*Tesis para la obtención del grado de  
Máster en  
Ingeniería Estructural y Sísmica*

**DISEÑO DE SISTEMA DE AISLAMIENTO  
DE BASE PARA EDIFICIO DE 10 PISOS EN  
CONCRETO Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON  
DISEÑO DE ESTRUCTURA CONVENCIONAL DE  
10 PISOS EN CONCRETO UBICADOS EN  
SUELO TIPO C EN COLOMBIA**

Elaborado por:

Ing. Jorge Edelberto Agudelo Dávila.

Tutor de tesis:

Ing. Francisco López Almansa, PhD.

Managua Nicaragua, Octubre 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la vida que nos abraza y que me ha dado todo, especialmente a las mujeres que siempre me acompañan: mi hija Luciana y mi esposa Yessica.*

## RESUMEN

Un sistema de aislamiento sísmico en la base permite disminuir o mitigar la energía sísmica que recibe una estructura ante la exposición a eventos sísmicos de intensidad moderada o elevada, y se logra mediante el desacoplamiento *parcial* entre la superestructura de la edificación y su cimentación (o subestructura). Su diseño comprende la elección de los elementos que harán parte del sistema que permitan la ejecución de este objetivo a través de un procedimiento de análisis estructural. El propósito de esta aplicación consiste en realizar la selección, diseño y verificación del sistema de aislamiento, cuya tecnología se analizará para ser instalada en una edificación convencional en concreto de 10 pisos ubicada en suelo tipo C en Colombia.

Como parte de la etapa preparatoria, se diseñarán los elementos que componen la superestructura de una edificación de uso residencial cuyo sistema estructural *combinado* está conformado por muros estructurales de concreto con pórticos resistentes a momentos con sistema de base fija, ubicada en la ciudad de Manizales, Caldas, Colombia. A partir de la suposición de amortiguamiento y periodo objetivos del sistema aislado y siguiendo las recomendaciones establecidas por el Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y del ASCE/SEI 7-16, se realizará la selección y diseño de la capa de aislación; con lo cual, mediante el procedimiento de análisis de fuerza lateral equivalente, se obtendrán las fuerzas laterales mínimas de diseño a distribuir en la altura, para diseñar de manera preliminar los componentes de la superestructura.

Finalmente, con la ayuda de un software de estructuras - especialmente de la compañía CSI (*Computers & Structures, Inc.*) - se construirá un modelo tridimensional de la estructura, con el que se pretende comprobar los valores objetivos atribuidos, y corroborar que los desplazamientos de la edificación aislada no sobrepasen los máximos permitidos. Por último, se realizará un análisis comparativo de costos entre la estructura convencional y la estructura sísmicamente aislada.

**Palabras clave:** aislamiento sísmico, energía sísmica, apoyos de goma, materiales elastoméricos, vulnerabilidad sísmica de edificaciones.

## SUMMARY

A seismic isolation system at the base allows to reduce or mitigate the seismic energy received by a structure when exposed to moderate or high intensity seismic events, and is achieved through the partial decoupling between the building's superstructure and its foundation or substructure. Its design includes the choice of the elements that will be part of the system that allow the execution of this task through a rigorous structural analysis procedure. The purpose of this application is to carry out the selection, design and verification of the insulation system, the technology of which will be analyzed and made viable to be installed in a conventional 10-story concrete building located on type C soil in Colombia.

As part of the preparatory stage, all the components of the the superstructure and substructure of a residential building with fixed base Special Moment Frames system located in the city of Manizales (Colombia) will be designed. Next, based on the assumption of damping and target period of the isolated system and following the recommendations established by the colombian construction code (NSR-10) and ASCE / SEI 7-16, the selection and design of the insulation units or insulation layer will proceed; which, by means of the equivalent lateral force analysis procedure, the minimum design lateral forces to be distributed in the height of the building will be obtained, to preliminarily design the structural elements of the superstructure.

Finally, with the help of a commercial structural software, especially from the company CSI (Computers & Structures, Inc.), a three-dimensional model of the structure will be built, it is intended to verify the objective values attributed, in addition to corroborating that the movements of the isolated building do not exceed the maximum allowed. Finally, a comparative cost analysis will be carried out between the conventional structure and the seismically isolated structure.

**Keywords: seismic isolation, seismic energy, rubber supports, elastomeric materials, seismic vulnerability of buildings.**

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	2
SUMMARY .....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	9
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO SITUACIONAL .....	12
1. Antecedentes.....	12
2. Planteamiento del problema .....	14
3. Objetivos .....	16
3.1 Objetivo General.....	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. Justificación .....	17
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO .....	19
1. Bases de la dinámica estructural .....	19
2. Aislamiento sísmico .....	23
2.1 Funcionamiento de los aisladores sísmicos .....	25
2.2 Tipos de aisladores sísmicos .....	26
2.3 Diseño de aisladores y movimientos sísmicos .....	29
2.3.1 Procedimiento paso a paso para el diseño de un sistema de aislamiento sísmico acorde a NSR-10 Y ASCE/SEI 7-16, capítulo 17 .....	29
2.4 Breve historia de la aislación sísmica .....	45
2.5 Ventajas y desventajas y sistemas alternativos a la aislación sísmica .....	47
3. Marco normativo .....	50
CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO .....	54
1. Enfoque aplicativo .....	54
2. Contexto de aplicación .....	54

3.	Ubicación y características de la edificación de diseño.....	56
4.	Categorías de estudio.....	58
5.	Procedimiento.....	60
5.1	Análisis y diseño de la estructura convencional .....	60
5.1.1	Estudios geotécnicos (Exploración de campo) .....	60
5.1.2.	Planteamiento estructural .....	64
5.1.3.	Análisis y diseño estructural .....	66
5.2	Diseño del sistema de aislamiento.....	93
CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS .....		105
CAPÍTULO V. PROPUESTA DE SOLUCIÓN .....		107
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES .....		110
CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES.....		113
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		114

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Edificación sin aislamiento y con aislamiento sísmico de base (Banco de Desarrollo de América Latina, 2016) .....	9
Ilustración 2 Tipos de excitación dinámica. Tomada de Reyes, L. E. (1998). Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Bogotá, D.C.: Universidad de Los Andes....	22
Ilustración 3 Modelo bilineal de unidad aislante. (Cheng, Jiang, & Lou, 2008) .....	24
Ilustración 4 Aislador sísmico de goma (Kelly, 2013). .....	25
Ilustración 5 Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico ( Banco de Desarrollo de América Latina. (2016)).....	26
Ilustración 6 Aislador HDR (Bridgestone, 2017) .....	27
Ilustración 7 Aislador LRB (Bridgestone, 2017) .....	27
Ilustración 8 Aislador NRB (Bridgestone, 2017.....	28
Ilustración 9 Esquema aislador FPS ( Banco de Desarrollo de América Latina. (2016)) .....	29
Ilustración 10 Diagrama de histéresis aisladores NRB y LRB ( (Bridgestone Corporation, 2017) .....	38
Ilustración 11 Diagrama de interacción tensión crítica de pandeo y deformación angular (Bridgestone Corporation, 2017) .....	42
Ilustración 12 Procedimiento paso a paso para diseño de un sistema de aislamiento sísmico acorde a NSR-10 y ASCE/SEI 7-16 (El Autor) .....	44
Ilustración 13 Componentes de dispositivo elastomérico. Trevor E. Kelly. (2001). Base Isolation of Structures. Wellington, N.Z.: Holmes Consulting Group Ltd. ....	45
Ilustración 14 Fachada principal EDIFICIO DE ESTUDIO (Autor) .....	56
Ilustración 15 Fachada lateral EDIFICIO DE ESTUDIO (Autor).....	57
Ilustración 16 Vista en planta EDIFICIO DE ESTUDIO (El Autor).....	57
Ilustración 17 Vista en planta elementos estructurales EDIFICIO DE ESTUDIO (Autor).....	58
Ilustración 18: Mapa de amenaza sísmica (NSR-10) .....	62
Ilustración 19 Ubicación en planta elementos estructurales (El Autor) .....	64
Ilustración 20 Vista 3d de la edificación modelación en ETABS (El Autor) .....	65

Ilustración 21 Asignación de diafragmas rígidos (El Autor) .....	75
Ilustración 22 Periodo fundamental estructura base fija .....	76
Ilustración 23 Cortante basal estructura base fija (El autor) .....	77
Ilustración 24 Verificación de irregularidades en planta (El Autor).....	79
Ilustración 25 Parámetros de irregularidad en planta (NSR-10) .....	80
Ilustración 26 Parámetros irregularidad en altura (NSR-10) .....	81
Ilustración 27 Parámetros ausencia de redundancia (NSR-10) .....	82
Ilustración 28 Verificación Cortante Basal (El Autor) .....	84
Ilustración 29 Desplazamientos elásticos edificación de base fija (El Autor) .....	86
Ilustración 30 Derivas máximas obtenidas edificación de base fija (El Autor).....	87
Ilustración 31 Diseño acero longitudinal edificación de base fija (El Autor) .....	90
Ilustración 32 Diseño acero transversal edificación de base fija (El Autor) .....	90
Ilustración 33 Verificación de interacción de columnas P-M-M (El Autor) .....	91
Ilustración 34 Verificación demanda-capacidad (Chequeo de los 6/5). (El Autor).....	91
Ilustración 35 Diseño de Fundación edificación base fija (El Autor).....	92
Ilustración 36 Planta del edificio a proteger mediante asilamiento sísmico de base. (El Autor) .....	93
Ilustración 37 Características de las unidades de aislamiento NRB, LRB .....	102
Ilustración 38 Ubicación de los aisladores en la planta de la edificación (El Autor) .	103
Ilustración 39 Comprobación de periodo objetivo.....	104
Ilustración 40 Diseño de los elementos de la subestructura y superestructura.....	104
Ilustración 41 Gráfica comparativa entre desplazamientos horizontales.....	107
Ilustración 42 Gráfica comparativa entre derivas de edificaciones .....	108

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las unidades de construcción por categorías (NSR-10) .....	61
Tabla 2 Número mínimo de sondeos y profundidad (NSR-10) .....	61
Tabla 3 Valor de Aa y Av para ciudades capitales (NSR-10).....	61
Tabla 4 Clasificación de perfiles de suelo (NSR-10) .....	63
Tabla 5 Valores de coeficiente Fa (NSR-10) .....	63
Tabla 6 Valores de coeficiente Fv (NSR-10) .....	64
Tabla 7 Características geométricas de la edificación (El Autor) .....	66
Tabla 8 Dimensiones Acero de Refuerzo (NSR-10) .....	67
Tabla 9 Espesor para predimensionamiento de vigas (NSR-10) .....	68
Tabla 10 Carga muerta típica de entepiso (El Autor).....	69
Tabla 11 Cargas vivas típicas (El Autor) .....	69
Tabla 12 Carga de viento (El Autor) .....	70
Tabla 13 Cargas Impuestas en la Estructura (El Autor).....	70
Tabla 14 Parámetros sísmicos para espectro de diseño (NSR-10) .....	71
Tabla 15 Espectro de diseño y características sísmicas (El Autor).....	72
Tabla 16 Definición del sistema estructural (NSR-10) .....	73
Tabla 17 Participación modal estructura base fija (El Autor) .....	78
Tabla 18 Reacciones en la base estructura base fija (El Autor) .....	80
Tabla 19 Verificación ajuste FHE (El Autor) .....	83
Tabla 20 Verificación de ajuste FHE (El Autor) .....	85
Tabla 21 Derivas máximas permitidas (NSR-10).....	87
Tabla 22 Diseño de aisladores sísmicos en la base (El Autor) .....	94
Tabla 23 Cantidades de acero y concreto para la edificación de base fija (El Autor) .....	105
Tabla 24 Cantidades de acero y concreto para la edificación de base aislada (El Autor) .....	105
Tabla 25 Cantidades y costos asociados a la estructura de base aislada ( El Autor) .....	106

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de aislamiento sísmico de base consiste en un conjunto de elementos cuyo objetivo es mejorar el comportamiento sísmico de una edificación mediante la reducción de la energía sísmica que recibe una estructura. El principal concepto de funcionamiento consiste en generar una *discontinuidad* (desacoplamiento parcial) en la transmisión del movimiento sísmicos de intensidad moderada que van desde la subestructura hacia la superestructura; como resultado, la edificación presentará una reducción importante de daños en los elementos estructurales y no estructurales, con lo que se conoce como una mejora en el nivel de desempeño en comparación con una edificación de base fija.

Este tipo de “desconexión” se lleva a cabo utilizando elementos estructurales especiales conocidos como aisladores; los cuales aportan una baja rigidez lateral al sistema, al mismo tiempo que éstos tienen la capacidad de soportar cargas verticales de compresión.

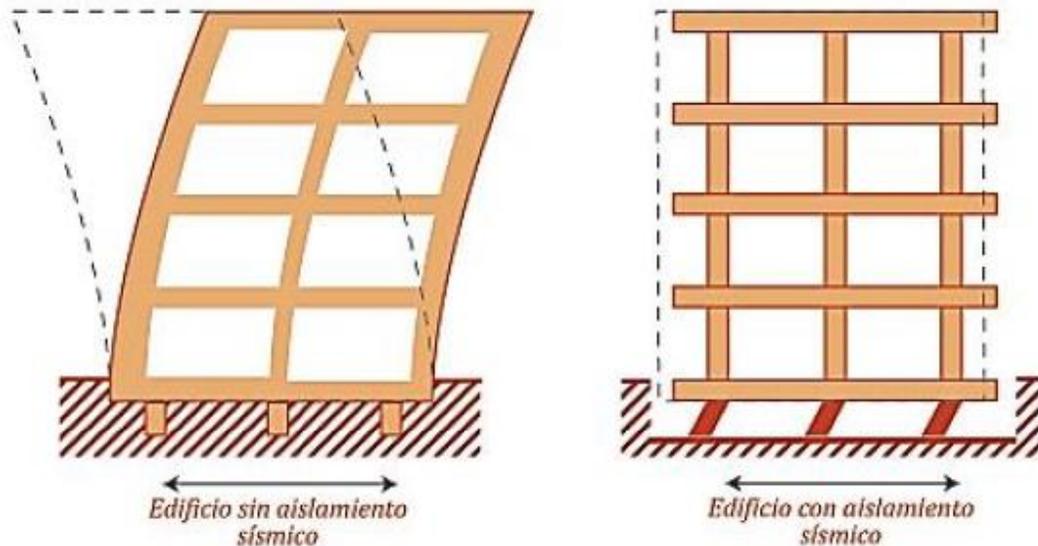


Ilustración 1 Edificación sin aislamiento y con aislamiento sísmico de base (Banco de Desarrollo de América Latina, 2016)

Las primeras técnicas utilizadas consistían unas veces en la inclusión de artefactos (como apoyos de madera rolliza); y otras veces, en el uso de varias capas de piedras

con superficies lisas sin mortero; cuyo fundamento de protección sísmico se basaba en la idea de “desconectar” el mecanismo que unía la superestructura con su cimentación en caso de la presencia de eventos sísmicos.

Dentro del funcionamiento de los tipos de aislación sísmica se encuentran los dispositivos que trabajan por la deformación de materiales elastoméricos (Rubber Bearings), dispositivos rodantes como Rodamiento de bolas; y finalmente, dispositivos deslizantes o friccionales como el Sistema de Péndulo Friccional (FPS por sus siglas en inglés). En cualquier caso, el objetivo primordial es disminuir los daños ocasionados a los componentes estructurales y no estructurales, al reducir energía sísmica que la subestructura transfiere a la superestructura, derivando en la reducción del desplazamiento relativo entre pisos y en un mejoramiento del nivel de desempeño sísmico esperado en la edificación.

El propósito de esta investigación subyace en realizar la selección y diseño de las unidades de aislamiento, cuya tecnología se analizará para ser instalada en una edificación de 10 pisos localizada en suelo tipo C, en este mismo orden de ideas se diseñarán los elementos estructurales de la superestructura con la ayuda de un software comercial de estructuras, especialmente de la compañía CSI (Computers & Structures, Inc.), para posteriormente realizar un análisis comparativo de costos entre la estructura convencional y la estructura sísmicamente aislada en la que también se incluirán los costos del sistema de aislamiento en Colombia.

El diseño de la estructura corresponderá a un desempeño de Ocupación Inmediata (IO-Immediate Occupancy) para un periodo de retorno de 475 años.

Por último, se hace necesario precisar que las unidades de aislamiento fabricado con materiales elastoméricos también conocidas como Rubber Bearings- necesitarán ser diseñadas dentro de los siguientes estados límites a partir de los parámetros geométricos y mecánicos de los mismos, de acuerdo a la normativa colombiana: desplazamiento de diseño total de los aisladores; es decir, el desplazamiento

incrementado con la inclusión de los respectivos efectos de torsión global del edificio; ya que la máxima distorsión angular no deberá ser excedida; fuerza máxima a tracción o fuerza vertical de levantamiento, toda vez que las unidades a usar deberán soportar este tipo de acciones y conservar su integridad; y la fuerza máxima vertical a compresión en condiciones sísmicas y en ausencia de las mismas.

## CAPITULO I. PLANTEAMIENTO SITUACIONAL

### 1. Antecedentes

Actualmente, los países que tienen más desarrolladas las disposiciones en materia de aislamiento sísmico en la base son Japón, Estados Unidos, China y Europa; mientras que, para el caso latinoamericano los países de Chile, México ya cuentan con un reglamento propio para estas mismas edificaciones. Por otro lado, los países como Ecuador y Colombia no han finalizado las normativas que guardan relación con esta temática. el país vecino Perú actualmente cuenta con normativa de aislamiento sísmico, denominada Norma Técnica E 031 “Aislamiento sísmico” la cual fue expedida en el año 2019.

Sin embargo para este último, la norma sismo resistente vigente para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones, es el Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (adoptada por medio de la ley 400 de 1997 y modificada por la ley 1229 de 2008), el cual en el título A.3.8 permite el uso de estructuras aisladas sísmicamente con condicionamiento al cumplimiento de la totalidad de los requisitos establecidos bien sea en el “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings – Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency. FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004; o en el “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006.

Por otro lado, se expone que existe una disparidad de los diferentes factores entre las diversas normas relacionadas con el aislamiento sísmico en la base (Piscal et al. 2016), como: las metodologías de análisis, toda vez que por lo general se limita la aplicabilidad sobre suelos duros, señalando además un límite de altura; el nivel de amenaza, ya que ésta se representa mediante niveles sucesivos que expresan su

probabilidad de excedencia durante un tiempo de exposición de una edificación ubicada en un lugar de interés en particular; las clases de suelo y los efectos de sitio, estas normas clasifican cada uno de los tipos del suelo y efectos de sitio bajo los mismos parámetros estudiados para edificaciones de base fija y aislada, repercutiendo en divergencias entre los factores de reducción de respuesta por amortiguamiento y en los espectros de diseño y el cálculo de desplazamientos y las fuerzas de diseño.

En consecuencia, y teniendo en cuenta que en el país existen cerca de 30 edificios diseñados y construidos con aislamiento sísmico en la base siguiendo los lineamientos y especificaciones albergadas en estas normas extranjeras, sin la debida adaptación al contexto sísmico local, derivando ello en sobre costos excesivos generados por las inconsistencias técnicas que limitan la expansión de esta técnica; se hará hincapié en la utilización de documentos como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (última versión) y la “Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia” (Piscal et al. 2018)

## 2. Planteamiento del problema

La ingeniería sísmica además de estudiar las respuestas sísmicas de las capas más superficiales de la tierra, profundiza en la interacción de éstas con la subestructura y la superestructura, la dinámica estructural, la vibración y detección de daños en estructuras y el aislamiento sísmico en la base de las edificaciones. En este mismo orden de ideas, la ingeniería estructural mediante el proceso de diseño pretende que ante las solicitaciones de carga (es decir, la Demanda), siempre sean menores a cualquiera de los criterios de resistencia (su Capacidad) que sean utilizados en una estructura dada, esto es:

$$\text{DEMANDA} < \text{CAPACIDAD}$$

Donde para este caso, la demanda implica una sollicitación energética que ingresa al sistema estructural causando fuerzas inerciales, las que a su vez son directamente proporcionales tanto a su contenido de masa - las cuales generalmente son constantes - como a las aceleraciones del suelo. Ahora bien, con el ánimo de dar un equilibrio técnico y económico entre la relación Demanda-Capacidad ( $D/C < 1$ ) del conjunto entero de la subestructura y superestructura, al mismo tiempo que se incrementan las aceleraciones del terreno que experimenta la edificación, se pueden encontrar los siguientes casos:

- Caso 1: Aumento de la capacidad  $C$ ; a lo que a su vez se plantean principalmente dos opciones: 1) Incrementar indefinidamente la resistencia de la edificación (lo cual sería altamente costoso), o 2) Utilizar el concepto de ductilidad (el cual es permitido por la mayoría de los códigos de diseño y construcción), permite que los elementos que forman parte del Sistema Primario de Resistencia Sísmica, SPRS, sobrepasen de manera controlada su límite elástico generando deformaciones permanentes.

- Caso 2: Disminución de la demanda D; al limitar la energía transmitida a la cimentación de la estructura, mediante el incremento de la capacidad de amortiguamiento que absorba la deformación del terreno, se reducirá la aceleración que experimenta la estructura por transmisión mecánica, cuyo efecto derivará en la reducción de las fuerzas inerciales de la misma.

La finalidad de este trabajo de ingeniería sísmica y estructural, se fundamenta en plantear la realización de un diseño del sistema de aislamiento sísmico en la base con dispositivos del tipo Rubber Bearings, instalados en un edificio localizado en un perfil de suelo tipo C en Colombia, y paralelamente a esto se realizará un análisis comparativo del sistema estructural de un edificio convencional que no posee este tipo de tecnología de aislación; con lo que se pretende demostrar la factibilidad de la implementación de este tipo de mecanismos, reconociendo además de los importantes beneficios que conlleva la utilización de estos dispositivos en este tipo de obras de ingeniería civil.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

El objetivo de esta tesis es diseñar un sistema de aislamiento de base para un edificio de 10 pisos de concreto ubicado en suelo tipo C en Colombia, esta solución se compara con la estructura convencional de base fija.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- 3.2.1 Analizar y diseñar la estructura de una edificación convencional de base fija de 10 pisos. Obtener las características principales del comportamiento estructural de la edificación de base fija como: periodos, peso, porcentaje de participación modal y desplazamientos.
- 3.2.2 Diseñar las unidades de aislamiento o *Rubber Bearings* de forma manual, a partir de la fijación del periodo y amortiguamiento objetivos
- 3.2.3 Analizar y diseñar la estructura del edificio aislado, incluyendo la capa de aislamiento.
- 3.2.4 Comparar costos directos de la estructura convencional de base fija y la estructura con aisladores en la base.

#### **4. Justificación**

En términos generales, los terremotos son movimientos súbitos de las placas de la corteza terrestre generados por la liberación de energía de deformación acumulada en forma de ondas sísmicas. Esto es, que el terremoto se produce siempre que se acumula altos niveles de esfuerzos y deformaciones de tal manera que se genera una ruptura brusca en el límite de dos o más placas o falla.

Este movimiento sísmico es un movimiento ondulatorio que lo conforman varios tipos de ondas, que cuando llegan a la base de la edificación implicará oscilaciones, desplazamientos, velocidades y aceleraciones de diferente magnitud en cada punto de la estructura, los cuales a su vez derivarán en la aparición de fuerzas en los elementos que hacen parte del sistema estructural. En caso que estas fuerzas superen la capacidad de resistencia de los elementos se podrá producir una falla en los mismos; y en el caso de presentarse la falla sucesiva de varios elementos estructurales, junto a otros desplazamientos importantes, se produciría el agotamiento o colapso local e incluso total de la estructura.

Es por esto que, en respuesta al daño causado por los frecuentes eventos sísmicos a los que se exponen las edificaciones construidas en las regiones más densamente pobladas hoy en día, las normativas sísmicas han evolucionado con la intención de mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones.

La importancia del aislamiento sísmico deriva en la mejora del comportamiento sísmico de una edificación, en donde se pretende asegurar la protección de la vida de sus ocupantes mientras que se protege la integridad del edificio y/o del contenido del mismo; esto con el ánimo de que la operatividad de la edificación se vea afectada en lo más mínimo ante la actuación de movimientos sísmicos en la base.

El diseño estructural tradicional está orientado a prevenir las fallas y pérdida de vidas, con un enfoque de diseño de tener en cuenta la eventual ocupación inmediata, su

mantenimiento y funcionamiento, además de asegurar una fácil reparación en caso de ser necesario realizar intervenciones estructurales; agregando que, para disipar la energía de un terremoto, el diseño tradicional se basa en la ocurrencia de daños a la estructura, tales como deformaciones elásticas y plásticas. Finalmente, el diseño dúctil de los elementos a flexión ayuda a evitar el colapso de la estructura. Inherente a este diseño, está la posibilidad de un daño significativo a la estructura, al contenido y una inoperativa e inservible estructura luego de un terremoto.

Por otro lado, el aislamiento sísmico proporciona un desempeño superior en comparación con el diseño estructural tradicional. Los esfuerzos y desplazamientos en la estructura se reducen significativamente toda vez que el sistema de aislamiento logra deformarse lateralmente reduciendo las aceleraciones transmitidas por el suelo durante el sismo. Después del sismo, el resultado es una estructura operativa y funcional con poco o ningún daño.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

### 1. Bases de la dinámica estructural

La dinámica es una rama de la mecánica, y estudia el movimiento de un cuerpo o de un sistema. Su finalidad consiste en *predecir* la deformación o desplazamiento de las estructuras sometidas a cargas variables en el tiempo.

Históricamente, la solución al problema del movimiento y sus causas se conoce como mecánica clásica y fue gracias a Isaac Newton (nacido en Inglaterra, 1642-1727), que pudo darse un gran avance a su entendimiento. Puede decirse que, Newton fijó el fundamento de la dinámica el cual puede encontrarse de manera resumida en las tres leyes que llevan su nombre, se aplican repetidamente durante el desarrollo de la teoría de la dinámica estructural:

- Primera ley de Newton o “Ley de la inercia”: *“Todo cuerpo permanecerá en su estado de reposo, o movimiento uniforme rectilíneo, a menos que sea obligado a cambiar de ese estado debido a la aplicación de cualquier tipo de fuerzas”*
- Segunda ley de Newton: *“La fuerza que actúa sobre un cuerpo y causa su movimiento, es igual a la tasa de cambio del momentum del cuerpo”*

$$Q = m * v = m * \frac{dx}{dt} = m * \dot{x}$$

*Ecuación 1 Ecuación de Momentum*

Donde:

Q = Momentum del cuerpo

m = masa del cuerpo

v = Velocidad del cuerpo

x = Desplazamiento del cuerpo o coordenada de localización del mismo

De acuerdo con lo anterior, y bajo el supuesto de que la masa del cuerpo permanece constante a través del tiempo, las fuerzas que actúan sobre el cuerpo son iguales a la tasa de cambio del momentum:

$$F = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(m * v) = m \frac{dv}{dt} = m * \dot{x} = m * a$$

*Ecuación 2 Ecuación de Momentum*

Donde:

F = Resultante de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo

a = aceleración del cuerpo

- Tercera ley de Newton o “Ley de acción y reacción”: *“A toda acción se opone siempre una reacción de igual magnitud; o las acciones mutuas entre los dos cuerpos son siempre iguales y opuestas”*

Además de estas leyes, en el estudio de la dinámica estructural también se encuentran implícitamente la aparición de otras variables; como la rigidez, que es la relación entre la fuerza que requiere aplicarse a un cuerpo o estructura y su desplazamiento.

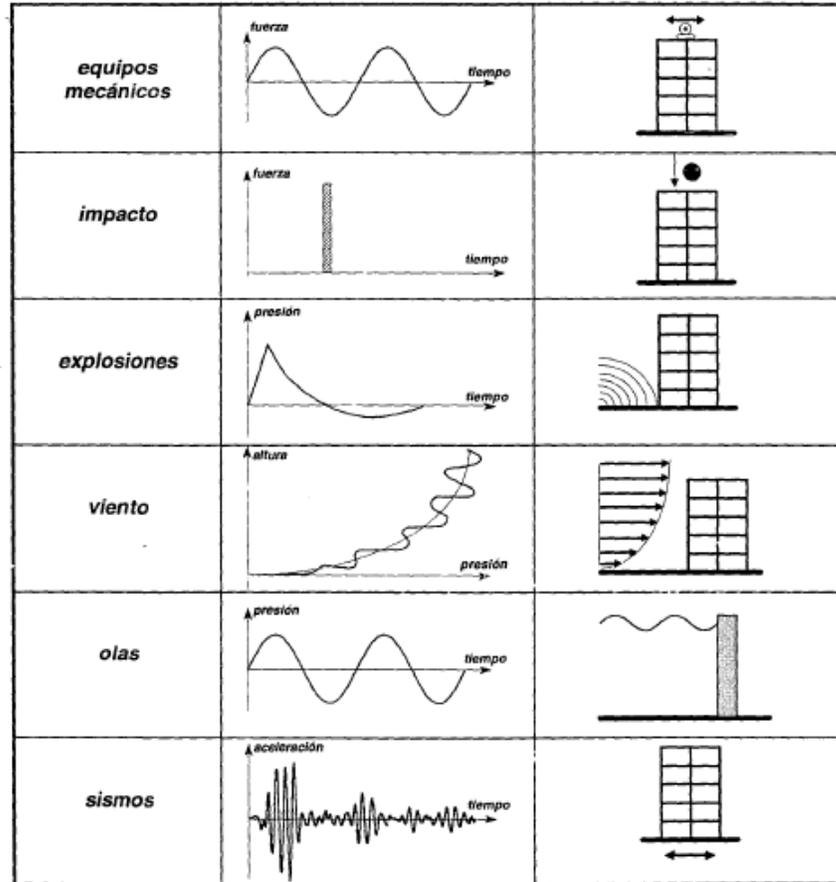
Por otro lado, todos los cuerpos al desplazarse generan algún tipo fricción entre sus partículas y/o con las partículas de otros cuerpos, produciendo una pérdida de energía que tiende a disminuir su movimiento en el tiempo. A este tipo de pérdida de energía ya sea cinética o potencial, se le conoce como amortiguamiento y esta energía puede transformarse en calor o ruido.

Básicamente, existen tres tipos de amortiguamiento:

- Amortiguamiento viscoso: Este amortiguamiento está directamente relacionado con la velocidad de un cuerpo que se encuentra en movimiento dentro de un fluido que tiende a perder energía cinética debido a que la viscosidad del fluido se opone a este movimiento.
- Amortiguamiento de Coulomb: Corresponde al fenómeno físico de la fricción entre superficies secas.
- Amortiguamiento histerético: Se presenta cuando un elemento estructural es sometido a ciclos de carga y descarga y el material del elemento se encuentra en el rango inelástico o no lineal, generando una degradación de la rigidez y un aumento de la fricción interna.

Como resultado, la estructura puede verse afectada a lo largo de su vida por diversos movimientos que derivarán en efectos dinámicos que van desde magnitudes despreciables hasta efectos que pueden poner en riesgo su estabilidad. Este tipo de movimientos o excitaciones dinámicas pueden ser de dos tipos:

- Armónicas: Son los efectos causados por maquinarias y equipos mecánicos que tienen componentes que rotan o se desplazan periódicamente.
- Aleatorias: son aquellas cuyo efecto es causado por las cargas del tipo: impacto, como la colisión entre dos masas; explosiones, cuando se producen ondas de presión que viajan en el aire o el terreno; viento, como la diferencia de presiones sucesivas que afectan una estructura; olas, como las que generan empujes hidráulicos; y sismos, como las vibraciones del terreno que producen movimientos importantes en la estructura.



*Ilustración 2 Tipos de excitación dinámica. Tomada de Reyes, L. E. (1998). Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Bogotá, D.C.: Universidad de Los Andes.*

Por otro lado, un sistema dinámico requiere ser idealizado: esto es, que por medio de un modelo matemático se expresará el comportamiento de la edificación ante las sollicitaciones de carga ó excitaciones establecidas anteriormente, conviene subrayar que el objetivo principal del análisis dinámico es conocer los desplazamientos (deformaciones) que resultarán del comportamiento de la estructura previo a su construcción, esto con la finalidad de garantizar que ésta cumpla con los criterios mínimos de desempeño fijados por las normativas de cada país, los cuales incluyen entre otros resistencia, rigidez, durabilidad y funcionamiento. La realización de estos objetivos implica un grado de complejidad, razón por la cual deben realizarse ciertas simplificaciones, tanto en lo que se requiere de la estructura, expresado en términos de cargas y deflexiones aceptables, como en la descripción de su comportamiento en el análisis dinámico.

## 2. Aislamiento sísmico

Es importante precisar que la aislación sísmica surge gracias a las consecuencias de los movimientos ocasionados por los sismos en las estructuras. Los sismos son generados por los movimientos de reajuste de las placas de la corteza terrestre, que a su vez acumulan deformaciones y tensiones en las zonas de contacto de las placas. Al ocurrir un sismo se produce la liberación de energía de deformación acumulada, que produce desplazamientos en las zonas de contacto. La energía liberada por los sismos es transmitida a las estructuras y si esta no puede ser disipada puede conducir al colapso o falla del sistema. Para reducir esta energía que llega a la estructura se propone los sistemas de aislamiento en la base.

En términos generales, se aísla la edificación sobre un material con baja rigidez para obtener una base flexible que filtra las altas frecuencias, evitando daños severos y colapsos en las edificaciones de aplicación.

Para la idealización del sistema aislado, se han desarrollado varios modelos matemáticos para representar el comportamiento histerético y viscoelástico de los aisladores; entre los modelos propuestos se encuentra el modelo bilineal, puesto que simplifica y caracteriza las propiedades mecánicas de los aisladores de forma aceptable.

La definición del modelo inicia con los parámetros básicos como las propiedades del aislador (amortiguamiento, rigidez horizontal, resistencia ante cargas axiales). El modelo bilineal utilizado para expresar la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral se puede definir por la rigidez elástica  **$K_e$** , la rigidez post-fluencia (*postyield*)  **$K_p$** , y resistencia característica  **$Q$** . Estos parámetros son claves para determinar las propiedades mecánicas de cada aislador.

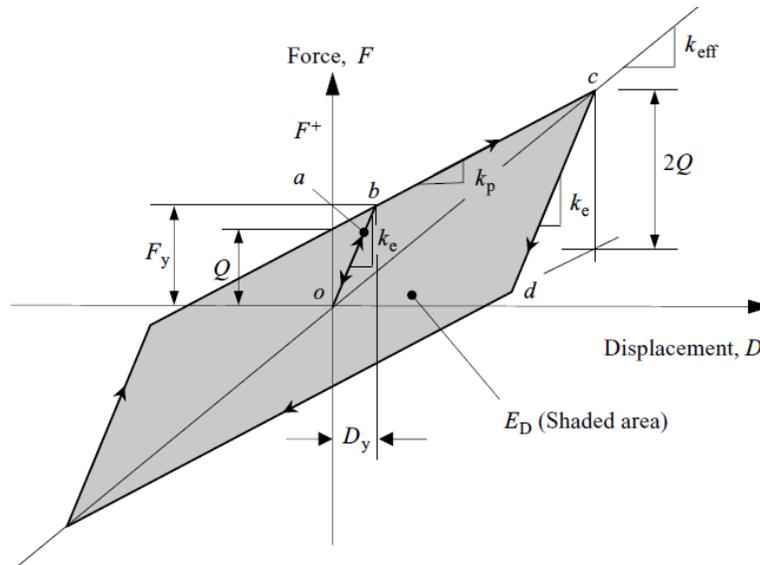


Ilustración 3 Modelo bilineal de unidad aislante. (Cheng, Jiang, & Lou, 2008)

Las unidades de aislamiento (aisladores sísmicos) son clasificados generalmente como del tipo elastomérico, y del tipo deslizante. Los elastoméricos se componen de placas de caucho y acero, mientras los tipos deslizantes dependen de la fricción entre las superficies en una unidad de montaje.

Los aisladores elastoméricos se fabricaron inicialmente de caucho natural, seguidamente se mejoraron con placas de acero. El espesor de la placa de acero es de aproximadamente 1 pulgada, y la capa de goma entre las placas de acero varía de 3 a 7.5 pulg. (Cheng, Jiang, & Lou, 2008). Estas placas de acero reducen en gran parte la deformación vertical. Se puede evidenciar de acuerdo a la experiencia con aisladores de elastoméricos que su vida útil supera los 50 años de servicio.

Los aisladores de tipo deslizante (fricción) presenta superficies de deslizamiento esférica que permite restaurar la ubicación inicial (centro) una vez se detiene el movimiento sísmico.

En el mercado, se pueden encontrar sistemas de aislamiento que usan bien sea los elastoméricos (de manera combinada), o los sistemas tipo deslizante. En este caso, los elastoméricos se utilizan para resistir la fuerza lateral y ofrecen restauración, mientras que el sistema deslizante se encarga muy bien de aportar mayor soporte ante cargas verticales. Existen además otros tipos de sistemas de aislamiento basados en

conceptos de energía disipada pasivamente como sistemas de aislamiento de base de fricción resiliente, sistemas de tipo resorte y sistemas de aislamiento de pilotes “sleeved-pile” Algunos sistemas sólo se limitan a ciertas estructuras de construcción. Durante los últimos 50 años, se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con esta tecnología, además de aproximadamente 200 casos de aplicaciones de sistemas con aislamiento en base de edificios y puentes en Estados Unidos, que soporta a su vez la aplicabilidad de estos elementos a las estructuras actuales.

## 2.1 Funcionamiento de los aisladores sísmicos

Los aisladores sísmicos son dispositivos instalados en la base de la edificación, que proporcionan flexibilidad a la superestructura y garantiza la reducción de movimientos sísmicos en la edificación. Los aisladores son diseñados para que los movimientos horizontales generados por el sismo no sean transmitidos a la estructura.



Ilustración 4 Aislador sísmico de goma (Kelly, 2013).

En este orden de ideas, lo que se hace en primer lugar es elegir un periodo fundamental que va a tener la edificación una vez se encuentre con la totalidad de sus unidades de aislamiento (ilustración 5, “ $T_2$ ” es el *periodo objetivo*); en otros términos, lo que se persigue es disminuir demanda sísmica al pasar de “ $T_1$ ” (periodo fundamental de una edificación de base fija) a “ $T_2$ ”.

Además de lo anterior, “aislar parcialmente” la estructura implica aumentar el amortiguamiento en el sistema, con lo que se llega a contabilizar una reducción adicional de la demanda sísmica.

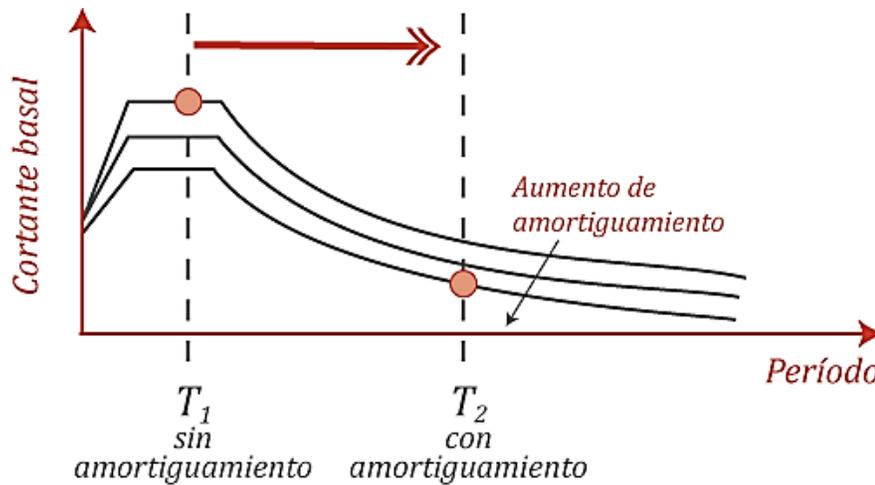


Ilustración 5 Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico ( Banco de Desarrollo de América Latina. (2016))

## 2.2 Tipos de aisladores sísmicos

Existen varios tipos de dispositivos, los más utilizados son los elastoméricos que cuentan con gomas de alta resistencia alternadas con láminas o capas de acero. Estos elementos tienen gran resistencia a cargas verticales que genera la estructura. Algunos dispositivos incluyen núcleos de plomo que admiten grandes deformaciones y producen alto amortiguamiento, el cual varía en función de las características geométricas del elemento de aislación. Estos son algunos tipos de aisladores con elastoméricos.

- Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (*High Damping Rubber Bearing, HDRB*) Se compone básicamente de capas de goma intercaladas con láminas de acero; aquí la goma posee componentes especiales que logran incrementar su amortiguamiento, como por ejemplo carbono negro. El amortiguamiento efectivo de un HDRB puede encontrarse en el rango del 10% al 15%

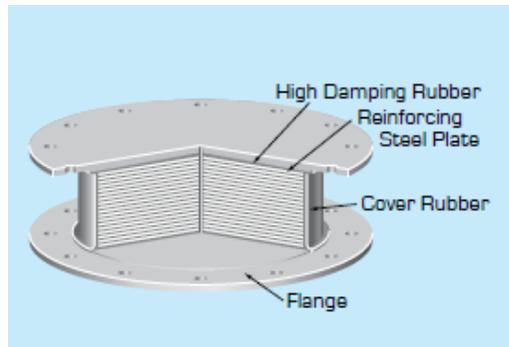


Ilustración 6 Aislador HDR (Bridgestone, 2017)

- Aislador elastomérico con núcleo de plomo (*Lead Rubber Bearing, LRB*). Otro tipo de aislador que brinda capacidades de flexibilidad y disipación de energía es el LRB, el cual consiste en una unidad compuesta por goma que incluye un núcleo central de plomo (metal que en su estado natural posee alta ductilidad). El desempeño de estas unidades depende de la fuerza lateral impuesta, al punto que para grandes fuerzas laterales el núcleo de plomo se deforma hasta alcanzar la fluencia, de manera que se desarrolla amortiguamiento histerético con absorción de energía. El amortiguamiento equivalente de este tipo de aislador varía entre el 15% y el 35%.

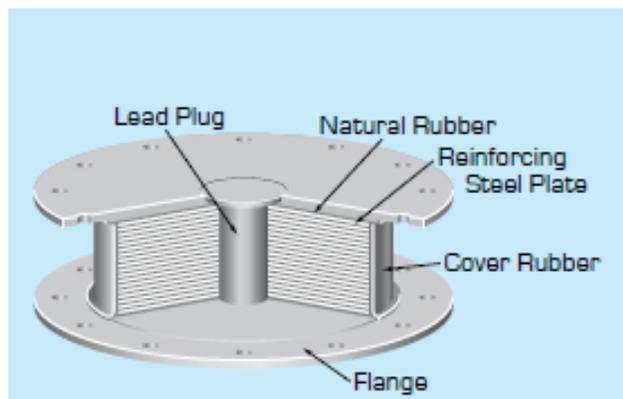
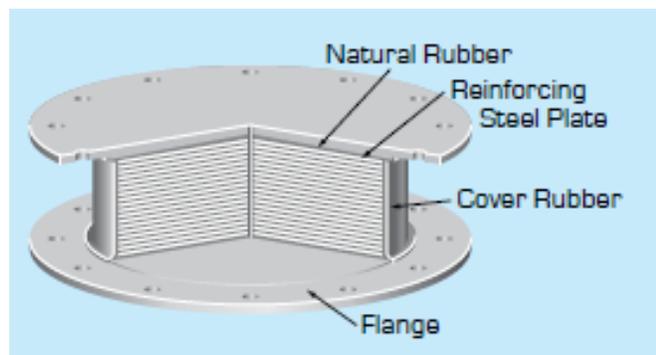


Ilustración 7 Aislador LRB (Bridgestone, 2017)

- Aislador elastomérico normal (*Natural Rubber Bearing, NRB*). En sus inicios, las unidades elastoméricas fueron construidas a partir de gomas (cauchos) naturales, a los que posteriormente se le agregaron placas o láminas de acero mejorando ello en su comportamiento ante la exposición de cargas verticales

de compresión. Este tipo de unidades de aislamiento aporta muy bajo amortiguamiento (aproximadamente entre el 2% al 3% del amortiguamiento crítico, prácticamente nulo en comparación con otros aisladores), por lo que también se les conoce como aisladores de bajo amortiguamiento ya que en caso de que se necesite controlar desplazamientos lateral grandes, puede llegar a requerirse el uso de otros dispositivos con mayor amortiguamiento. A lo largo de su evolución también se han utilizado de manera alternativa otros tipos de goma no natural, como el neopreno (goma sintética); sin embargo, los NRB se han utilizado exitosamente en la protección sísmica de edificaciones tanto residenciales como industriales.



*Ilustración 8 Aislador NRB (Bridgestone, 2017)*

Los aisladores elastoméricos son relativamente fáciles de construir, por lo que generalmente son menos costosos que otros tipos de aisladores. Sus propiedades mecánicas ( $K_e$ ,  $K_h$  y  $Q$ ) pueden presentar variaciones debido a cambios de temperatura, envejecimiento y defectos propios de fabricación.

Otro tipo de aisladores sísmicos son los de desplazamiento o péndulo friccional, que mediante láminas metálicas instaladas entre la cimentación y a superestructura, aíslan el movimiento de la base, produciendo fricción en el dispositivo. Estos elementos son conocidos como FPS (Friction pendulum system)

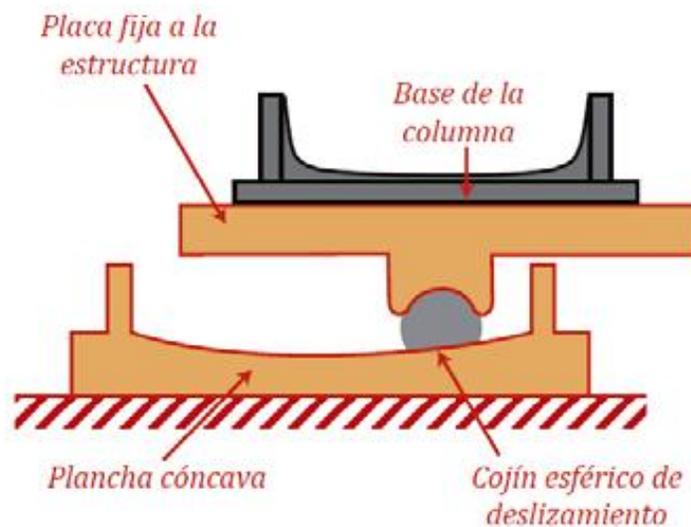


Ilustración 9 Esquema aislador FPS ( Banco de Desarrollo de América Latina. (2016))

Este trabajo aplicativo considera para el diseño los dispositivos tipo NRB y LRB (elastoméricos).

### 2.3 Diseño de aisladores y movimientos sísmicos

Para determinar el diseño de los aisladores sísmicos de base, se considera el siguiente paso a paso en base a la normativa NSR-10 y ASCE/SEI 7-16.

#### 2.3.1 Procedimiento paso a paso para el diseño de un sistema de aislamiento sísmico acorde a NSR-10 Y ASCE/SEI 7-16, capítulo 17

Paso 1: Definir las características principales de la edificación. Consiste en establecer la ubicación del proyecto, el uso que se dará a la edificación y el sistema estructural a utilizar y los rasgos geométricos básicos del edificio. Además, se requiere determinar la zona sísmica del sitio y el tipo de perfil del suelo. Puesto que la edificación que hace parte de este estudio se encuentra

*localizada en territorio colombiano, los parámetros que definen la amenaza sísmica se determinarán mediante NSR-10.*

*Paso 2: Calcular el peso sísmico de la superestructura.* Es la obtención de la combinación de cargas muertas y de otro tipo (p.ej. vivas). *Revisar 12.7.2 (ASCE/SEI 7-16) para obtener las cargas correspondientes al peso sísmico ( $W$ ) que deberán ser incluidas por encima del nivel de base.*

*Paso 3: Determinar la amenaza sísmica.* La amenaza sísmica es distinta para cada país. Específicamente para Colombia debe recurrirse al espectro elástico de diseño de con base a NSR-10, o en su defecto a los decretos que rigen la microzonificación de algunas ciudades dentro del territorio colombiano. En términos generales para Colombia, el espectro de diseño se considera como de “amenaza uniforme”, en donde los movimientos sísmicos ( $S_a$ ) se obtienen a partir del movimiento del terreno en roca (aceleración pico efectiva, representado por el parámetro  $A_a$ ; y velocidad pico efectiva, representado por el parámetro  $A_v$ ), que posteriormente se afectan por parámetros de sitio ( $F_a$  y  $F_v$ , respectivamente) para finalmente ser expresados mediante ordenadas espectrales correspondiente a un amortiguamiento de 5% del amortiguamiento crítico. Estos parámetros de aceleración de los movimientos sísmicos de diseño se encuentran expresados bajo una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años ( $T_R=475$  años), (NSR-10, A.2.5.2). Alternativamente, cualquier espectro obtenido mediante las normativas norteamericanas se denomina de “riesgo uniforme”, en donde los movimientos sísmicos de diseño se cuantifican como ordenadas de un espectro de aceleraciones ( $S_a$ , amortiguamiento de 5% del amortiguamiento crítico) que se obtienen a partir de parámetros  $S_{DS}$  y  $S_{D1}$  (aquí  $S_{DS}=2/3*S_{MS}$ , y  $S_{D1}=2/3*S_{M1}$ ; son parámetros que se encuentran expresados bajo una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años ( $T_R=2475$  años) y se ajustan al 1% de probabilidad de tener colapso estructural en 50 años (ASCE/SEI 7-16, 21.2.1)). *Asimismo 11.4.7 (ASCE/SEI 7-16) establece que en*

*caso que se requiera espectro de respuesta de sismo máximo probable  $MCE_R$ , puede multiplicarse el espectro de diseño y multiplicarlo por 1.5.*

*Paso 4: Seleccionar el periodo y amortiguamiento objetivos.* Tener en cuenta que edificaciones de base fija catalogadas como baja/media altura (20 niveles), el periodo fundamental oscilará aproximadamente alrededor de  $0.1 \cdot \text{Niveles} = 2$  segundos; además que el amortiguamiento corresponderá al 5% del amortiguamiento crítico. *Como un estimado base puede asignarse periodos de vibración objetivos ( $T_M$ ) entre 2 (s) a 4 (s), y el factor de amortiguamiento objetivo ( $\beta_M$ ) puede tomarse en el rango del 5% al 50% del amortiguamiento crítico, el cual dependerá del sistema de aislamiento seleccionado)*

*Paso 5: Determinar la acción sísmica en el edificio aislado.* Debe elegirse un procedimiento de análisis para la estructura aislada, bien sea éste del tipo estático (ASCE/SEI 7-16, 17.4.1) o dinámico (ASCE/SEI 7-16, 17.4.2). Se hace énfasis en que sea del tipo estático debido a que los desplazamientos se concentran a nivel de la capa de aislamiento, de manera que la superestructura se comporta casi siempre como un cuerpo rígido de un grado de libertad (usar un método de análisis estático también es práctico para calcular de manera preliminar el diseño de un sistema de aislamiento y de la superestructura cuando se requiere un método dinámico); sin embargo, también puede usarse un método dinámico cuando no se cumple con 17.4.1 del documento ASCE.

*Paso 6: Calcular la rigidez efectiva del sistema.* Mediante la ecuación estipulada en 17.5.3.2, ASCE/SEI 7-16, y con el periodo elegido en el paso 4 se calcula la rigidez efectiva del sistema para el nivel máximo ( $k_M$ ). *Es importante recalcar que en 17.5.4.1 y 17.5.4.2 del documento ASCE 7-16, se presenta un importante cambio con respecto a su versión anterior, en el cual se estipula que, debe utilizarse  $MCE_R$  en lugar de DBE para el diseño de los elementos de la superestructura, del sistema de aislamiento y de la subestructura que*

conforman la edificación aislada; por tanto, todos los cálculos realizados corresponden al nivel máximo (M).

$$k_M = \frac{4\pi^2 m}{T_M^2}$$

*Ecuación 3 Rigidez efectiva del sistema*

Paso 7: Determinar desplazamientos del sistema de aislación por efecto del viento. El documento ASCE expresa que, la estructura aislada deberá resistir las cargas de viento de diseño, las cuales actúan como una fuerza normal a los diafragmas rígidos verticales en cada una de las direcciones principales. Con el ánimo de determinar las cargas laterales de viento se optará por utilizar la normativa colombiana NSR-10, título B.6. En el artículo 17.2.4.2, ASCE/SEI 7-16 también indica que se deberá proveer un sistema de restricción ante cargas de viento, con lo que se pretende controlar los desplazamientos máximos en el sistema de aislamiento a un valor igual a la deriva de entrepiso.

Paso 8: Calcular el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento. Mediante la tabla 17.5.1 de ASCE/SEI 7-16, se puede obtener el coeficiente numérico ( $B_M$ ) correspondiente al amortiguamiento efectivo ( $\beta_M$ ) seleccionado en el paso 4. Una vez calculado este factor, se puede estimar el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento ( $D_M$ ), con la expresión:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M}$$

*Ecuación 4 Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento*

*En caso que el desplazamiento máximo sea más grande de lo que puede ser aceptable para el proyecto, esto indica que el sistema debe ser más rígido y deberá elegirse un menor periodo de vibración en el paso 4.*

Paso 9: Obtener las fuerzas de cortante. La fuerza cortante de diseño ( $V_b$ ), puede determinarse mediante la expresión 17.5-5 del ASCE/SEI 7-16:

$$V_b = k_M D_M$$

*Ecuación 5 Fuerza cortante de Diseño*

En este orden de ideas, se calculará el cortante sísmico sin reducir ( $V_{st}$ ), el cual se encuentra en función del peso sísmico de la edificación ( $W$ , definido en el paso 2), el peso sísmico de la edificación sin la losa inferior situada inmediatamente por encima de la capa de aislamiento ( $W_s$ ), y del amortiguamiento objetivo ( $\beta_M$ ) definido en el paso 4, y se halla mediante la ecuación:

$$V_{st} = V_b \left( \frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_M}$$

*Ecuación 6 Cortante sísmico sin reducir*

*Se indica en 17.5.4.2 ASCE/SEI 7-16 que, en caso de tener sistemas de aislamiento cuyo comportamiento histerético se caracteriza por tener cambios abruptos en el comportamiento elástico y plástico, deberá reemplazarse el término del exponente  $(1-2.5\beta_M)$  por  $(1-3.5\beta_M)$*

La superestructura será diseñada y construida usando los requerimientos aplicables de fuerza cortante reducida ( $V_s$ ) para los límites de variación máximo y mínimo de cada apoyo de goma, los cuales dependen de irregularidades de la producción, envejecimiento y a condiciones ambientales. La fuerza cortante reducida ( $V_s$ ) relaciona el cortante sin reducir ( $V_{st}$ ) y el coeficiente numérico de disipación de energía básico ( $R_I$ ) que depende de cada tipo de sistema estructural (elegido para la superestructura en el paso 1).

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$$

*Ecuación 7 Fuerza cortante reducida*

Se recomienda revisar las limitaciones mínimas para  $V_s$  en 17.5.4.2 (ASCE/SEI 7-16), con las que se pretende que el cortante de diseño sea superior al valor mínimo necesario para que el sistema de aislamiento sea activado. En caso de que el cortante reducido se requiera en una magnitud mayor, se deberá reducir el valor del periodo de vibración elegido en el paso 4.

Paso 10: Distribución vertical de las fuerzas sísmicas. Consiste en repartir en altura las cargas sísmicas obtenidas en el paso anterior, de acuerdo a la proporción del peso de cada entrepiso y a su altura afectada por el exponente “ $k$ ”, el cual a su vez es una relación empírica que es función del amortiguamiento objetivo ( $\beta_M$ ) y del periodo de la edificación asumiendo comportamiento modal de base fija:

$$k = 14\beta_M T_{fb}$$

*Ecuación 8 Exponente K*

El coeficiente de distribución vertical ( $C_{vx}$ ), se obtiene mediante la expresión 17.5-10 ASCE/SEI 7-16, donde “ $p$ ” es el número de pisos:

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=2}^p w_i h_i^k}$$

*Ecuación 9 Coeficiente de distribución vertical*

La fuerza sísmica que se induce al piso  $x$  ( $F_x$ ), se calcula mediante la ecuación:

$$F_x = C_{vx} V_s$$

*Ecuación 10 Fuerza sísmica por piso*

La fuerza lateral actuante en el piso 1 ( $F_1$ ), viene dada por:

$$F_1 = \frac{(V_b - V_{st})}{R_I}$$

Es destacable que previo al inicio del diseño del sistema de aislamiento se tenga un análisis modal básico de la edificación de base fija, cuya única información relevante radica en primer lugar en conocer el periodo fundamental de la misma ( $T_{fb}$ ); y en segundo lugar en identificar el comportamiento traslacional y/o rotacional para los ejes x e y en los primeros modos; ya que este es un indicativo de la simetría o asimetría de la edificación.

Paso 11: Calcular fuerzas axiales en los aisladores. Consiste por una parte en obtener el valor característico de las cargas contributivas ( $N_{\downarrow}$ ) que actúan en cada una de las unidades de aislamiento. Además, se busca corroborar que no existen fuerzas resultantes de tensión ( $N_{\uparrow}$ ) en las unidades de aislamiento ante la interacción de cargas gravitacionales y fuerzas sísmicas (efecto de volcamiento generado por cargas sísmicas), para cada una de las dos direcciones x e y.

Paso 12: Calcular los desplazamientos máximos totales en cada aislador. El desplazamiento máximo total ( $D_{TM}$ ) de las unidades de aislamiento debe incluir el desplazamiento adicional causado por torsión actual y accidental calculado por la distribución de la rigidez lateral del sistema de aislación ante la ubicación más desfavorable de la excentricidad de la masa. Como punto de partida, se inicia con calcular el radio de giro ( $r_i$ ) del sistema de aislamiento de dimensiones en planta ( $b \times d$ ):

$$r_i = \sqrt{\frac{b^2 + d^2}{12}}$$

Ecuación 12 Desplazamientos máximos totales en cada aislador

A continuación, con la expresión 17.5-4 de ASCE/SEI 7-16, se calcula la relación entre periodos de los modos traslacionales y rotacionales ( $P_T$ ):

$$P_T = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2}{n}}$$

*Ecuación 13 Relación entre periodos de los modos traslacionales y rotacionales*

De la expresión anterior, **n** es el numero propuesto de unidades de aislamiento; **x<sub>i</sub>** e **y<sub>i</sub>**, son las distancias horizontales medidas desde el centro de masas hasta la i-ésima unidad de aislamiento, tomadas en un sistema de coordenadas xy en planta.

La excentricidad (**e**) es una longitud que se medirá en planta al nivel de la capa de aislamiento, y corresponde a la distancia perpendicular a la dirección de estudio tomada entre el centro de masas de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, adicionalmente se incluirá una excentricidad accidental del 5%. Por último, el **D<sub>TM</sub>** puede calcularse mediante la expresión:

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

*Ecuación 14 Desplazamiento máximo total del sistema de aislamiento*

En la ecuación anterior, “**y**” corresponde a la distancia perpendicular tomada desde el centro de rigidez del sistema de aislamiento hasta la esquina más alejada, para cada dirección de estudio. En 17.5.3.3 se define que **D<sub>TM</sub>** no debe ser menor que **1.15D<sub>M</sub>**. *Deben considerarse efectos ortogonales, suponiendo la concurrencia simultánea del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección y el 30% de las fuerzas sísmicas en la dirección perpendicular A.3.6.3 (NSR-10).*

**Paso 13: Seleccionar las unidades de aislamiento.** Con los resultados de los cálculos realizados con anterioridad, se propone una solución utilizando NRB, HDRB, LRB, etc., o también puede usarse una combinación entre éstos, cuya ubicación tendrá en cuenta el centro geométrico y de rigidez del conjunto y el

futuro comportamiento traslacional o rotacional de la edificación aislada como se expresó en el paso 10. *En este caso, la ubicación perimétrica de aisladores tipo LRB, pueden ayudar a re-simetrizar la edificación aislada, dado que puede aprovecharse la mayor rigidez que éstos poseen frente a los apoyos tipo goma.*

Los principales parámetros que deben estar totalmente definidos a este nivel del desarrollo del proyecto son: el peso sísmico de la edificación aislada **W** (calculada en el paso 2), la aceleración espectral **S<sub>a</sub>** (calculada en el paso 3), el periodo objetivo de la edificación aislada **T<sub>M</sub>** y el amortiguamiento objetivo **β<sub>M</sub>** (calculados en el paso 4), la carga axial de larga duración (calculada en el paso 11) y el desplazamiento máximo a absorber **D<sub>TM</sub>** (calculado en el paso 12). Como manera orientativa, se proponen los siguientes criterios empíricos del predimensionamiento:

- Acorde al documento FEMA 451, el diámetro ( $\phi_0$ ) debe elegirse como **1.25D<sub>TM</sub>**.
- Acorde al catálogo de Dynamic Isolation Systems se propone limitar la deformación angular ( $\gamma$ ) al 250%. Alternativamente se puede tomar que la altura de la unidad de aislamiento ( $h_r$ ) sea **0.3 $\phi_0$** .
- En aisladores tipo NRB, el diámetro interno ( $\phi_i$ ) se selecciona como **5% $\phi_0$** .
- Para aisladores tipo LRB, el núcleo de plomo ( $\phi_l$ ) se toma como **15% $\phi_0$** .
- *Es recomendable siempre revisar los valores proporcionados en los catálogos de los fabricantes de las unidades de aislamiento.*

En este paso también es destacable establecer los diagramas de histeréticos de fuerza horizontal (**Q**) vs. desplazamiento transversal ( $\delta$ ) para cada unidad de aislamiento propuesta como solución del proyecto. Estos diagramas son aportados por el fabricante y se basan en resultados de pruebas realizadas en unidades de tipo y tamaño similares. Como ejemplo, se observa en el siguiente gráfico que los apoyos tipo NRB tienen un cierto tipo de comportamiento histerético moderado, donde **K<sub>h</sub>** es la rigidez elástica:

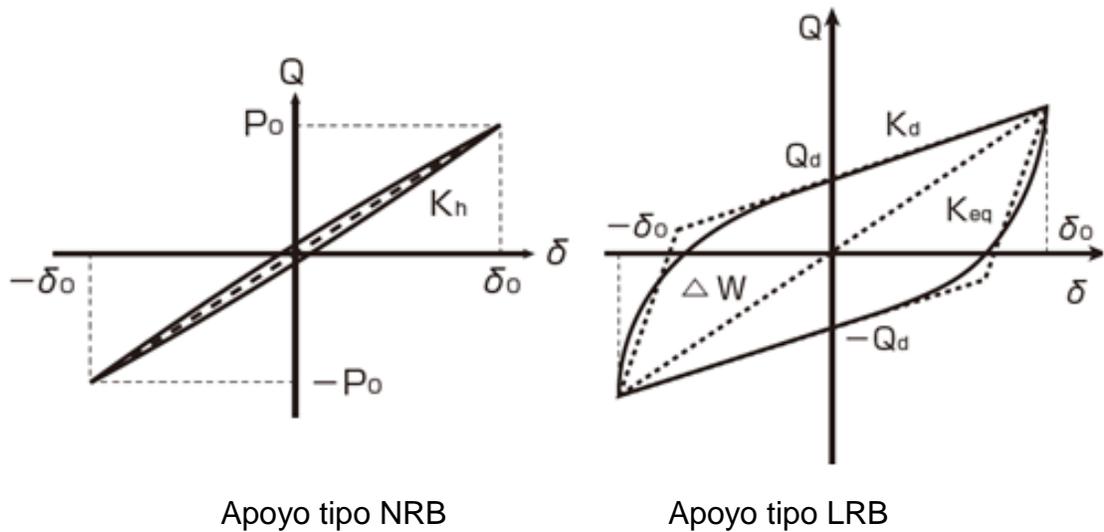


Ilustración 10 Diagrama de histéresis aisladores NRB y LRB ( Bridgestone Corporation, 2017)

A su vez, los aisladores tipo LRB tienen “ $Q_d$ ” que es la resistencia característica (o la fuerza a la que se plastifica el núcleo de plomo), “ $K_d$ ” es la rigidez plástica, y “ $K_{eq}$ ” la rigidez equivalente.

Con relación a las posibles irregularidades que pueden llegar a presentar los apoyos en su comportamiento ante efectos generados por envejecimiento, condiciones ambientales, calentamiento por ciclos histeréticos, reducción cíclica de la rigidez, entre otras; se establece en 17.2.8.4 (ASCE/SEI 7-16) que estas variaciones deben calcularse para niveles máximos y mínimos de cada unidad de aislamiento; y posteriormente deben corregirse los parámetros nominales de diseño ( $K_h$ ,  $K_d$  y  $Q_d$ ) para cada nivel. Asimismo, el documento aclara que cuando existan datos de calificación de pruebas especificados por el fabricante, los cuales son avalados por registros de diseño profesional, éstos pueden utilizarse; de lo contrario deberán usarse los factores de modificación ( $\lambda_{max}$ ,  $\lambda_{min}$ ) de las expresiones 17.2-1 y 17.2-2 ASCE/SEI 7-16.

Paso 14: Calcular la rigidez aportada por los aisladores. Debido a que los  $n$  aisladores se encuentran conectados en paralelo, la rigidez global eficaz del sistema de aislamiento ( $k_{M(e)}$ ) es la suma de las  $n$  rigideces aportadas por cada

unidad. La rigidez de los apoyos de tipo goma, es igual a la rigidez inicial ( $K_h$ ) ya que se considera un comportamiento lineal. Por su parte en los apoyos de goma y plomo, existe un comportamiento bilineal y la rigidez es la rigidez equivalente ( $K_{eq}$ ) para los niveles mínimo y máximo, se calcula mediante la expresión:

$$K_{eq} = \frac{Q_d + K_d D_M}{D_M}$$

*Ecuación 15 Rigidez aportada por los aisladores*

Paso 15: Calcular el periodo eficaz del sistema. Para los niveles de comportamiento mínimo y máximo, el periodo eficaz del sistema ( $T_{M(e)}$ ) se obtendrán con la siguiente ecuación:

$$T_{M(e)} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{M(e)}g}}$$

*Ecuación 16 Periodo eficaz del sistema*

De donde “g” es la aceleración de la gravedad. *De desearse un mayor periodo de aislamiento, deberán utilizarse apoyos cuya rigidez transversal ( $K_h, K_d$ ) sea menor.*

Paso 16: Calcular el amortiguamiento de los aisladores. Respecto a este en particular, se considerará que el amortiguamiento será aportado por los aisladores que aporten este parámetro (como los de tipo HDRB, LRB) dado su comportamiento bilineal. Por ejemplo, de acuerdo al fabricante japonés Bridgestone cuando se usan unidades tipo LRB el amortiguamiento equivalente ( $H_{eq}$ ) del sistema para los niveles mínimo y máximo, puede obtenerse mediante la ecuación:

$$H_{eq} = \frac{2 Q_d \left( \gamma H - \frac{Q_d}{(\beta - 1) K_d} \right)}{\pi \left( \frac{Q_d}{\gamma H} + K_d \right) (\gamma H)^2}$$

En donde **H** es la altura de la unidad de aislamiento, “**β**” es un coeficiente adimensional que relaciona la rigidez inicial (elástica) y la rigidez plástica. Bridgestone indica que para LRB puede tomarse **β=13**. El valor de **H<sub>eq</sub>** corresponde al resultado de todo el conjunto, ya que los factores de amortiguamiento no pueden ser sumados. *De desearse un mayor nivel de amortiguamiento, es recomendable usar unidades de aislamiento cuya deformación angular ( $\gamma$ ) fuese menor, ya que el nivel de amortiguamiento disminuye cuando existe mayor deformación angular.*

Paso 17: Calcular la resistencia vertical de los aisladores. Consiste en comprobar que los apoyos elegidos tienen la suficiente resistencia ante la compresión vertical aportada por la superestructura; por tanto, se verifica que no se excede la carga crítica de pandeo ante la ausencia y la presencia de desplazamientos laterales en los aisladores.

Como primera medida, se calculará la carga crítica de pandeo (**P<sub>cr</sub>**) sin la presencia de desplazamiento lateral; como ejemplo, Bridgestone establece que para NRB se tiene:

$$P_{cr} = \frac{\pi}{4} A \alpha_c \sqrt{G_{eq} E_b S_2}$$

Ecuación 18 Carga crítica de pandeo para NRB

Por su parte, para LRB:

$$P_{cr} = \frac{\pi}{4} 1.26 A \alpha_c \sqrt{G_{eq} E_b S_2}$$

Ecuación 19 Carga crítica de pandeo para LRB

En donde, **A** es el área transversal del aislador; **S<sub>1</sub>** (a usarse más adelante) y **S<sub>2</sub>** son coeficientes adimensionales definidos por el fabricante; **α<sub>c</sub>** es un coeficiente adimensional de origen experimental, cuyo valor se define:

$$NRB \begin{cases} \text{Para } S_2 \geq 5; \alpha_c = 1, \beta_c = 0.76 \\ \text{Para } S_2 < 5; \alpha_c = 0.1(S_2 - 5) + 1, \beta_c = \frac{0.76}{0.15(S_2 - 5) + 1} \end{cases}$$

$$LRB \begin{cases} \text{Para } S_2 \geq 5; \alpha_c = 1 \\ \text{Para } S_2 < 5; \alpha_c = 0.25(S_2 - 5) + 1 \end{cases}$$

$G_{eq}$  es el valor equivalente del módulo de elasticidad transversal de la goma; y  $E_b$  viene dado por la siguiente expresión:

$$E_b = E \frac{1 + \frac{2}{3}\kappa S_1^2}{1 + \frac{E}{E_\infty} \frac{2}{3}\kappa S_1^2}$$

*Ecuación 20 Factor  $E_b$*

Donde  $E$  y  $E_\infty$  son los módulos de elasticidad longitudinal y volumétrico de la goma, respectivamente;  $\kappa$  es un coeficiente adimensional que depende de la dureza de la goma, cuyo valor es  $\kappa=1$  (**HDRB**), y  $\kappa=0.85$  (**NRB y LRB**).

Con el ánimo de obtener el esfuerzo crítico de pandeo ante la ausencia de deformación lateral ( $\sigma_{cr}$ ), se recurre a la expresión:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

*Ecuación 21 Esfuerzo crítico de pandeo*

En segundo lugar, para cuando existe desplazamiento lateral el fabricante Bridgestone indica que se debe reducir la carga crítica ( $\sigma_{cr(\gamma)}$ ) en NRB mediante la siguiente interacción lineal:

$$\sigma_{cr(\gamma)} = \sigma_{cr} \left( 1 - \frac{\beta_c \gamma}{S_2} \right)$$

*Ecuación 22 Tensión crítica de pandeo reducido para NRB*

Para LRB se tiene la ecuación:

$$\sigma_{cr(\gamma)} = \sigma_{cr} \left( 1 - \frac{0.9\gamma}{S_2} \right)$$

*Ecuación 23 Tensión crítica de pandeo reducido para LRB*

**Paso 18: Construir un diagrama de interacción  $\sigma_{cr(\gamma)}$  vs.  $\gamma$ :** De las expresiones anteriores, se infiere que la deformación para que el esfuerzo crítico sea nulo ( $\sigma_{cr(\gamma)}=0$ ) para NRB, es:

$$\gamma = \frac{S_2}{\beta_c}$$

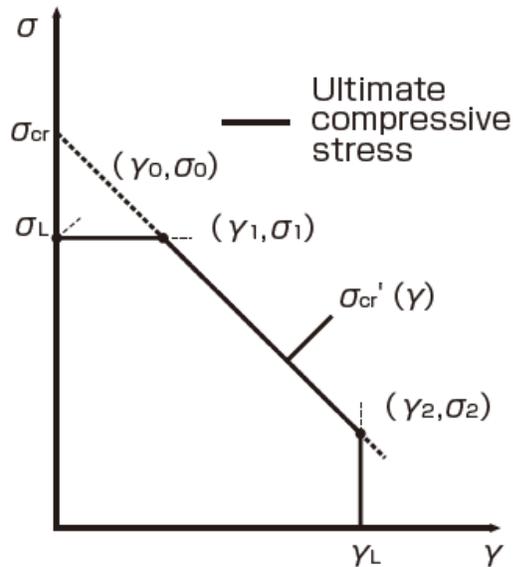
*Ecuación 24 Deformación angular para NRB*

Para LRB, se tiene:

$$\gamma = \frac{S_2}{0.9}$$

*Ecuación 25 Deformación angular para LRB*

Finalmente, se construye el diagrama de interacción entre la tensión crítica de pandeo ( $\sigma_{cr}$ ) y la deformación angular ( $\gamma$ ):



*Ilustración 11 Diagrama de interacción tensión crítica de pandeo y deformación angular (Bridgestone Corporation, 2017)*

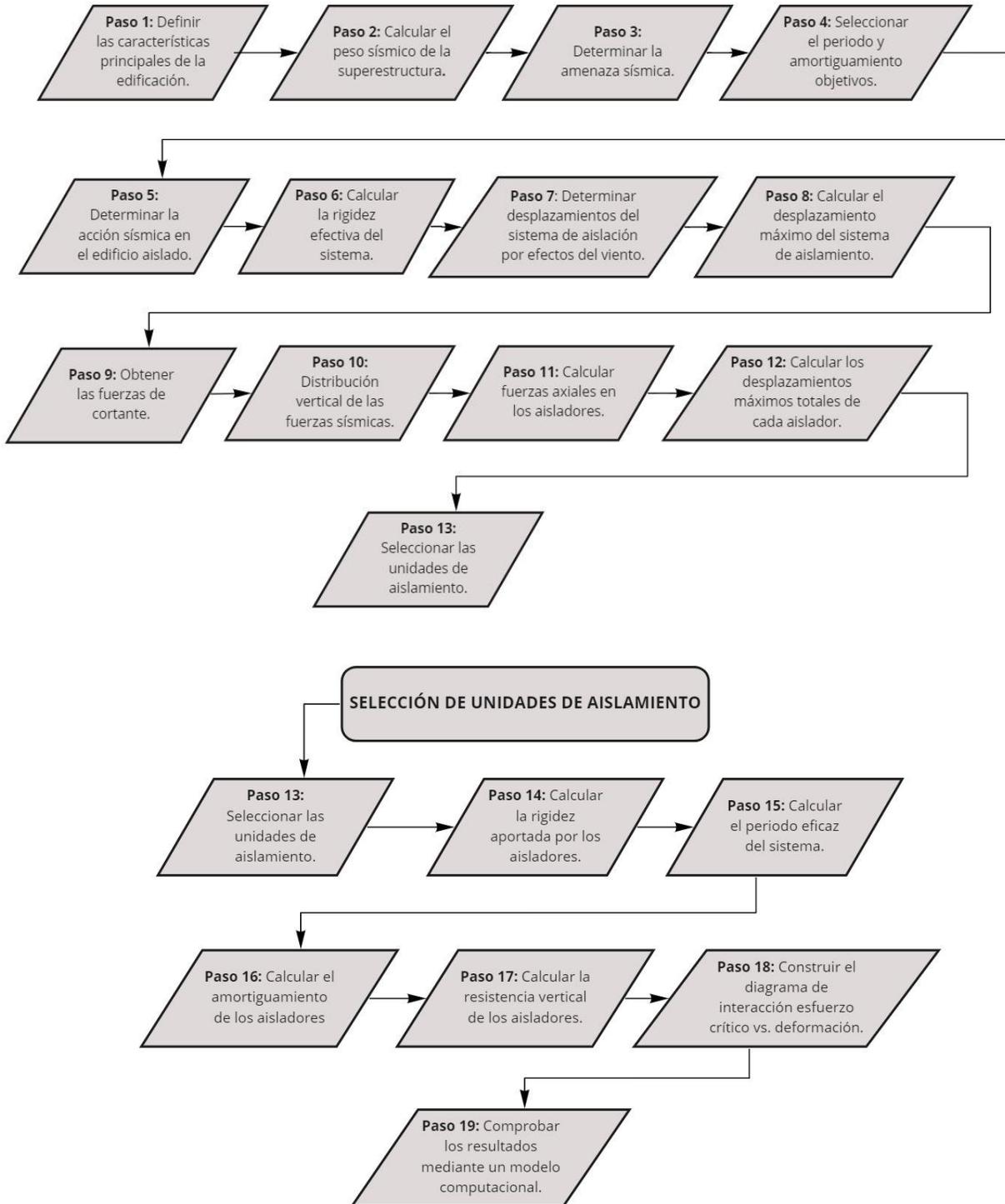
De la figura anterior  $\sigma_{cr}$  es la tensión crítica para deformación nula ( $P_{cr}/A$ ,  $\gamma=0$ ) y  $\sigma_{cr(\gamma)}$  es la tensión crítica para una deformación genérica ( $\gamma$ ); los valores límite en cuanto a esfuerzo ( $\sigma_L$ ) y a deformación ( $\gamma_L$ ) vienen dados por el fabricante. Para efectos de evitar riesgo por pandeo, las parejas ordenadas ( $\sigma$ ,  $\gamma$ ) deben ubicarse contenidas entre los límites y los respectivos ejes.

*Paso 19: Comprobar los resultados mediante un modelo computacional.*

Construir un modelo 3D en un software estructural tipo ETABS, SAP-2000 (o similar), al que se ingresan las características geométricas de la superestructura, de las cargas actuantes y de las propiedades lineales y bilineales de las unidades de aislamiento para los niveles de rendimiento mínimo y máximo sugeridos por el fabricante; así como de su ubicación espacial. Con esto se pretende confirmar la precisión de los resultados obtenidos y finalmente diseñar los elementos que conforman la superestructura. *De ser necesario, puede optimizarse el sistema mediante un proceso iterativo en el que se recalculen las unidades de aislamiento seleccionadas (Paso 13).*

Este procedimiento de diseño puede mostrarse también, como sigue:

**PROCEDIMIENTO PASO A PASO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO ACORDE A NSR-10 Y ASCE/SEI 7-16**

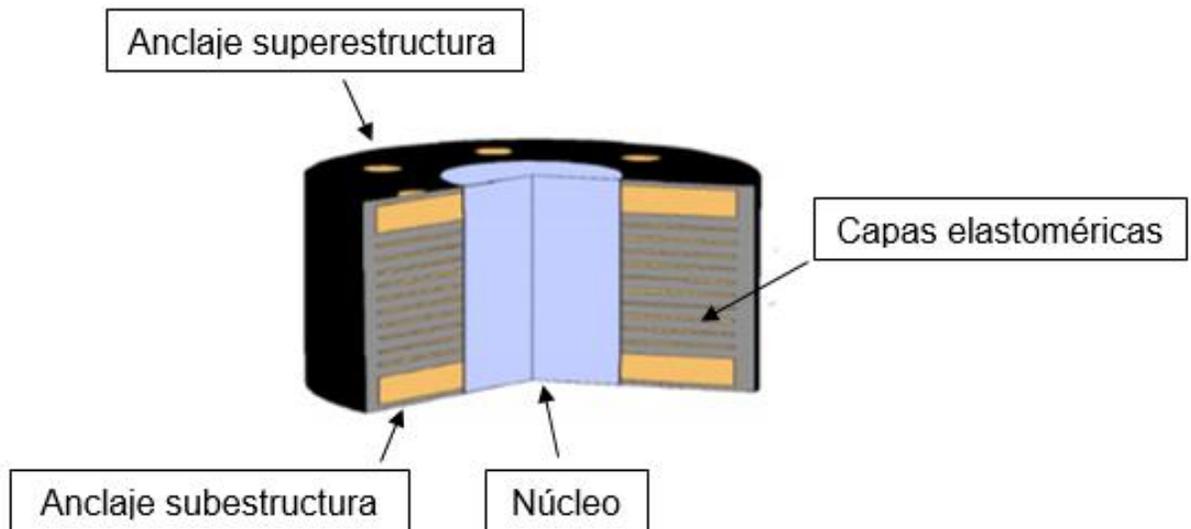


*Ilustración 12 Procedimiento paso a paso para diseño de un sistema de aislamiento sísmico acorde a NSR-10 y ASCE/SEI 7-16 (El Autor)*

## 2.4 Breve historia de la aislación sísmica

La aislación en la base, o la aislación sísmica en la base proviene del concepto de “liberar” o desacoplar parcialmente la superestructura de la fundación de una estructura. teniendo este objetivo como meta principal, mediante la ingeniería sísmica se han implementado diferentes mecanismos que permitan alcanzar este cometido como ejemplo entre otros se datan de rodillos, esferas, cables y también se ha utilizado capas de arena (Naeim and Kelly, 1999).

La primera edificación a la que se le instaló un aislamiento de goma como protección sísmica fue en el año de 1969, se trataba de una escuela primaria en Skopje, Sin embargo, este concepto ha tomado más fuerza desde el punto de vista práctico en los últimos 40 años con el uso de los materiales elastoméricos provenientes de la vulcanización, ya que los dispositivos que llevan a cabo esta función se fabrican como una aglomeración sucesiva de capas superpuestas una encima de la otra, brindando rigidez alta en el eje vertical, al tiempo que tienen una importante flexibilidad ante la imposición de cargas laterales.



*Ilustración 13 Componentes de dispositivo elastomérico. Trevor E. Kelly. (2001). Base Isolation of Structures. Wellington, N.Z.: Holmes Consulting Group Ltd.*

Hoy en día, el concepto de la aislación sísmica de base es ampliamente aceptado y utilizado en regiones de alta sismicidad con la finalidad de proteger las estructuras de la energía sísmica transmitida desde el suelo.

## **Estados Unidos**

En los Estados Unidos se han generado varios códigos de diseño desde el año de 1986, tanto para edificaciones nuevas como para reforzamiento de las existentes, los cuales han regulado el uso del aislamiento sísmico de base. Desde entonces, estas regulaciones han experimentado múltiples modificaciones y cambios relacionadas especialmente en cuanto a los métodos de análisis: estático y dinámico. El principal tipo de aislamiento utilizado en este país son los dispositivos elastoméricos, seguido por los dispositivos deslizantes.

La primera edificación en tener aislamiento sísmico de base en los Estados Unidos fue Foothill Communities Law and Justice Center, un edificio de 4 pisos ocupado con uso institucional localizado en el condado de San Bernardino, Cucamonga, CA., a tan solo 21 km de distancia de la falla de San Andrés. Esta edificación fue la primera en el mundo en utilizar dispositivos elastoméricos de alto amortiguamiento (*High Damping Rubber Bearing, HDRB*). Se utilizaron 98 dispositivos ubicados por debajo del sótano. Costó alrededor de 38 millones de dólares en el año de 1985.

## **Japón**

El caso más trascendente en el país fue el de *West Japan Postal Computer Center*, localizado en la ciudad de Sanda, prefectura de Hyōgo; a 30 km del epicentro del sismo de Kobe en el año de 1995.

Esta edificación consistía en un edificio de 6 pisos, soportado sobre 120 aisladores elastoméricos con algunos dispositivos de amortiguamiento adicionales. Después del sismo, la edificación no reportó daños. Otra edificación aislada en la base y de menor

tamaño conocida como *Matsamura-Gumi Technical Research Institute*, también fue afectada por este sismo y mostró tener un comportamiento satisfactorio muy similar.

Como consecuencia del alto desempeño sísmico de estas edificaciones, el Ministerio de la Construcción (autoridad de construcción de Japón), presentó un incremento en la solicitud de los permisos para construcción de edificaciones aisladas en su base, al año de 1997 había alrededor 393 edificaciones en Japón con una rata de crecimiento de 200 solicitudes por año, solicitando mayormente la construcción de edificaciones nuevas.

## **Nueva Zelanda**

En este país se construyó la primera edificación en el mundo con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (*Lead Rubber Bearing, LRB*) en el año de 1981. También se construyeron el *Union House* en Auckland y el Wellington Central Police Station, dos edificaciones aporcadas en concreto reforzado, que fueron aisladas sísmicamente mediante la metodología *Sleeved-Pile* (pilotes cortos). Este tipo de aislamiento fue usado con la combinación de varios sistemas de amortiguamiento elastoplásticos, los cuales ayudan a controlar los efectos de los desplazamientos.

Otro tipo de edificación poco usual aislada sísmicamente en la base en este país, fue el edificio de una imprenta, localizada en Petone en cercanías de Wellington. Este edificio se construyó sobre LRB, cuyo propósito proteger las prensas de impresión las cuales tienen piezas grandes y demasidamente frágiles, cuyo peso es equivalente a una edificación de 4 pisos.

## **2.5 Ventajas y desventajas y sistemas alternativos a la aislación sísmica**

El diseño de estructuras con aislación sísmica, se fundamenta en el principio de separar parcialmente la superestructura (componentes del edificio ubicados por sobre la interfaz de aislación) de los movimientos del suelo o de la subestructura a través de

elementos flexibles en dirección horizontal, generalmente ubicados entre la estructura y su fundación o nivel del cielo del subterráneo (subestructura), sin embargo, existen casos donde se han instalado aisladores en pisos superiores.

La incorporación de aisladores sísmicos permite reducir la rigidez del sistema estructural logrando que el período de vibración de la estructura aislada sea, aproximadamente, tres veces mayor al período de la estructura sin sistema de aislación. Los principios en los cuales se basa el funcionamiento de la aislación sísmica son en primer lugar, la flexibilización del sistema estructural o alargamiento del período fundamental de la estructura; y, en segundo lugar, el aumento de su amortiguamiento.

Esto es, el alargamiento del período fundamental de la estructura se logra a través de la introducción de un piso blando entre el suelo de fundación y la superestructura. Intuitivamente se reconoce que la rigidez lateral de este piso blando es mucho menor que la rigidez lateral de la superestructura, por lo que el sistema tenderá a deformarse sólo en la interfaz de aislación, transmitiendo bajos esfuerzos cortantes a la superestructura que es la que sufre un movimiento de bloque rígido; por ende, sin deformación ni daño durante la respuesta sísmica. Es Por este motivo que el aislamiento de base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos firmes.

En este mismo orden de ideas, el aumento del amortiguamiento viene dado principalmente por las características elásticas que brinda el sistema de aislación utilizado, ya que éste busca reducir la demanda de deformaciones sobre el sistema de aislación y la superestructura, sin producir un aumento sobre las aceleraciones de esta última. Como resultado, se logra que la superestructura tenga una mejora en su comportamiento estructural acorde a las exigencias de la normativa aplicable.

De una manera más específica para este trabajo, la aislación sísmica se logrará introduciendo dispositivos como los aisladores elastoméricos (Rubber Bearings), los cuales están conformados por una serie de láminas planas de goma intercaladas por

placas planas de acero, que se adhieren entre sí mediante un proceso de vulcanización (bajo presión y temperatura). Estos paquetes de gomas se encuentran entre dos placas de acero, con forma tipo sándwich y conecta la superestructura en su parte superior y la subestructura en su parte inferior. Por lo general estos aisladores se encuentran en presentación de sección circular o cuadrada de acuerdo a los requerimientos del diseñador.

Como recomendación en el planteamiento de uso de estos dispositivos de amortiguamiento, es necesario considerar el espacio circundante de la edificación, ya que se deberán de proyectar los desplazamientos máximos laterales para no afectar a edificaciones vecinas, así mismo proyectar juntas de tuberías de agua, saneamiento, gas, eléctricos, telecomunicaciones, etc. en materiales flexibles.

Se deberá proyectar espacios propicios para el mantenimiento y revisión periódica de los dispositivos de aislación en la estructura.

### 3. Marco normativo

Las primeras disposiciones de diseño para edificaciones aisladas en los Estados Unidos fueron desarrolladas en 1986 por la asociación de ingenieros estructurales de California (SEAOC). Desde el año 1991 la agencia federal para el manejo de emergencias (FEMA) ha desarrollado directrices para el diseño de nuevos edificios y la rehabilitación de edificios existentes con sistemas de aislamiento. La versión más actual de las disposiciones de diseño para estructuras sísmicamente aisladas puede encontrarse en la Norma ASCE 7-16.

En Colombia no se dispone de una normativa propia que brinde la información clara, precisa y ordenada para el aprovechamiento y aplicabilidad de la tecnología del aislamiento de base. Razón por la cual, el Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR 10, título A recomienda seguir las indicaciones de documentación técnica que forma parte de la normativa americana, citado textualmente de la siguiente manera:

#### “A.3.8- ESTRUCTURAS AISLADAS SÍSMICAMENTE EN SU BASE”

A.3.8.1- se permite el empleo de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los dos documentos siguientes:

- a) “NEHRP Recommended Provisions for seismic Regulations for New Buildings- Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, national Institute of Buildings Sciences, Washington D.C., USA, 2004.
- b) Minimum Design Loads for Building and Other Structures” ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the America Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA,2006."

A este punto en particular, debe contextualizarse que ASCE/SEI 7-05, tuvo una actualización a ASCE/SEI 7-10, y posteriormente a la más reciente ASCE/SEI 7-16, la cual presenta cambios importantes respecto a su versión anterior.

Sin embargo, e independientemente de lo anterior el uso de esta documentación requiere para su aplicabilidad de un análisis en el contexto local, de lo contrario puede implicar inconsistencias del tipo técnico, derivando en sobrecostos que limitan la implementación de este sistema (Piscal et al., 2018)

Dentro de las principales consideraciones *propuestas* para el análisis y diseño de edificaciones con aislamientos sísmico de base en Colombia, se pueden nombrar los siguientes:

- **Desempeño sísmico:** los reglamentos que implementan el diseño sismo resistente de edificaciones de base fija en los diferentes países, exigen niveles de desempeño los cuales están ligados directamente a la intensidad de un sismo de diseño. El reglamento colombiano NSR-10, estipula un sismo de diseño (DBE), el cual espera que la edificación presente un nivel de desempeño de “Seguridad de Vida” (*Life Safety o LS por sus siglas en inglés, implica que la edificación resista temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso*). Este tipo de desempeño implica una incursión importante en el rango inelástico, y por ende daños.

Además de lo anterior, también es importante resaltar que a medida que la importancia de la edificación se incrementa, el coeficiente de importancia (I) es mayor, implicando que el sismo de diseño se hace más exigente.

Por tanto, se aumentará el nivel de desempeño de la edificación de base fija, en comparación con su equivalente a una edificación de base fija.

- **Sismo de diseño:** El espectro de diseño de la NSR-10, es denominado de amenaza uniforme, y los parámetros de aceleración de los movimientos

sísmicos de diseño son una expresión que expresan una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, esto es, un periodo de retorno de 475 años. Por otro lado, ASCE/SEI 7-16 estipula un sismo de diseño máximo MCE, que será utilizado para el diseño de la superestructura, la subestructura y del sistema de aislación de una edificación aislada, además presenta consideraciones respecto a la inclusión de límites superiores e inferiores de las propiedades del sistema de aislamiento para el cálculo de las fuerzas de diseño. Teniendo en cuenta lo anterior, se considerará el mismo sismo que se emplea en edificaciones de base fija, discriminándolo en su grupo de uso, puesto que se respetará la filosofía del diseño de aislamiento sísmico “un único desempeño para cualquier estructura aislada”

- **Coeficiente de importancia:** Este parámetro es muy importante porque fija la pertenencia de la edificación en un grupo de uso, de modo que, se cataloga la relevancia de edificación durante y después de un evento sísmico en uno de los cuatro grupos principales: edificaciones indispensables, de atención a la comunidad, ocupación especial y ocupación convencional o normal. Esto conlleva a que se pueda definir el nivel diseño sísmico, al considerar sismos de diseño diferente para cada grupo de uso. De manera que la recomendación es mantener este mismo coeficiente que para edificaciones de base fija.
- **Coeficiente de reducción de respuesta:** Consecuentemente con la exigencia de mayor nivel de desempeño para las edificaciones de base aislada, se desarrollará una menor incursión en el rango inelástico. Sin embargo, en edificaciones de base fija, se estipulan valores del coeficiente de capacidad de energía  $R$ , que pueden llegar hasta 7. Actualmente se está utilizando en Colombia un coeficiente de reducción de respuesta que fue estimado de acuerdo a las características de la sismicidad de Estados Unidos, debido a esto en la tesis doctoral “New design considerations for seismic isolated buildings in

Colombia”, se proponen coeficientes cercanos a 1, sin embargo, los códigos internacionales permiten coeficientes con valores cercanos a 2.

- **Detallado de los elementos estructurales:** Este parámetro depende de la categoría de diseño, relacionada con la amenaza sísmica y la importancia. ASCE/SEI 7-16 establece que las edificaciones tanto de base fija como las de base aislada, deben tener el mismo nivel de detallado. Se propone reducir en un grado el nivel de ductilidad de estructuras de base aislada, ya que necesitan alcanzar los niveles de desempeño mayores, con un nivel menor en su ductilidad.
- **Límites de la deriva:** La deriva permite controlar el nivel de daño de una edificación. La NSR-10 en su numeral A.6.4 establece los límites máximos de para la deriva de edificaciones de base fija. Por otro lado, ASCE/SEI 7-16, estipulan unos límites de deriva que cambian en función de la categoría de riesgo o al grupo de uso; las cuales, al ser comparadas denotarán una mayor exigencia por parte de NSR-10 en edificaciones del grupo I. Asimismo, este aspecto puede generar malinterpretación respecto al empleo de MCE ( $T_r=2475$  años) para el diseño de la superestructura, para lo cual los límites de deriva de la NSR-10 no son válidos.

## CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO

### 1. Enfoque aplicativo

Este documento alberga el desarrollo de un estudio de ingeniería sísmica y estructural cuya naturaleza puede clasificarse como *cuantitativa*, la cual aborda lineamientos específicos para tratar un tema de gran interés académico respecto al aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia, desde un punto de vista estratégico y práctico, a partir de la aplicación del mismo en el contexto regional y global.

De esta forma, mediante la lógica deductiva se plantea como principal intención el describir, explicar y predecir fenómenos que generen un nuevo conocimiento que sirva para solucionar problemas de índole teórico-práctico en la ingeniería sísmica y estructural de Colombia.

### 2. Contexto de aplicación

El proyecto contemplará la realización de un análisis y diseño de un sistema de aislamiento en la base de una estructura de 10 pisos y se comparará con otra edificación de base fija con similares características geométricas, con lo que se pretende conocer los costos asociados a la implementación de aisladores sísmicos para el control de respuesta sísmica en edificaciones similares en suelos duros para Colombia. Es importante nombrar que, a la fecha de ejecución de este documento, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica a través de los comités de estudio y redacción se encuentra adelantando los borradores de la nueva actualización del reglamento, el cual se encuentra en fase de discusión interna y todavía no ha salido a discusión pública.

Teniendo en cuenta esto, el primer paso será realizar el análisis y diseño de la estructura convencional cumpliendo satisfactoriamente con los parámetros

establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, toda vez que éste es el código de diseño sismo resistente que rige en el país.

Una vez realizado este paso, en el que se obtendrán las masas, las cargas gravitacionales actuantes, el porcentaje de participación modal, la rigidez y el periodo fundamental de la estructura. Además, se seleccionará el periodo de vibración y el nivel de amortiguamiento objetivos para el sistema de aislamiento; lo que derivará en realizar el análisis manual de los datos obtenidos a través de la determinación del desplazamiento ante la solicitud de sismo máximo, lo que a su vez conllevará en seleccionar el predimensionamiento de los diferentes tipos de unidades de aislamiento que se implementarán en la edificación.

Respecto al diseño y selección de los dispositivos de aislación, será necesario calcular el nivel de resistencia mínimo dado por la fuerza lateral del viento, la cual depende directamente del área de exposición de la edificación; por otro lado, se calcularán las cargas gravitacionales máximas que deberán soportar estos elementos.

Los aisladores que se consideran en esta tesis son los de goma, como: el aislador elastomérico convencional (NRB), de núcleo de plomo (LRB). El resultado de este paso es obtener la combinación de aisladores a utilizar, así como sus características geométricas y estructurales a partir de catálogos de fabricantes de los mismos.

En particular, se modelarán estas unidades en el software ETABS acoplándolos al nivel de base del edificio, se analizará estructuralmente la edificación de tal manera que se pueda comprobar los parámetros de comportamiento estructural que se habían supuesto para el edificio en condiciones de aislamiento, corroborando el desempeño de la estructura aislada, así como el periodo fundamental y las derivas correspondientes. Respecto al objetivo de desempeño, se determinará para Ocupación Inmediata (*IO, immediate Occupancy*)

Por último, se realizará un estudio comparativo de costos con el propósito de analizar el costo de implementación del sistema de aislamiento en la estructura convencional de base fija. Para alcanzar este cometido, será necesario considerar los costos directos de la estructura convencional de base fija, los costos de instalación de los dispositivos calculados en el diseño, así como de sus elementos anexos.

### 3. Ubicación y características de la edificación de diseño

La edificación de estudio que se propone para este trabajo aplicativo se encuentra ubicada en la ciudad de Manizales, caldas, Colombia. Con suelo tipo C.

Para caracterizar el suelo, se tiene en cuenta la NSR-10 título A.2 Zonas de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño. El caso de estudio se presenta en zona de amenaza sísmica alta. Los demás valores de diseño se suponen teniendo como punto de partida el estudio de suelos.

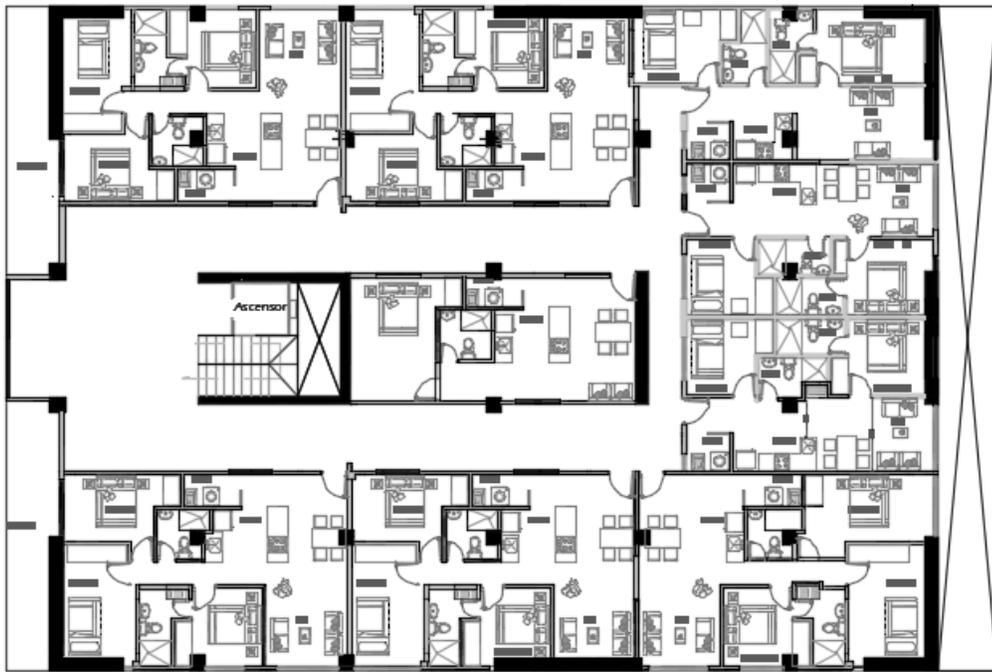
El edificio es de uso residencial, de 10 pisos de altura como se puede evidenciar en la ilustración 6.



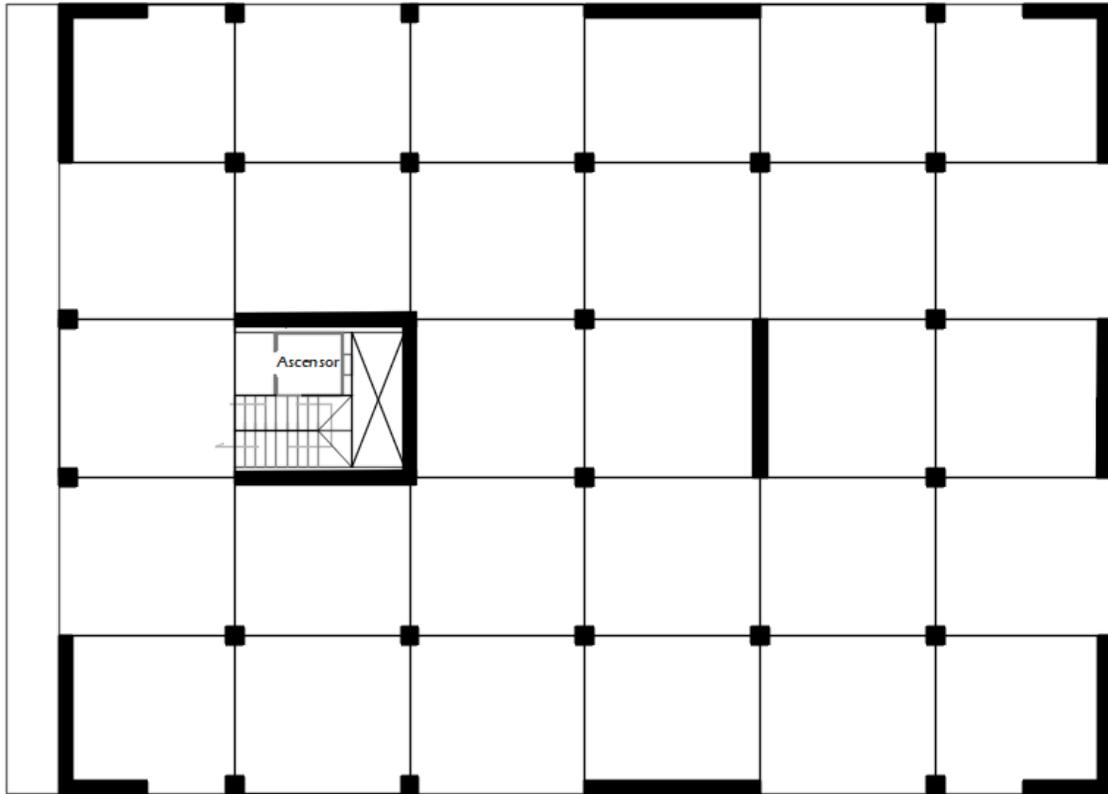
Ilustración 14 Fachada principal EDIFICIO DE ESTUDIO (Autor)



*Ilustración 15 Fachada lateral EDIFICIO DE ESTUDIO (Autor)*



*Ilustración 16 Vista en planta EDIFICIO DE ESTUDIO (El Autor)*



*Ilustración 17 Vista en planta elementos estructurales EDIFICIO DE ESTUDIO (Autor)*

#### **4. Categorías de estudio**

Con la aislación sísmica en la base se pretende dar un equilibrio técnico y económico entre la relación  $D/C$  del conjunto entero de la subestructura y superestructura, lográndose ello a través de la disminución de la demanda  $D$ .

El diseño general inicial del proyecto se realiza con la ayuda de un software estructural, esto incluye su selección; mientras que para el diseño preliminar de las unidades de aislamiento se realiza de forma manual. Luego, el diseño final de la superestructura y demás pueden ser verificadas con el software especializado.

Para lo cual, el diseño se inicia seleccionando los valores objetivos del periodo fundamental ( $T$ ) y el amortiguamiento. Habitualmente el periodo se elige en el rango entre 2 a 3 segundos; mientras que el amortiguamiento entre el 20% y el 35%; por

tanto, la pretensión es buscar edificaciones cuya masa (m) garantice un periodo ese rango, cumpliendo de esta manera con:

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

*Ecuación 26 Periodo fundamental de la edificación.*

De manera que, para masas pequeñas se requieren rigideces (k) pequeñas también.

Respecto a la superestructura se plantea el uso de un Pórtico del tipo IMF (*Intermediate Moment Frame*) de concreto, toda vez que se parte de la suposición que la estructura es moderadamente dúctil; sin embargo, ésta proveerá el nivel de seguridad adicional frente a eventos extremos. También se buscará un nivel de desempeño IO para un periodo de retorno de 475 años.

En este mismo orden de ideas, será posible que las unidades de aislamiento necesiten ser diseñadas dentro de los estados límites a partir de los parámetros geométricos y mecánicos de los mismos, de acuerdo a la normativa colombiana como:

- Desplazamiento de diseño total de los aisladores; es decir, el desplazamiento incrementado con la inclusión de los respectivos efectos de torsión global del edificio.
- Fuerza máxima a tracción o fuerza vertical de levantamiento, toda vez que las unidades a usar deberán soportar este tipo de acciones y conservar su integridad.
- Fuerza máxima vertical a compresión en condiciones sísmicas y en ausencia de las mismas.

## 5. Procedimiento

### 5.1 Análisis y diseño de la estructura convencional

El proyecto consta de una edificación de diez (10) pisos de uso residencial, localizada en Manizales, Colombia. Teniendo en cuenta la distribución arquitectónica de la edificación y considerando los espacios necesarios para su funcionamiento, se plantea un sistema estructural combinado de *pórticos de concreto con muro estructurales de concreto*, el cual satisface las consideraciones de funcionabilidad y los parámetros de sismoresistencia contemplados en el Código Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10.

Para plantear el análisis y posterior diseño estructural, se parte de la *suposición* que el edificio será construido en suelo tipo C. A continuación, se describirán los pasos necesarios para realizar el análisis y diseño de cualquier edificación bajo los lineamientos de la NSR-10, tal como se especifica en A.1.3:

#### 5.1.1 Estudios geotécnicos (Exploración de campo)

Consiste en la ejecución de apiques, trincheras, perforación o sondeo con muestreo o sondeos estáticos o dinámicos, u otros procedimientos exploratorios reconocidos en la práctica, con el fin de conocer y caracterizar el perfil del subsuelo afectado por el proyecto, ejecutar pruebas directas o indirectas sobre los materiales encontrados y obtener muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio. La exploración debe ser amplia y suficiente para buscar un adecuado conocimiento del subsuelo hasta la profundidad afectada por la construcción, teniendo en cuenta la categoría del proyecto, el criterio del ingeniero geotecnista y lo dispuesto en las tablas H.3.1-1. Y H.3.2-1, de la NSR-10:

Tabla 1 Clasificación de las unidades de construcción por categorías (NSR-10)

**Tabla H.3.1-1**  
Clasificación de las unidades de construcción por categorías

Categoría de la unidad de construcción	Según los niveles de construcción	Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
<b>Media</b>	<b>Entre 4 y 10 niveles</b>	<b>Entre 801 y 4,000 kN</b>
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4,001 y 8,000 kN
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8,000 kN

Tabla 2 Número mínimo de sondeos y profundidad (NSR-10)

**Tabla H.3.2-1**  
Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción  
Categoría de la unidad de construcción

Categoría Baja	Categoría Media	Categoría Alta	Categoría Especial
Profundidad Mínima de sondeos: 6 m. Número mínimo de sondeos: 3	Profundidad Mínima de sondeos: 15 m. Número mínimo de sondeos: 4	Profundidad Mínima de sondeos: 25 m. Número mínimo de sondeos: 4	Profundidad Mínima de sondeos: 30 m. Número mínimo de sondeos: 5

Como parte complementaria a este informe, se plantea que la edificación se encuentra localizada dentro de la zona de amenaza sísmica alta, presentada en la tabla A.2.3-2 y el mapa de la figura A.2.3-1 de NSR-10, como se observa a continuación:

Tabla 3 Valor de  $A_a$  y  $A_v$  para ciudades capitales (NSR-10)

**Tabla A.2.3-2**  
Valor de  $A_a$  y de  $A_v$  para las ciudades capitales de departamento

Ciudad	$A_a$	$A_v$	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta
Florencia	0.20	0.15	Intermedia
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia
Leticia	0.05	0.05	Baja
<b>Manizales</b>	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	<b>Alta</b>
Medellín	0.15	0.20	Intermedia
Mitú	0.05	0.05	Baja
Mocoa	0.30	0.25	Alta
Montería	0.10	0.15	Intermedia
Neiva	0.25	0.25	Alta
Pasto	0.25	0.25	Alta
Pereira	0.25	0.25	Alta
Popayán	0.25	0.20	Alta
Puerto Carreño	0.05	0.05	Baja
Puerto Inírida	0.05	0.05	Baja
Quibdó	0.35	0.35	Alta
Riohacha	0.10	0.15	Intermedia
San Andrés, Isla	0.10	0.10	Baja
Santa Marta	0.15	0.10	Intermedia
San José del Guaviare	0.05	0.05	Baja
Sincelejo	0.10	0.15	Intermedia
Tunja	0.20	0.20	Intermedia
Valledupar	0.10	0.10	Baja
Villavicencio	0.35	0.30	Alta
Yopal	0.30	0.20	Alta

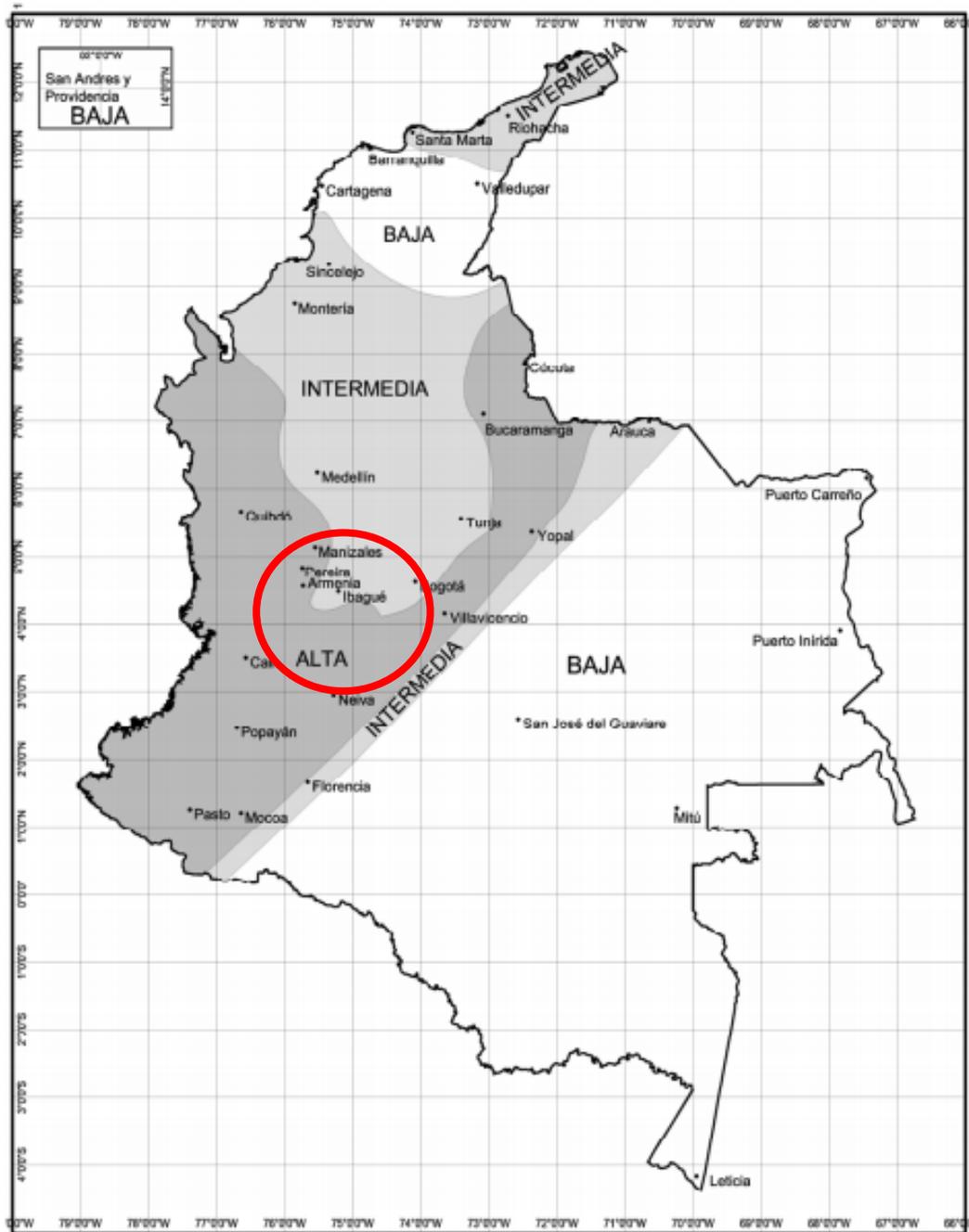


Ilustración 18: Mapa de amenaza sísmica (NSR-10)

En este mismo orden de ideas, tal como se manifestó con anterioridad supone que el tipo de suelo corresponde al tipo C: perfiles de suelos muy densos o roca blanda, como lo define la tabla A.2.4-1 NSR-10:

Tabla 4 Clasificación de perfiles de suelo (NSR-10)

**Tabla A.2.4-1**  
**Clasificación de los perfiles de suelo**

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760$ m/s
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$ , o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$ , o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50$ kPa ( $\approx 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total <b>H</b> mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo <b>F</b> requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: <b>F<sub>1</sub></b> — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. <b>F<sub>2</sub></b> — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ( <b>H</b> > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). <b>F<sub>3</sub></b> — Arcillas de muy alta plasticidad ( <b>H</b> > 7.5 m con índice de Plasticidad <b>IP</b> > 75) <b>F<sub>4</sub></b> — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ( <b>H</b> > 36 m)	

De acuerdo a las tablas A.2.4-3 y A.2.4-4 de NSR-10, puede obtenerse los valores correspondientes para el coeficiente **F<sub>a</sub>**, que amplifica las coordenadas del espectro en roca que tiene en cuenta los efectos de sitio en el rango de periodos cortos del orden **T<sub>0</sub>**; y los valores de **F<sub>v</sub>**, que amplifica las coordenadas del espectro en roca que tiene en cuenta los efectos de sitio en el rango de periodos intermedios del orden **1 s**.

Tabla 5 Valores de coeficiente *F<sub>a</sub>* (NSR-10)

**Tabla A.2.4-3**  
**Valores del coeficiente *F<sub>a</sub>*, para la zona de periodos cortos del espectro**

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
<b>A</b>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>B</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>C</b>	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
<b>D</b>	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
<b>E</b>	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
<b>F</b>	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

**Nota:** Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Tabla 6 Valores de coeficiente  $F_v$  (NSR-10)

**Tabla A.2.4-4**  
Valores del coeficiente  $F_v$ , para la zona de períodos intermedios del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
<b>A</b>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>B</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>C</b>	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
<b>D</b>	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
<b>E</b>	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
<b>F</b>	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

**Nota:** Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

NSR-10 permite interpolar linealmente para valores intermedios de  $A_a$  entre valores del mismo perfil; por tanto, se obtiene la siguiente información:

$$A_a = 0.25$$

$$A_v = 0.25$$

$$F_a = 1.15$$

$$F_v = 1.55$$

### 5.1.2. Planteamiento estructural

La conceptualización del modelo por piso y tridimensional que se manejará en el software ETABS, es como aparece a continuación en la ilustración 10

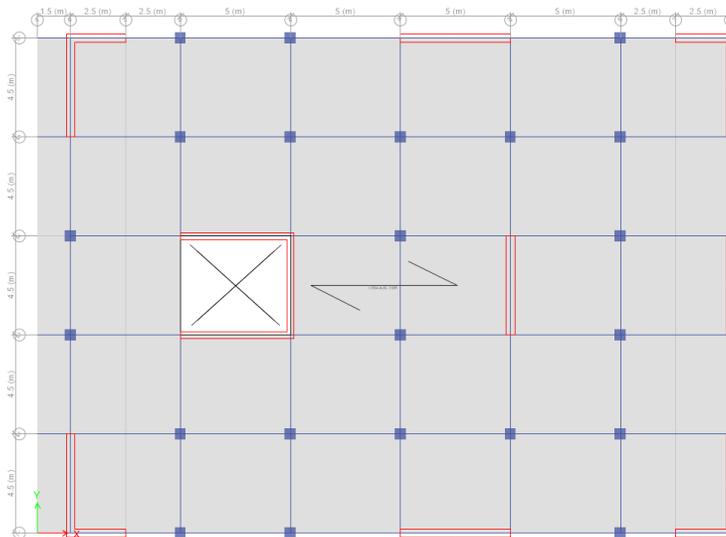
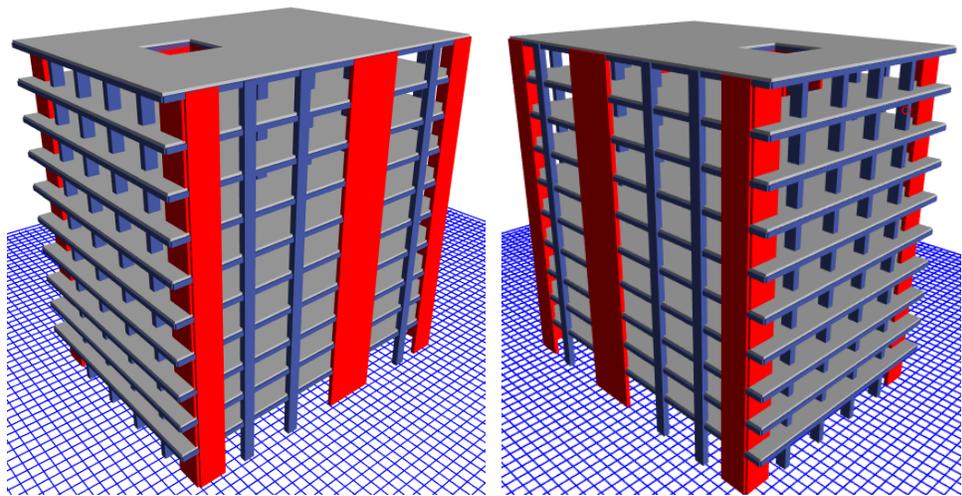
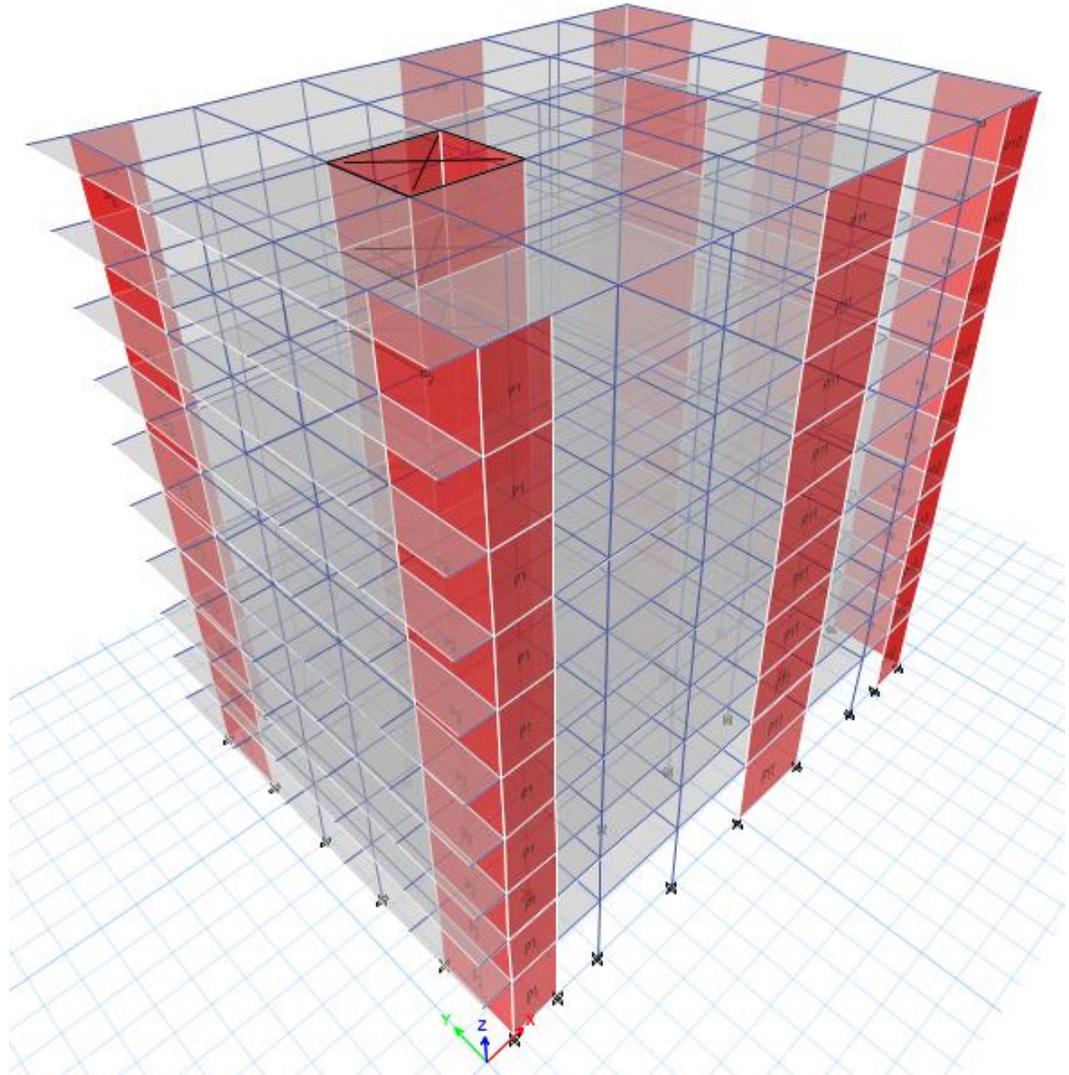


Ilustración 19 Ubicación en planta elementos estructurales (El Autor)



*Ilustración 20 Vista 3d de la edificación modelación en ETABS (El Autor)*

Tabla 7 Características geométricas de la edificación (El Autor)

Características geométricas de la edificación			Referencias
Número de pisos	10	Niveles	
Altura tomada desde la base	32.3	m	
Uso	Comercial y Residencial		
Coefficiente de importancia	1	Grupo I	NSR-10 A.2.5.1.4
Sistema estructural	Sistema combinado		NSR-10 A.3.2.1.2
Ubicación	Manizales, Caldas		

### 5.1.3. Análisis y diseño estructural

la estructura de la edificación debe diseñarse para que tenga la resistencia y rigidez adecuadas para limitar las deformaciones ante las cargas de servicio, razón por la cual se expresan en los siguientes doce pasos subsiguientes de acuerdo a NSR-10 título A:

- **Paso 1. Predimensionamiento de la edificación convencional y coordinación con los otros profesionales:** En este paso se define el sistema estructural y las dimensiones tentativas para evaluar las diferentes solicitaciones.

El sistema estructural a utilizar para resistir cargas laterales (sísmicas) en la edificación convencional es el conformado por Muros estructurales de concreto (DES), mientras que las cargas verticales se resistirán con pórticos de concreto reforzado es el de Disipación Especial de Energía (DES), cuyo uso está definido en la Norma Colombiana de Diseño y construcción Sismo Resistentes NSR – 10, para zonas de riesgo sísmico alto.

Los análisis y diseños estructurales se realizaron mediante el paquete informático de *CSI Computers & Structures Inc.*: ETABS y SAFE, los cuales incluyen por defecto los siguientes factores de reducción de resistencia de materiales, acorde al código ACI 318-14

Materiales

Concreto Vigas:  $f'_c$  4000 psi = 28 MPa = 280 kgf/cm<sup>2</sup>

Concreto Columnas  $f'_c$  4000 psi = 28 MPa = 280 kgf/cm<sup>2</sup>

Concreto Muros  $f'c$  4000 psi = 28 MPa = 280 kgf/cm<sup>2</sup>

Acorde a NSR-10 C.8.5.1, el módulo de elasticidad del concreto de densidad normal puede tomarse como:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'c} = 24870.0623 \text{ MPa} = 253517.4549 \text{ kgf/cm}^2$$

Acero de refuerzo de todos los elementos  $f_y$  60.000 psi = 420 MPa = 4200 kgf/cm<sup>2</sup>

Acorde a NSR-10 C.8.5.1, el módulo de elasticidad del acero, puede tomarse como  $E_s=200000$  MPa = 2038735.984 kgf/cm<sup>2</sup>

Así mismo se tomará la estandarización de números, áreas y diámetros de barras corrugadas de acero, especificadas en la tabla C.3.5.3-2, de la norma NSR-10:

Tabla 8 Dimensiones Acero de Refuerzo (NSR-10)

**TABLA C.3.5.3-2**  
**DIMENSIONES NOMINALES DE LAS BARRAS DE REFUERZO**  
**(Diámetros basados en octavos de pulgada)**

Designación de la barra (véase la nota)	Diámetro de referencia en pulgadas	DIMENSIONES NOMINALES			Masa kg/m
		Diámetro mm	Area mm <sup>2</sup>	Perímetro mm	
No. 2	1/4"	6.4	32	20.0	0.250
No. 3	3/8"	9.5	71	30.0	0.560
No. 4	1/2"	12.7	129	40.0	0.994
No. 5	5/8"	15.9	199	50.0	1.552
No. 6	3/4"	19.1	284	60.0	2.235
No. 7	7/8"	22.2	387	70.0	3.042
No. 8	1"	25.4	510	80.0	3.973
No. 9	1-1/8"	28.7	645	90.0	5.060
No. 10	1-1/4"	32.3	819	101.3	6.404
No. 11	1-3/8"	35.8	1006	112.5	7.907
No. 14	1-3/4"	43.0	1452	135.1	11.380
No. 18	2-1/4"	57.3	2581	180.1	20.240

Nota: El No. de la barra indica el número de octavos de pulgada del diámetro de referencia

Predimensionamiento de elementos estructurales:

Para el predimensionamiento se siguen las recomendaciones del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 para vigas y losas, teniendo en cuenta que si se usan los requisitos de la tabla C.9.5. (a), no será necesario realizar el chequeo de las deflexiones.

- Vigas

Tabla 9 Espesor para predimensionamiento de vigas (NSR-10)

**TABLA C.9.5(a) — Alturas o espesores mínimos de vigas no preesforzadas o losas reforzadas en una dirección a menos que se calculen las deflexiones**

	Espesor mínimo, <b>h</b>			
	Simplemente apoyados	Con un Extremo continuo	Ambos Extremos continuos	En voladizo
Elementos	Elementos que <b>NO</b> soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes			
Losas macizas en una dirección	$\frac{\ell}{20}$	$\frac{\ell}{24}$	$\frac{\ell}{28}$	$\frac{\ell}{10}$
Vigas o losas nervadas en una dirección	$\frac{\ell}{16}$	$\frac{\ell}{18.5}$	$\frac{\ell}{21}$	$\frac{\ell}{8}$

La luz más larga (crítica) entre los vanos es **L=5.0 m**

$$\frac{L}{18.5} = \frac{5.0}{18.5} = 27 \text{ cm} \cong 30 \text{ cm}$$

En cuanto a dimensiones mínimas se tuvo en cuenta que el ancho de la dimensión menor para elementos estructurales que hacen parte del Sistema Primario de Resistencia Sísmica de edificaciones localizadas en zona de amenaza sísmica alta, no debe ser menor de 30 cm acorde a NSR-10 C.21.6.1.1

- Columnas

En los pisos 1 al 7 se plantean secciones de 50cm x 50cm, con 12 barras # 7 (1.86%  $A_g$ )

Para los pisos 8 al 10, se utilizan secciones de 40cm x 40cm, con 12 barras # 7 (2.9%  $A_g$ )

- Muros estructurales de concreto

En los pisos del 1 al 10 se plantean muros tipo pantalla estructural con espesor de 40 cm

- Foso ascensor

En los pisos del 1 al 10 se plantea únicamente en el foso del ascensor, una pantalla estructural con espesor de 30 cm

- Losas de entrepiso

En los pisos del 2 al 10, además de la cubierta; se plantea utilizar losa tipo *Waffle*, aligerada en dos direcciones, siguiendo las recomendaciones de NSR-10 C.8.13 y teniendo en cuenta los parámetros correspondientes:

- $h=35\text{cm}$
- $S=120\text{cm}$
- $e=6\text{cm}$
- $b=10\text{cm}$

- **Paso 2. Evaluaciones de las solicitaciones definitivas:** se evalúan todas las solicitaciones que pueden afectar la edificación.

Carga muerta (Dead) y Sobrecarga Permanente (SCP)

Se ha tenido en cuenta la carga muerta producida por el peso propio de la estructura, al igual que la sobrecarga permanente (SCP) producida por los muros divisorios y acabados de piso, acorde a NSR 10 Título B:

*Tabla 10 Carga muerta típica de entrepiso (El Autor)*

Entrepiso (360 kgf/m<sup>2</sup>)

Baldosa sobre 25mm de mortero	110 kgf/m <sup>2</sup>
Mampostería de bloque de arcilla pañetado ambas caras, espesor del muro= 15cm	250 kgf/m <sup>2</sup>

*Tabla 11 Cargas vivas típicas (El Autor)*

Carga viva (Live)

Carga Viva de Cuartos privados y sus corredores	180 kgf/m <sup>2</sup>
---	---------------------------

Carga Viva de cubierta	50 kgf/m <sup>2</sup>
Carga viva de escaleras	300 kgf/m <sup>2</sup>

Tabla 12 Carga de viento (El Autor)

Carga de viento (Wind)

Carga mínima de viento NSR-10 Título B	40 kgf/m <sup>2</sup>
--	--------------------------

Tabla 13 Cargas Impuestas en la Estructura (El Autor)

	<b>USO</b>	<b>PESO PROPIO (Dead)</b>	<b>SOBRECARGA PERMANENTE (SCP) kgf/m<sup>2</sup></b>	<b>CARGA VIVA (Live) kgf/m<sup>2</sup></b>
<b>NIVEL1</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL2</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL3</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL4</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL5</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL6</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL7</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL8</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL9</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>NIVEL10</b>	Residencial	Auto*	360	180
<b>CUBIERTA</b>	Cubierta	Auto*	-	500
<b>ESCALERAS</b>	-	Auto*	-	300

\* se define en el software estructural la opción de que evalúe los pesos propios de los elementos dibujados en la interface

● **Paso 3. Obtención del nivel de amenaza sísmica y valores de  $A_a$  y  $A_v$ :**

Este paso consiste en realizar el análisis dinámico de la estructura, particularmente se usará el análisis dinámico espectral estipulado en el Capítulo A.5.4 de la NSR-10

Debe tenerse en cuenta de cualquier manera, que los resultados obtenidos utilizando los métodos de análisis dinámico deben ajustarse a los valores mínimos prescritos en el capítulo A.5. Los valores mínimos a los cuales deben ajustarse, están referidos a los valores que se obtienen utilizando el método de la fuerza horizontal equivalente definido en el capítulo A.4 de la NSR-10.

Se considerará un modelo matemático tridimensional con diafragma rígido definido en la sección A.5.2 de la NSR-10.

- **$A_a = 0.25$**
- **$A_v = 0.25$**
- **$F_a = 1.15$**
- **$F_v = 1.55$**
- **$A_e = 0.20$**
- **$A_d = 0.10$**

Tabla 14 Parámetros sísmicos para espectro de diseño (NSR-10)

Departamento de Caldas						
Municipio	Código Municipio	$A_a$	$A_v$	Zona de Amenaza Sísmica	$A_e$	$A_d$
Manizales	17001	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10

● **Paso 4. Movimientos sísmicos de diseño:** se expresan por medio de un espectro elástico de diseño, el cual es la caracterización de los movimientos sísmicos mínimos que deben utilizarse en la realización del diseño sismo resistente. Para efectos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10, es un sismo cuyos efectos en el lugar de interés tienen una probabilidad de sólo diez por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años, lo cual conduce a un período promedio de retorno de 475 años (tabla 15). El diseño sismo resistente tiene dentro de sus objetivos la protección de la vida ante la ocurrencia del sismo de diseño.

Tabla 15 Espectro de diseño y características sísmicas (El Autor)

Características sísmicas				
Zona de amenaza sísmica	Alta		NSR-10 (Figura A.2.3-1)	
Tipo suelo	C			
Coef. Aceleración pico efectiva	$A_a$	0.25	NSR-10 (Figura A.2.3-2)	
Coef. Velocidad pico efectiva	$A_v$	0.25	NSR-10 (Figura A.2.3-3)	
Coef. Amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos	$F_a$	1.15	NSR-10 (Tabla A.2.4-3)	
Coef. Amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios	$F_v$	1.55	NSR-10 (Tabla A.2.4-4)	
Espectro de diseño	Espectro de aceleraciones			
Período de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones	$T_0$	0.135	s	NSR-10 A.2.6.1.3
Período de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo.	$T_C$	0.647	s	NSR-10 A.2.6.1.1
Período de vibración correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para períodos largos.	$T_L$	3.72	s	NSR-10 A.2.6.1.2

**Espectro elástico de aceleraciones**

SEUDOACELERACIÓN (%G)

PERIODO (SEGUNDOS)

- **Paso 5. Características de la estructuración y del material:** El sistema estructural de resistencia sísmica de la edificación debe clasificarse dentro de uno de los sistemas estructurales prescritos en el capítulo A.3.

Procedimiento para la representación de los movimientos sísmicos: Espectro de respuesta

- Sistema estructural: Sistema combinado de muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DES) para el sistema de resistencia sísmica, con pórticos resistentes a momentos con capacidad especial de energía (DES) para el sistema de resistencia de cargas verticales
- Resistencia a la compresión de diseño vigas (28 días): **280 kgf/cm<sup>2</sup>**

- Resistencia a la compresión de diseño columnas (28 días): **280 kgf/cm<sup>2</sup>**
- Módulo de Elasticidad: **253517.4549 kgf/cm<sup>2</sup>**
- Capacidad de disipación de energía en el intervalo inelástico de respuesta: **Especial (DES.)**
- Coeficiente de Disipación de Energía Básico (**R<sub>0</sub>**): **7.00**

Tabla 16 Definición del sistema estructural (NSR-10)

**Tabla A.3-2**  
**Sistema estructural combinado (Nota 1)**

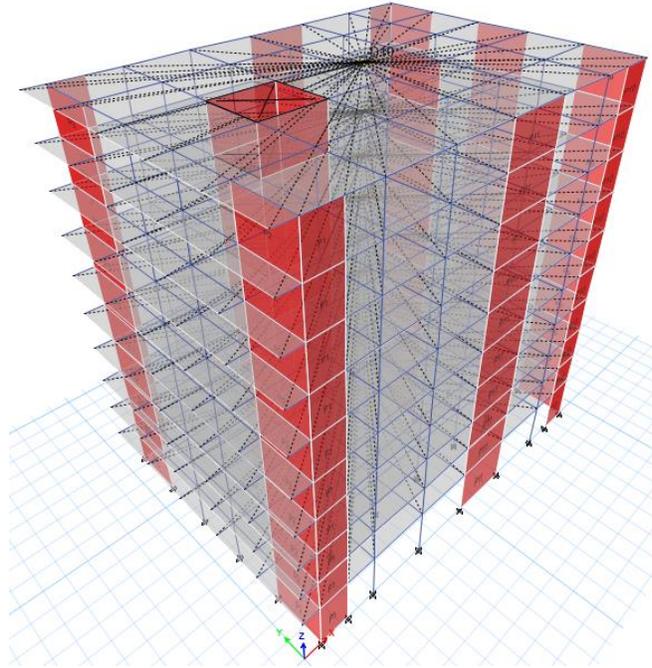
B. SISTEMA COMBINADO		Valor <b>R<sub>0</sub></b> (Nota 2)	Valor <b>Ω<sub>0</sub></b> (Nota 4)	zonas de amenaza sísmica					
Sistema resistencia sísmica (fuerzas horizontales)	Sistema resistencia para cargas verticales			alta		intermedia		baja	
		uso permit	altura máx.	uso permit	altura máx.	uso permit	altura máx.		
<b>1. Pórticos de acero con diagonales excéntricas</b>									
a. Pórticos de acero con diagonales excéntricas si las conexiones con las columnas por fuera del vínculo son resistentes a momento	pórticos de acero resistentes a momentos con capacidad mínima de disipación de energía ( <i>DMI</i> )	7.0	2.0	si	45 m	si	60 m	si	Sin Límite
b. Pórticos de acero con diagonales excéntricas si las conexiones con las columnas por fuera del vínculo no son resistentes a momento	pórticos de acero resistentes a momentos con capacidad mínima de disipación de energía ( <i>DMI</i> )	6.0	2.0	si	45 m	si	60 m	si	sin Límite
c. Pórticos de acero con diagonales excéntricas si el vínculo no se conecta a la columna	pórticos de acero no resistentes a momentos	6.0	2.0	si	30 m	si	45 m	si	Sin Límite
d. Pórticos de acero con diagonales excéntricas si el vínculo tiene conexión resistente a momento con la columna	pórticos de acero resistentes a momentos con capacidad mínima de disipación de energía ( <i>DMI</i> )	5.0	2.0	si	30 m	si	45 m	si	Sin Límite
<b>2. Muros estructurales</b>									
a. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía ( <i>DES</i> )	pórticos de concreto con capacidad especial de disipación de energía ( <i>DES</i> )	7.0	2.5	si	72 m	si	sin límite	si	Sin límite

- **Paso 6. Grado de irregularidad de la estructura:** Definición del procedimiento de análisis sísmico de la estructura de acuerdo con la regularidad o irregularidad de la configuración de la estructura.
  - Irregularidad en planta, condición más desfavorable **Φ<sub>p</sub> = 0.80** (Se verificará posteriormente)
  - Irregularidad en altura, condición más desfavorable **Φ<sub>a</sub> = 0.80** (Se verificará posteriormente)

- Resistencia por ausencia de redundancia en DES  $\Phi_r = 0.75$  (Se verificará posteriormente)
- Coeficiente de Disipación de Energía (**R<sub>0</sub>**): **7** (sistema combinado de muros estructurales con pórticos de concreto. Ambos sistemas, DES)
- Método de análisis sísmico: Método de análisis modal espectral
- Se obtienen las fuerzas sísmicas elásticas de diseño  $F_s$ .
- Masa de la edificación (M): Peso propio de estructura, Peso de acabados, Peso de sobre carga permanente (SCP).
- Características vibratorias de la estructura: Masa, rigidez, período de vibración. Movimientos sísmicos de diseño: Aceleración espectral  $S_a$ .
- Cortante sísmico en la base:  $V_s = S_a * g * M$
- Distribución de las fuerzas sísmicas en la altura:  $F_i$ .

● **Paso 7. Determinación de las fuerzas sísmicas:** Se deben aplicar a la estructura para lo cual se deben usar los movimientos sísmicos de diseño.

Para este caso en particular, se analizará la estructura en sección independiente de las escaleras (cuyo análisis se realizará más adelante en este mismo informe), teniendo en cuenta la geometría arquitectónica; agregando que entre estas estructuras se formará una junta que controlará los desplazamientos laterales que generarán los movimientos de naturaleza sísmica.



*Ilustración 21 Asignación de diafragmas rígidos (El Autor)*

● **Paso 8. Análisis sísmico:** Se lleva a cabo aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos, a un modelo matemático apropiado de la estructura. El método de análisis modal espectral conlleva los siguientes pasos:

1. Determinación del espectro de diseño de acuerdo con las características geotécnicas del lugar de emplazamiento de la estructura.
2. Cálculo aproximado del periodo fundamental de vibración.
3. Determinación del cortante en la base.
4. Distribución en altura del cortante en la base.
5. Aplicación de estas fuerzas sísmicas y verificación de que los índices de deriva no sobrepasen el valor permitido.

Se analiza la estructura para las fuerzas sísmicas de diseño empleando el procedimiento de análisis definido en el Paso 4.

Obtención de las fuerzas internas de la estructura: Fuerzas axiales, Momentos flectores, Fuerzas cortantes, Torsión.

Para nuestro modelo, se obtiene un periodo **T=0.866 s** para el **modo de vibración 1:**

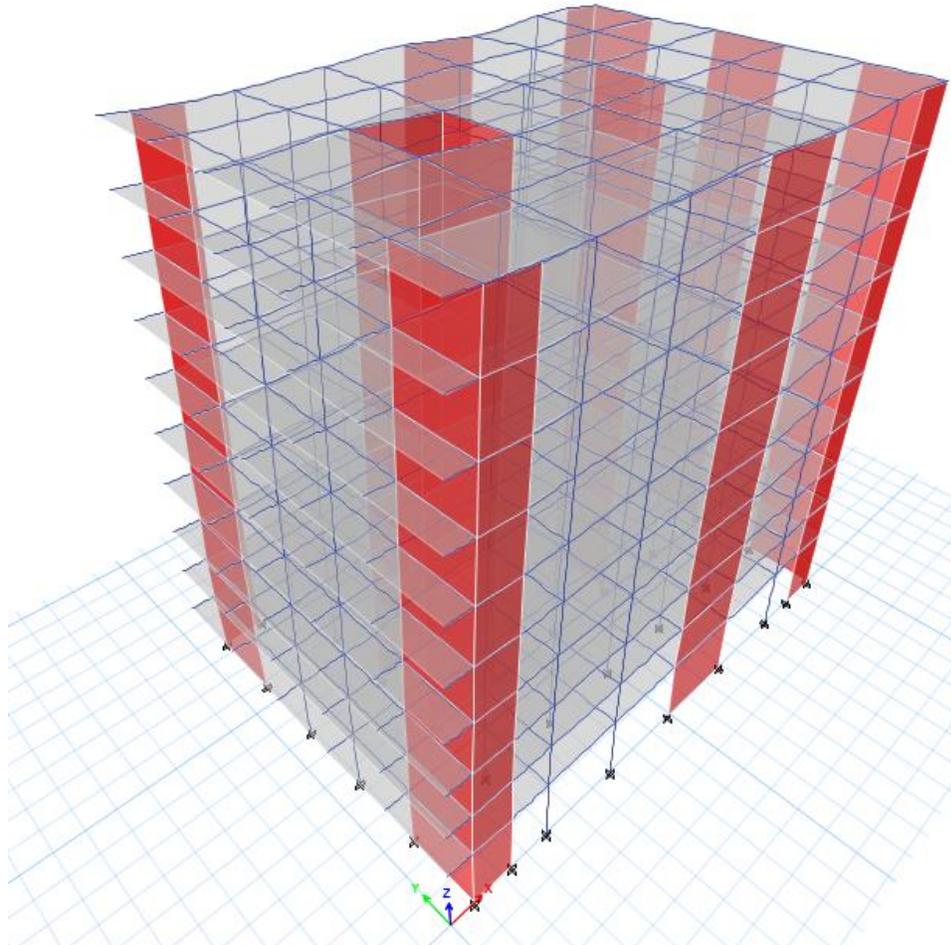


Ilustración 22 Periodo fundamental estructura base fija

El máximo cortante sísmico o dinámico generado por los modos de vibración obtenido en la base fue de  $V_{tj\_Y}=3577929$  kgf,  $V_{tj\_X}=3099571$  kgf en el piso 1:

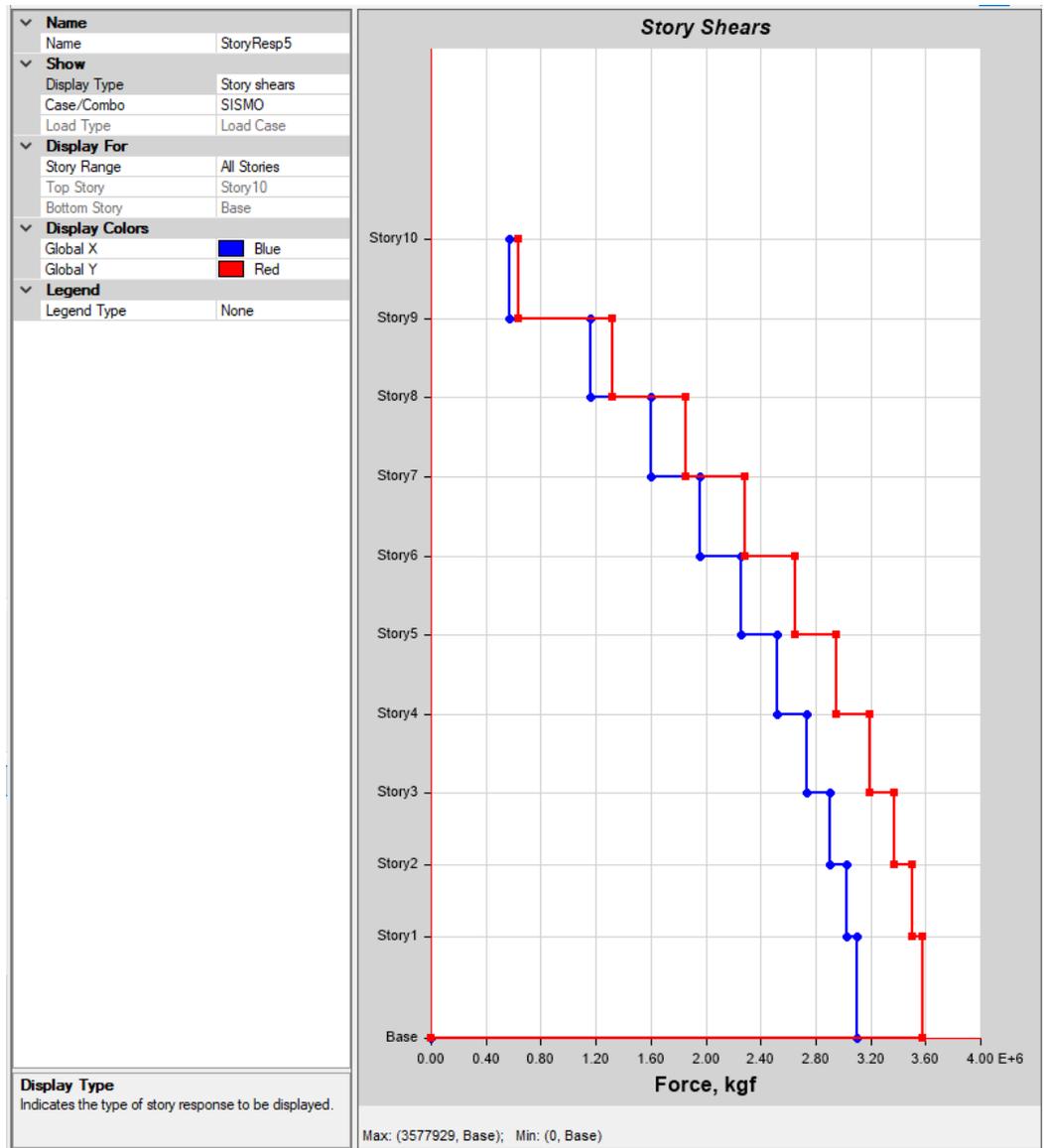


Ilustración 23 Cortante basal estructura base fija (El autor)

### Porcentaje de participación modal de las masas

Con el objetivo de dar cumplimiento al número de modos de vibración elegidos en la hipótesis del modelo, se verifica el porcentaje de participación de la masa de la estructura en cada una de las direcciones de análisis, la cual se adjunta en la tabla 17 de donde se infiere una **participación de las masas superior al 90%**, acorde a **A.5.4.2.**, con un ajuste requerido a 30 modos de vibración (3 modos por piso):

Tabla 17 Participación modal estructura base fija (El Autor)

Case	Mode	Period	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
		sec						
Modal	1	0.866	0.6786	0.0001	0.0045	0.6786	0.0001	0.0045
Modal	2	0.738	0.0002	0.6783	0.003	0.6787	0.6784	0.0075
Modal	3	0.588	0.0043	0.003	0.6686	0.6831	0.6814	0.6761
Modal	4	0.191	0.1915	6.66E-06	0.001	0.8745	0.6814	0.677
Modal	5	0.16	1.61E-05	0.1999	0.0003	0.8746	0.8812	0.6773
Modal	6	0.122	0.0008	0.0005	0.2015	0.8753	0.8817	0.8788
Modal	7	0.08	0.0685	0	0.0003	0.9438	0.8817	0.8791
Modal	8	0.068	0	0.0668	2.79E-05	0.9438	0.9485	0.8792
Modal	9	0.051	0.0002	1.54E-05	0.0695	0.944	0.9486	0.9486
Modal	10	0.046	0.0293	0	0.0001	0.9733	0.9486	0.9487
Modal	11	0.041	7.11E-07	0.0276	8.68E-06	0.9733	0.9762	0.9487
Modal	12	0.031	0.0135	1.56E-06	0.0003	0.9868	0.9762	0.9491
Modal	13	0.03	0.0004	1.33E-06	0.0282	0.9872	0.9762	0.9772
Modal	14	0.028	1.66E-06	0.0126	4.50E-05	0.9872	0.9888	0.9773
Modal	15	0.024	0.007	2.98E-06	0.0001	0.9942	0.9888	0.9773
Modal	16	0.022	1.38E-05	0.0061	0.0002	0.9942	0.9949	0.9775
Modal	17	0.021	0.0001	0.0002	0.0123	0.9943	0.9951	0.9899
Modal	18	0.019	0.0032	3.44E-06	2.23E-05	0.9975	0.9951	0.9899
Modal	19	0.018	8.68E-06	0.0027	1.81E-05	0.9975	0.9978	0.9899
Modal	20	0.017	0.0013	2.48E-06	2.16E-05	0.9988	0.9978	0.9899
Modal	21	0.016	0.0001	0.0001	0.0059	0.9988	0.9979	0.9958
Modal	22	0.016	6.33E-06	0.0011	4.15E-06	0.9989	0.999	0.9958
Modal	23	0.015	0.0006	3.01E-06	2.88E-06	0.9995	0.999	0.9958
Modal	24	0.014	6.92E-06	0.0005	1.01E-06	0.9995	0.9995	0.9958
Modal	25	0.014	0.0005	5.01E-06	6.35E-06	0.9999	0.9995	0.9958
Modal	26	0.014	3.08E-05	2.75E-05	0.0024	1	0.9996	0.9983
Modal	27	0.013	4.77E-06	0.0004	0	1	1	0.9983
Modal	28	0.012	1.18E-05	1.35E-05	0.0009	1	1	0.9992
Modal	29	0.011	6.12E-06	7.02E-06	0.0004	1	1	0.9996
Modal	30	0.01	5.54E-06	6.30E-06	0.0004	1	1	1

Con el ánimo de corroborar las irregularidades en planta, en altura y por ausencia de redundancia de la estructura, se evaluará la condición críticas más desfavorables, acorde a NSR-10 A.3.3., como se ilustra a continuación:

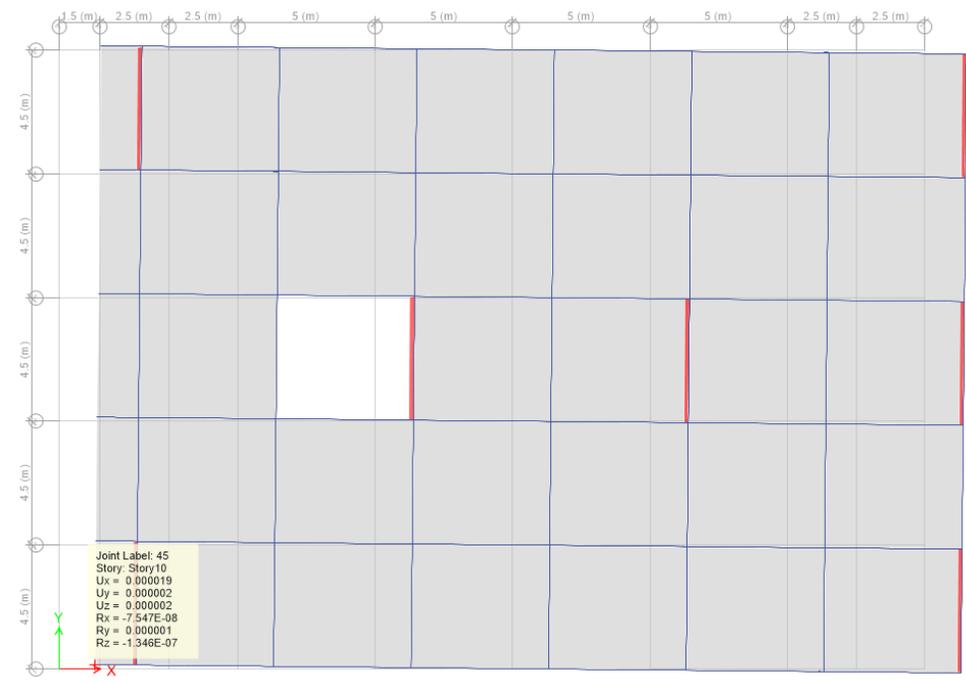
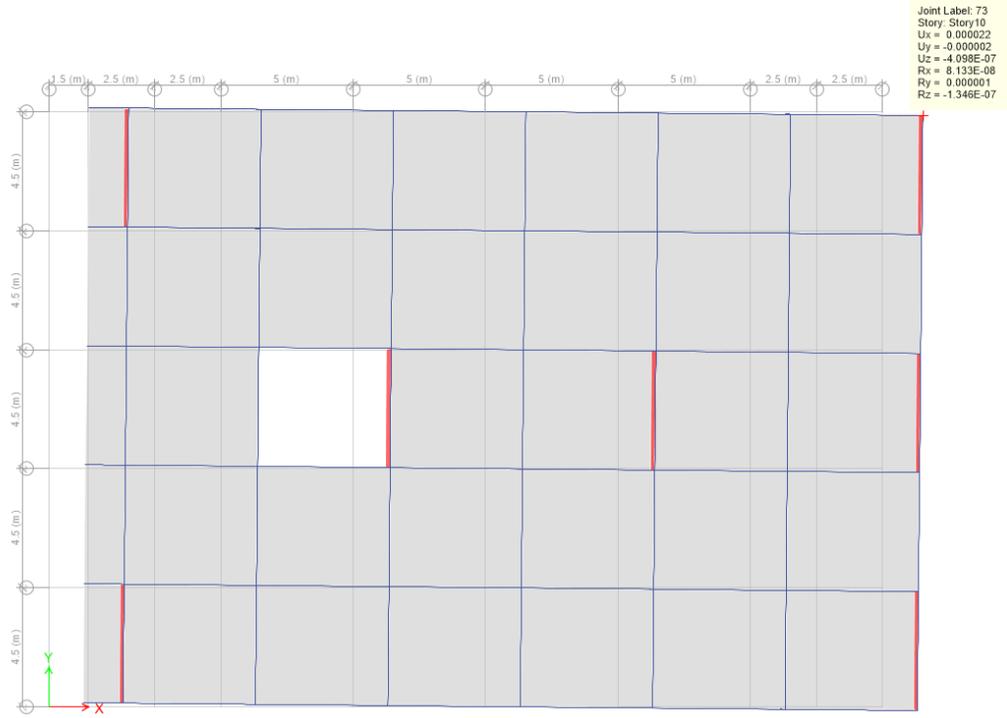


Ilustración 24 Verificación de irregularidades en planta (El Autor)

Tabla 18 Reacciones en la base estructura base fija (El Autor)

Load Case/Combo	FZ
	kgf
Dead	5024978.85
Live	1111725
SCP	2223450
Live_r	343125

**ANÁLISIS DE IRREGULARIDAD**

**Irregularidad en planta**

$\Delta_1$  -0.000002  
 $\Delta_2$  0.000002

Revisar otra irregularidad

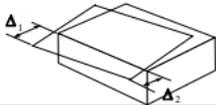
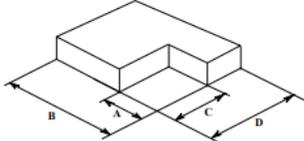
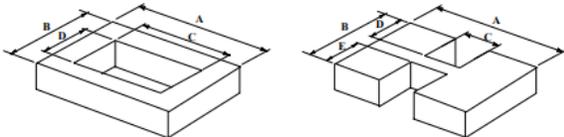
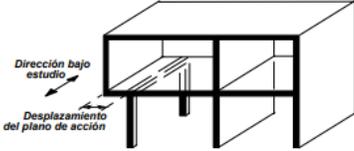
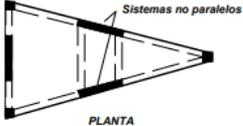
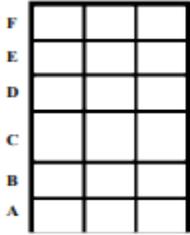
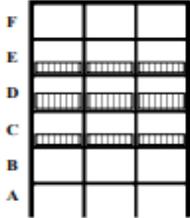
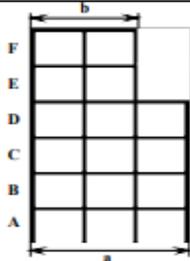
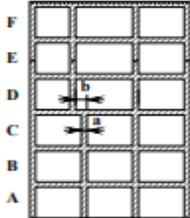
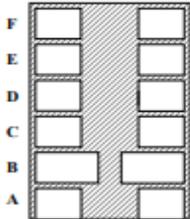
<p>Tipo 1aP — Irregularidad torsional  <math>\phi_p = 0.9</math>  <math>1.4 \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right) \geq \Delta_1 &gt; 1.2 \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)</math></p>	<p>Tipo 1bP — Irregularidad torsional extrema  <math>\phi_p = 0.8</math>  <math>\Delta_1 &gt; 1.4 \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)</math></p>
	
<p>Tipo 2P — Retrocesos en las esquinas — <math>\phi_p = 0.9</math>  <math>A &gt; 0.15B</math> y <math>C &gt; 0.15D</math></p>	
	
<p>Tipo 3P — Irregularidad del diafragma — <math>\phi_p = 0.9</math></p> <p>1) <math>C \times D &gt; 0.5 A \times B</math>      2) <math>(C \times D + C \times E) &gt; 0.5 A \times B</math></p>	
	
<p>Tipo 4P — Desplazamiento de los planos de Acción — <math>\phi_p = 0.8</math></p>	
 <p>Dirección bajo estudio Desplazamiento del plano de acción</p>	
<p>Tipo 5P — Sistemas no paralelos — <math>\phi_p = 0.9</math></p>	
 <p>Sistemas no paralelos PLANTA</p>	
<p>La estructura NO presenta algún tipo de irregularidad en planta; por tanto se asigna  <math>\phi_p = 1.0</math></p>	

Ilustración 25 Parámetros de irregularidad en planta (NSR-10)

## Irregularidad en altura

<p><b>Tipo 1aA — Piso flexible</b>  <math>\phi_a = 0.9</math>  <math>0.60 \text{ Rigidez } K_D \leq \text{Rigidez } K_C &lt; 0.70 \text{ Rigidez } K_D</math>                      o  <math>0.70 (K_D + K_E + K_F) / 3 \leq \text{Rigidez } K_C &lt; 0.80 (K_D + K_E + K_F) / 3</math></p>	
<p><b>Tipo 1bA — Piso flexible extremo</b>  <math>\phi_a = 0.8</math>  <math>\text{Rigidez } K_C &lt; 0.60 \text{ Rigidez } K_D</math>                      o  <math>\text{Rigidez } K_C &lt; 0.70 (K_D + K_E + K_F) / 3</math></p>	
<p><b>Tipo 2A — Distribución masa — <math>\phi_a = 0.9</math></b>   <math>m_D &gt; 1.50 m_E</math>                      o  <math>m_D &gt; 1.50 m_C</math></p>	
<p><b>Tipo 3A — Geométrica — <math>\phi_a = 0.9</math></b>   <math>a &gt; 1.30 b</math></p>	
<p><b>Tipo 4A — Desplazamiento dentro del plano de acción — <math>\phi_a = 0.8</math></b>   <math>b &gt; a</math></p>	
<p><b>Tipo 5aA — Piso débil</b>  <math>\phi_a = 0.9</math>  <math>0.65 \text{ Resist. Piso C} \leq \text{Resist. Piso B} &lt; 0.80 \text{ Resist. Piso C}</math></p>	
<p><b>Tipo 5bA — Piso débil extremo</b>  <math>\phi_a = 0.8</math>  <math>\text{Resistencia Piso B} &lt; 0.65 \text{ Resistencia Piso C}</math></p>	

La estructura NO presenta irregularidad geométrica en altura; por tanto se asigna

$$\phi_a = 1.0$$

Ilustración 26 Parámetros irregularidad en altura (NSR-10)

## **Ausencia de redundancia en el sistema de resistencia sísmica**

**A.3.3.8 — AUSENCIA DE REDUNDANCIA EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE RESISTENCIA SÍSMICA** — Debe asignarse un factor de reducción de resistencia por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica,  $\phi_r$ , en las dos direcciones principales en planta de la siguiente manera:

**A.3.3.8.2 — En edificaciones con un sistema estructural con capacidad de disipación de energía moderada (DMO) y especial (DES)** — Para edificaciones cuyo sistema estructural es de un material que cumple los requisitos de capacidad de disipación de energía moderada (DMO) o especial (DES) el valor del factor de reducción de resistencia por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica,  $\phi_r$ , se le puede asignar un valor de la unidad ( $\phi_r = 1.0$ ) cuando en todos los pisos que resistan más del 35 por ciento del corte basal en la dirección bajo estudio el sistema estructural de resistencia sísmica cumpla las siguientes condiciones de redundancia:

- (a) **En sistemas compuestos por pórticos con arriostramientos concéntricos** — La falla de cualquiera de las diagonales o sus conexiones al pórtico no resulta en una reducción de más del 33 por ciento de la resistencia ante fuerzas horizontales del piso ni produce una irregularidad torsional en planta extrema (Tipo 1bP).
- (b) **En sistemas compuestos por pórticos con arriostramientos excéntricos** — La pérdida de resistencia a momento (si se trata de vínculos a momento), o a cortante (para el caso de vínculos a corte), de los dos extremos de un vínculo no resulta en una reducción de más del 33 por ciento de la resistencia ante fuerzas horizontales del piso ni produce una irregularidad torsional en planta extrema (Tipo 1bP).
- (c) **En sistemas de pórtico resistente a momentos** — La pérdida de la resistencia a momento en la conexión viga-columna de los dos extremos de una viga no resulta en una reducción de más del 33 por ciento de la resistencia ante fuerzas horizontales del piso ni produce una irregularidad torsional en planta extrema (Tipo 1bP).
- (d) **En sistemas con muros estructurales de concreto estructural** — La falla de un muro estructural o de una porción de él que tengan una relación de la altura del piso a su longitud horizontal mayor de la unidad, o de los elementos colectores que lo conectan al diafragma, no resulta en una reducción de más del 33 por ciento de la resistencia ante fuerzas horizontales del piso ni produce una irregularidad torsional en planta extrema (Tipo 1bP).
- (e) **Para otros sistemas** — No hay requisitos especiales.

En los sistemas estructurales que no cumplan las condiciones enunciadas en (a) a (d) el factor de reducción de resistencia por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica,  $\phi_r$ , se le debe asignar un valor de  $\phi_r = 0.75$ . Aunque no se cumplan las condiciones enunciadas en (a) a (d) el factor de reducción de resistencia por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica,  $\phi_r$ , se le debe asignar un valor igual a la unidad ( $\phi_r = 1.0$ ) si todos los pisos que resistan más del 35 por ciento del corte basal en la dirección bajo estudio el sistema estructural de resistencia sísmica sean regulares en planta y tengan al menos dos vanos compuestos por elementos que sean parte del sistema de resistencia sísmica localizados en la periferia a ambos lados de la planta en las dos direcciones principales. Cuando se trate de muros estructurales para efectos de contar el número de vanos equivalentes se calcula como la longitud horizontal del muro dividida por la altura del piso.

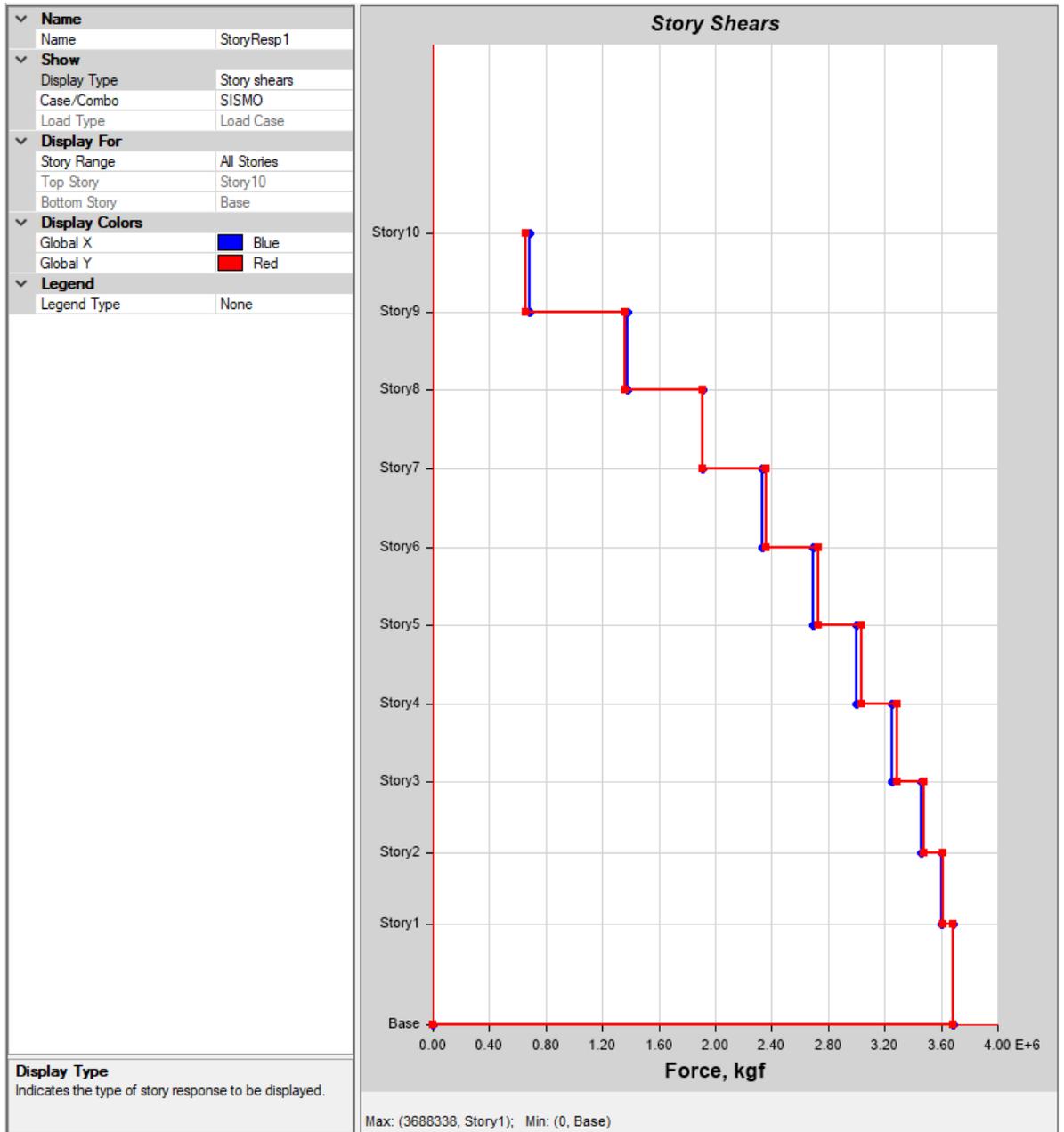
El 100% de los pisos de la estructura que cumplen con la capacidad de resistir el 35% del corte basal en la dirección bajo estudio; son regulares en planta; por lo tanto se asigna  $\phi_r=1.0$

Ilustración 27 Parámetros ausencia de redundancia (NSR-10)

Una vez agotados los criterios del análisis de irregularidad, se deduce que la edificación adolece de irregularidades geométricas como tal; por tanto, se tratará como una **estructura regular**

Tabla 19 Verificación ajuste FHE (El Autor)

<b>MÉTODO DEL ANÁLISIS DINÁMICO</b>			
<b>ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO ESPECTRAL</b>			
<b>Periodo fundamental de la estructura</b>			
<b>Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.</b>			
Periodo de la estructura en el primer modo	T	<b>0.876</b>	s
Coef. Que representa la aceleración pico efectiva	Aa	<b>0.25</b>	
Coef. de amplificación debido a efectos de sitio, afecta periodos intermedios	Fv	<b>1.55</b>	
Coef. Para periodo máximo permisible	Cu	1.3625	
Altura de la edificación	ho	<b>32.3</b>	m
Coef. Para periodo de la estructura	Ct	0.047	
Exponente para periodo de la estructura	$\alpha$	0.9	
Periodo fundamental aproximado	Ta	1.0724576	s
Periodo máximo permitido para la estructura	CuTa	1.461	s
<b>T &lt; CuTa?</b>		<b>OK</b>	
<b>Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g</b>			
Coef. Que representa la aceleración pico efectiva	Aa	0.25	
Coef. De la velocidad pico efectiva	Av	<b>0.25</b>	
Coef. de amplificación debido a efectos de sitio, afecta periodos cortos	Fa	<b>1.15</b>	
Coef. de amplificación debido a efectos de sitio, afecta periodos intermedios	Fv	1.55	
Grupo de uso	Grupo	<b>I</b>	
Coficiente de importancia de la edificación, depende del grupo de uso	I	1	
Periodo de vibración en zona de aceleraciones constantes	To	0.1347826	s
Periodo de vibración en zona de periodos largos	Tc	0.6469565	s
Periodo de vibración en zona de periodos cortos	TL	3.72	s
Valor del espectro de aceleraciones de diseño para el periodo dado	Sa	0.5308219	g
<b>Cálculo del cortante sísmico en la base</b>			
Valor del peso propio de la estructura medido en la base	Dead	<b>5024978.9</b>	kgf
Valor del peso de carga viva de la estructura medido en la base	Live	<b>1111725</b>	kgf
Valor del peso de la sobrecarga permanente de la estructura medido en la base	SCP	<b>2223450</b>	kgf
Valor del peso de carga viva de cubierta de la estructura medido en la base	Live_roof	<b>343125</b>	kgf
Cortante sísmico en la base	Vs	4619891.2	kgf
80% Vs	0,8Vs	3695912.9	kgf
<b>Cálculo del cortante modal en la base</b>			
Cortante sísmico en la base generado por modos de vibración, eje X	Vtj	<b>3099571</b>	kgf
Cortante sísmico en la base generado por modos de vibración, eje Y	Vtj	<b>3577929</b>	kgf
<b>Factor de modificación</b>			
Estructura Regular / Irregular		<b>Regular</b>	
Factor de modificación eje X	Fm_X	1.19	
Factor de modificación eje Y	Fm_Y	1.03	



*Ilustración 28 Verificación Cortante Basal (El Autor)*

El valor del cortante basal dinámico ajustado es de **84803.81 kgf**

Tabla 20 Verificación de ajuste FHE (El Autor)

<b>MÉTODO DEL ANÁLISIS DINÁMICO</b>			
<b>ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO ESPECTRAL</b>			
<b>Periodo fundamental de la estructura</b>			
<b>Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.</b>			
Periodo de la estructura en el primer modo	T	<b>0.876</b>	s
Coef. Que representa la aceleración pico efectiva	Aa	<b>0.25</b>	
Coef. de amplificación debido a efectos de sitio, afecta periodos intermedios	Fv	<b>1.55</b>	
Coef. Para periodo máximo permisible	Cu	1.3625	
Altura de la edificación	ho	<b>32.3</b>	m
Coef. Para periodo de la estructura	Cr	0.047	
Exponente para periodo de la estructura	$\alpha$	0.9	
Periodo fundamental aproximado	Ta	1.0724576	s
Periodo máximo permitido para la estructura	CuTa	1.461	s
<b>T &lt; CuTa?</b>		<b>OK</b>	
<b>Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g</b>			
Coef. Que representa la aceleración pico efectiva	Aa	0.25	
Coef. De la velocidad pico efectiva	Av	<b>0.25</b>	
Coef. de amplificación debido a efectos de sitio, afecta periodos cortos	Fa	<b>1.15</b>	
Coef. de amplificación debido a efectos de sitio, afecta periodos intermedios	Fv	1.55	
Grupo de uso	Grupo	<b>I</b>	
Coeficiente de importancia de la edificación, depende del grupo de uso	I	1	
Periodo de vibración en zona de aceleraciones constantes	To	0.1347826	s
Periodo de vibración en zona de periodos largos	Tc	0.6469565	s
Periodo de vibración en zona de periodos cortos	TL	3.72	s
Valor del espectro de aceleraciones de diseño para el periodo dado	Sa	0.5308219	g
<b>Cálculo del cortante sísmico en la base</b>			
Valor del peso propio de la estructura medido en la base	Dead	<b>5024978.9</b>	kgf
Valor del peso de carga viva de la estructura medido en la base	Live	<b>1111725</b>	kgf
Valor del peso de la sobrecarga permanente de la estructura medido en la base	SCP	<b>2223450</b>	kgf
Valor del peso de carga viva de cubierta de la estructura medido en la base	Live_roof	<b>343125</b>	kgf
Cortante sísmico en la base	Vs	4619891.2	kgf
80% Vs	0,8Vs	3695912.9	kgf
<b>Cálculo del cortante modal en la base</b>			
Cortante sísmico en la base generado por modos de vibración, eje X	Vtj	<b>3688338</b>	kgf
Cortante sísmico en la base generado por modos de vibración, eje Y	Vtj	<b>3688338</b>	kgf
<b>Factor de modificación</b>			
Estructura Regular / Irregular		<b>Regular</b>	
Factor de modificación eje X	Fm_X	1.00	
Factor de modificación eje Y	Fm_Y	1.00	

Una vez revisados los datos contenidos en la tabla anterior, de donde se deduce que el factor de modificación es igual a 1, se concluye que esta estructura cumple con los ajustes de cortante basal dinámico y estático acorde a NSR-10 A.5.4.5.

- **Paso 9. Desplazamientos horizontales:** evaluación de los desplazamientos horizontales, incluyendo los efectos torsionales de toda la estructura y el desplazamiento relativo entre niveles contiguos.

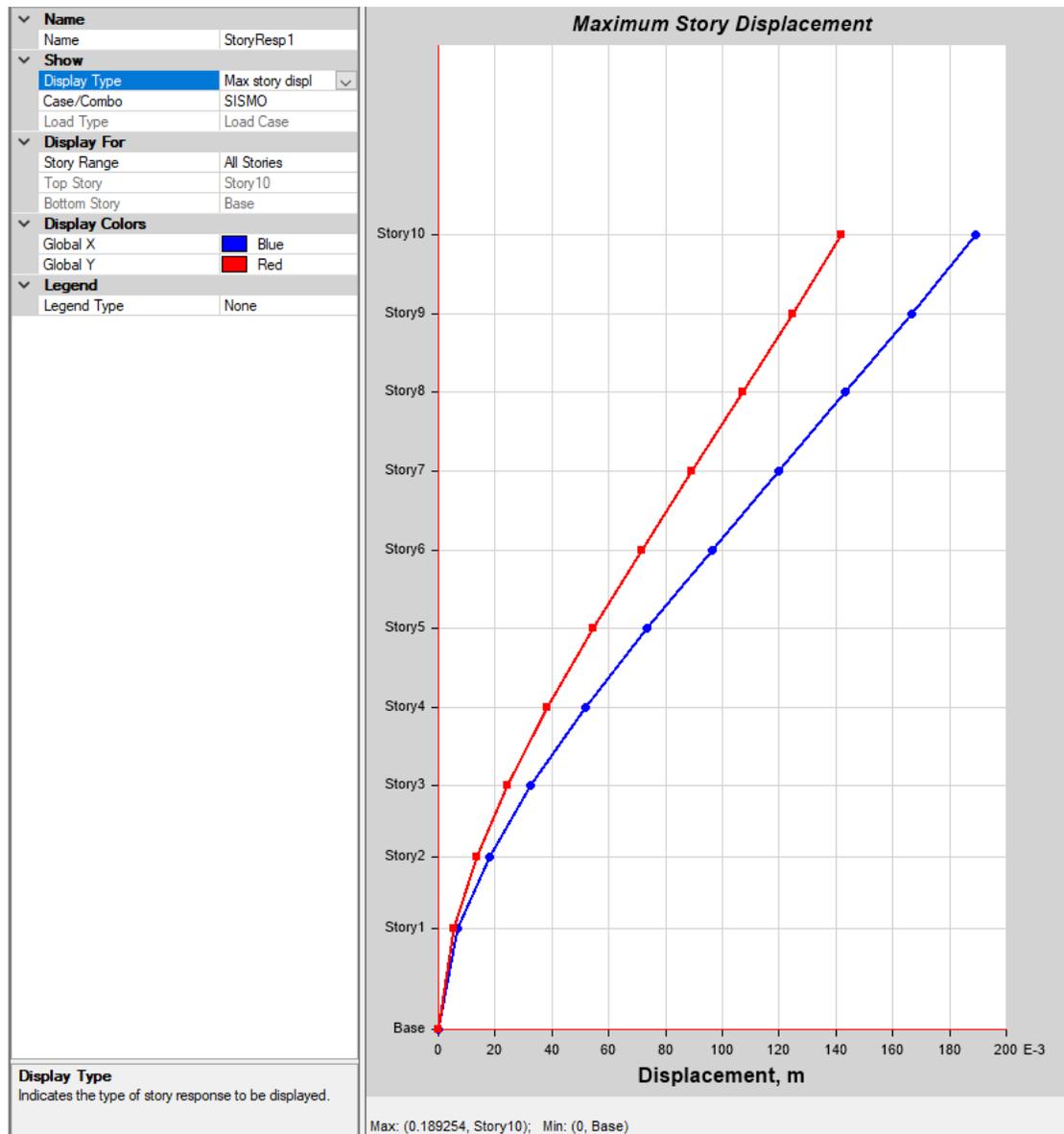


Ilustración 29 Desplazamientos elásticos edificación de base fija (El Autor)

El desplazamiento máximo total de la edificación es de **18.93 cm** tomado en el **piso 10**.

- **Paso 10. Verificación de derivas:** comprobación de que las derivas de diseño obtenidas no excedan los límites exigidos por la norma en NSR-10 tabla A.6.4-1.

Tabla 21 Derivas máximas permitidas (NSR-10)

Tabla A.6.4-1  
Derivas máximas como porcentaje de  $h_{pi}$

Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	1.0% ( $\Delta_{max}^i \leq 0.010 h_{pi}$ )
de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	0.5% ( $\Delta_{max}^i \leq 0.005 h_{pi}$ )

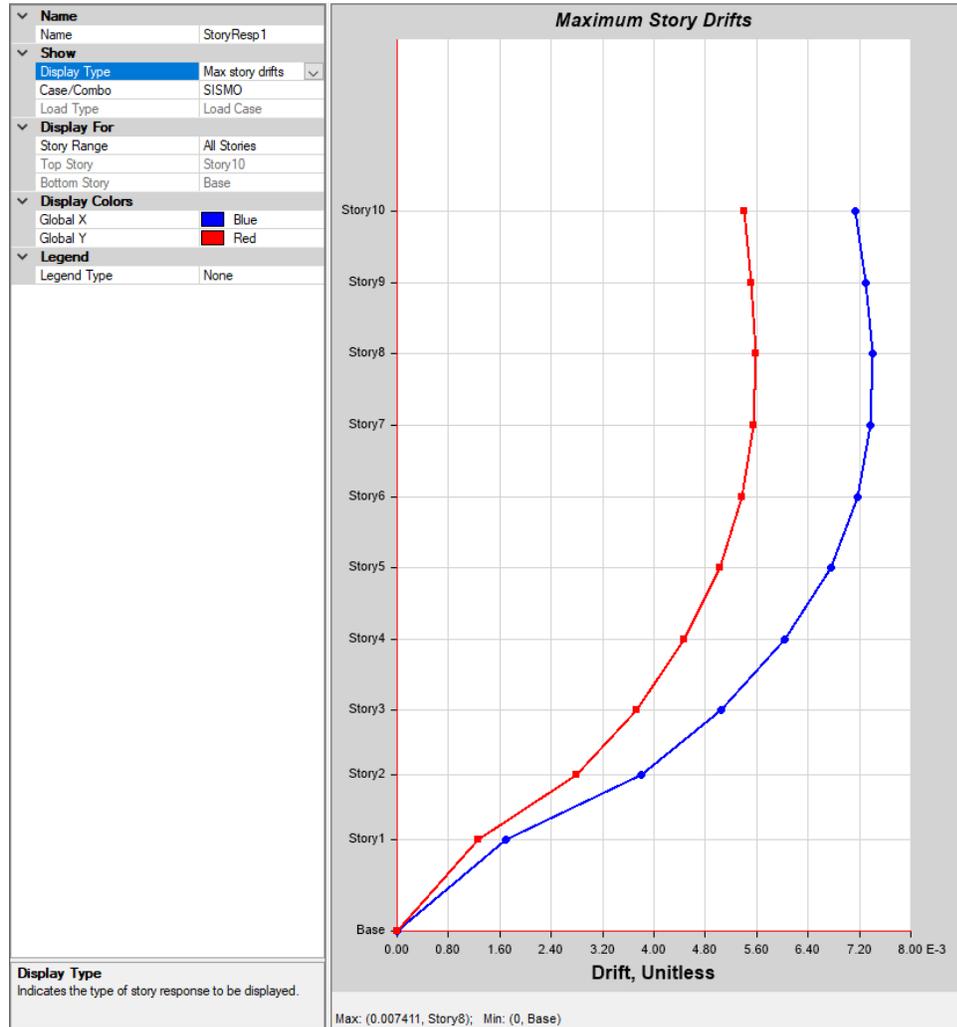


Ilustración 30 Derivas máximas obtenidas edificación de base fija (El Autor)

La deriva máxima total de la edificación es de **0.7411% tomado en el piso 8.**

Para cumplir con este paso, **NO** se hace necesario rigidizar la estructura, toda vez que se obtienen derivas máximas mediante el software estructural de apoyo ETABS, correspondiente a una deriva menor que **1.00 %** en el piso dos en la dirección X e Y, respectivamente como se mostró con anterioridad.

● **Paso 11. Combinaciones de las diferentes solicitaciones:** las diferentes solicitaciones que deben ser tenidas en cuenta, se combinan para obtener fuerzas internas de diseño de la estructura.

El método de diseño de la estructura es el de los estados límites de servicio y resistencia, para el cual se emplean las siguientes combinaciones de carga para diseñar los componentes de la estructura NSR-10 B.2.4

1. 1.4D
2. 1.2D + 1.6L
3. 1.2D + 1L + 1Ex + 0.3 Ey
4. 1.2D + 1L + 1Ex - 0.3 Ey
5. 1.2D + 1L - 1Ex + 0.3 Ey
6. 1.2D + 1L - 1Ex - 0.3 Ey
7. 1.2D + 1L + 1Ey + 0.3 Ex
8. 1.2D + 1L + 1Ey - 0.3 Ex
9. 1.2D + 1L - 1Ey + 0.3 Ex
10. 1.2D + 1L - 1Ey - 0.3 Ex
11. 0.9D + 1Ex + 0.3 Ey
12. 0.9D + 1Ex - 0.3 Ey
13. 0.9D - 1Ex + 0.3 Ey
14. 0.9D - 1Ex - 0.3 Ey
15. 0.9D + 1Ey + 0.3 Ex
16. 0.9D + 1Ey - 0.3 Ex
17. 0.9D - 1Ey + 0.3 Ex
18. 0.9D - 1Ey - 0.3 Ex
19. ENVOLVENTE

Donde:

- D=Carga muerta de la estructura
- L= Carga Viva actuante en la estructura
- Ex= Sismo en la dirección X
- Ey= Sismo en la dirección Y

En todas aquellas combinaciones que involucran fuerzas sísmicas, se tuvieron en cuenta las direcciones de aplicación de las mismas según NSR-10 A.3.6.3.

● **Paso 12. Diseño de elementos estructurales:** se lleva a cabo de acuerdo con los requisitos propios del sistema de resistencia sísmica y del material estructural utilizado.

○ Sistema de resistencia sísmica: Combinado de muros estructurales con pórticos en concreto (DES).

○ Grado de capacidad de disipación de energía del material estructural: Especial (DES).

○ Coeficiente básico de capacidad de disipación de energía:

$$R_o = 7.00.$$

○ Coeficiente de capacidad de disipación de energía:

$$R = \phi_p \cdot \phi_a \cdot \phi_r \cdot R_o$$

○ Se calculan las fuerzas internas inelásticas de diseño:  $E = F_s / R$ .

$$R_o = 7.00; \Phi_p = 1.0; \Phi_a = 1.00; \Phi_r = 1.0 \quad \therefore \quad R = 7.00$$

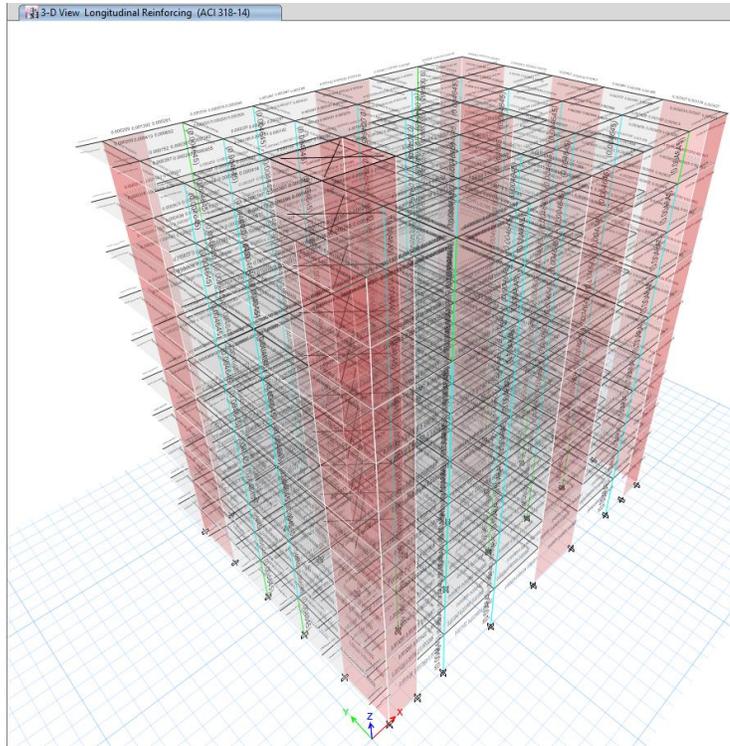


Ilustración 31 Diseño acero longitudinal edificación de base fija (El Autor)

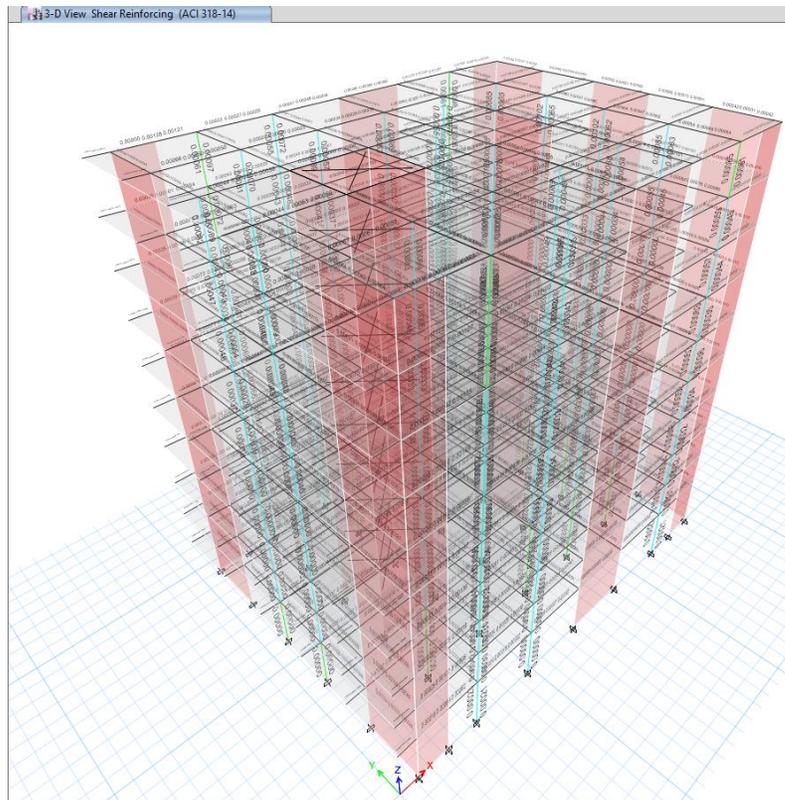


Ilustración 32 Diseño acero transversal edificación de base fija (El Autor)

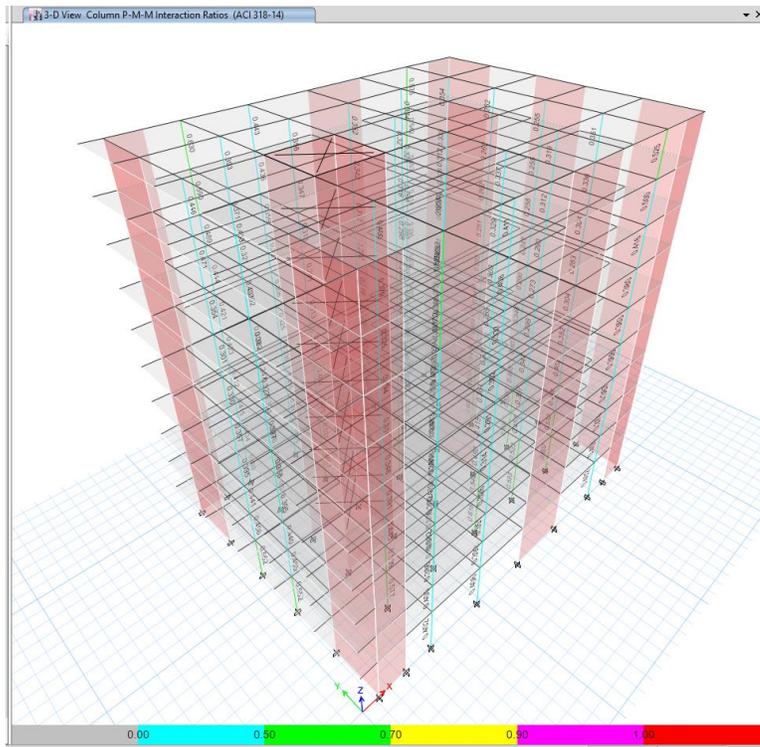


Ilustración 33 Verificación de interacción de columnas P-M-M (El Autor)

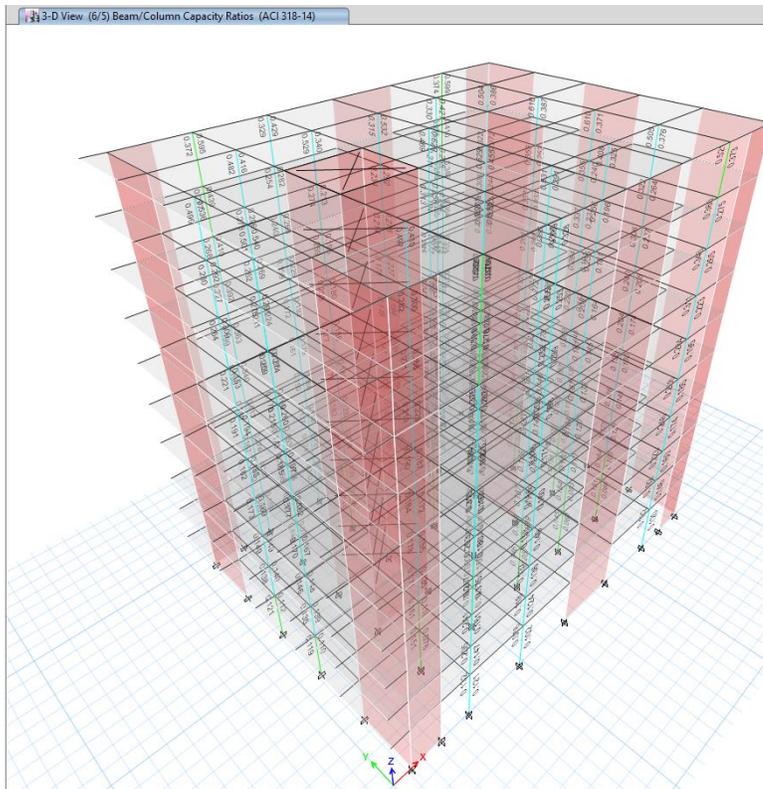


Ilustración 34 Verificación demanda-capacidad (Chequeo de los 6/5). (El Autor)

Respecto al diseño de la fundación de la edificación de base fija, se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cimentación profunda tipo pilotes, profundidad 15 m
- Se supone que el proyecto se encuentra sobre una capa de arcillas muy consistentes
- El parámetro “Coeficiente de Balasto”, se extrae de la tesis de maestría “Interacción suelo-estructura: semi-espacio de Winkler”, Universidad Politécnica de Cataluña, España 1993 (Autor: Nelson Morrison).  $K_s=3.46 \text{ kgf/cm}^3$ . De las fórmulas de Terzaghi:  $K_h=1.384 \text{ kgf/cm}^3$
- Diámetro de pilotes: 50cm ( $\rho_{\min}=0.5\%$ )

Se chequean las dimensiones proyectadas en el software ETABS, verificando que la capacidad de los elementos sea competente ( $D/C < 1$ ) ante la imposición de las cargas de la superestructura:

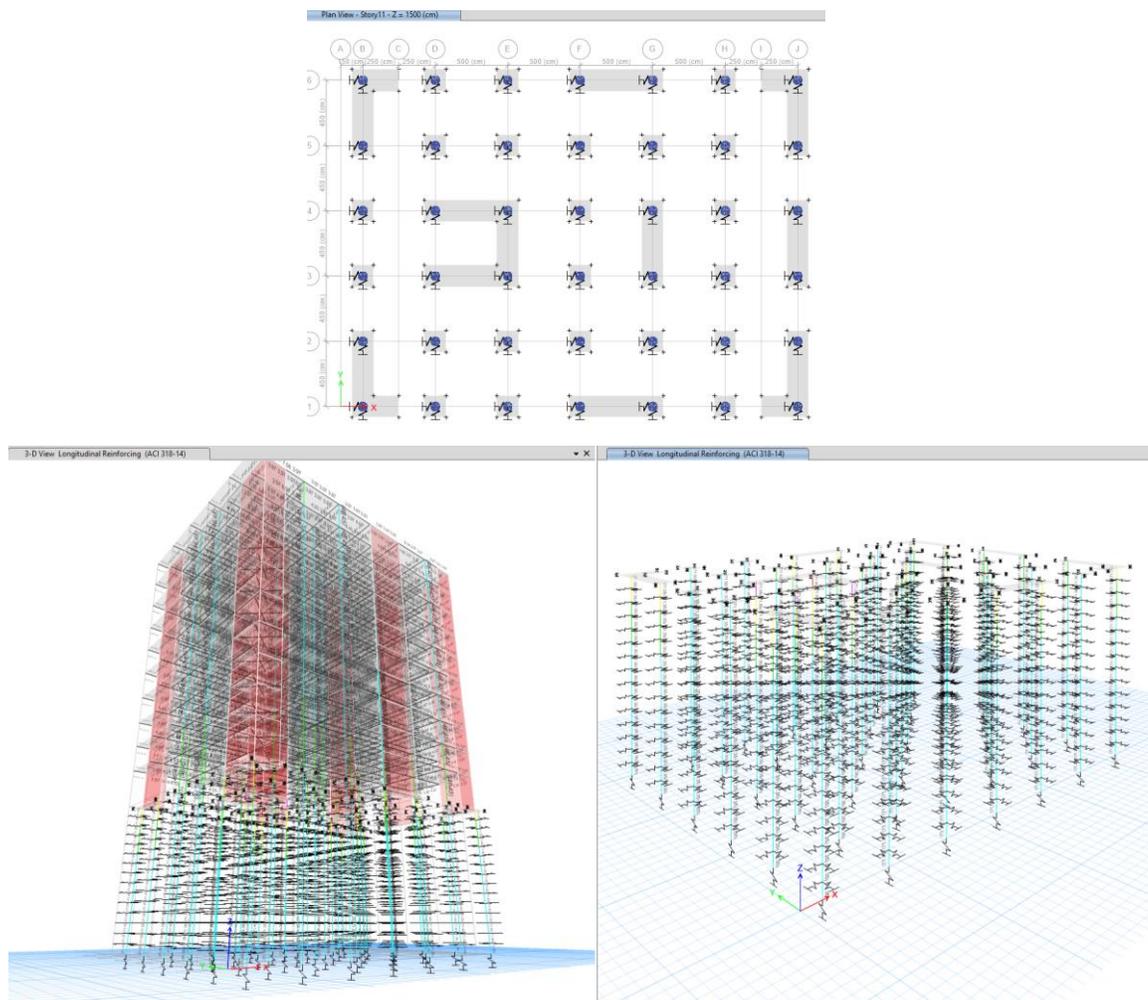


Ilustración 35 Diseño de Fundación edificación base fija (El Autor)

## 5.2 Diseño del sistema de aislamiento

Para proceder con el diseño de aisladores se considera una secuencia ordenada, recordando que el uso de la edificación es de tipo residencial; asimismo los aisladores a proponer serán de material elastomérico (apoyos de goma, ó “Rubber Bearings”), dentro de los que se pueden utilizar son NRB, HDRB, LRB ó FPS; ya que son productos que se encuentran disponibles comercialmente. En este orden de ideas se considerarán las características técnicas de unidades de amortiguamiento que ofrece el proveedor de la multinacional *Bridgestone*.

En la ilustración 36 se plantea la planta del sistema de aislamiento sísmico de base de la edificación

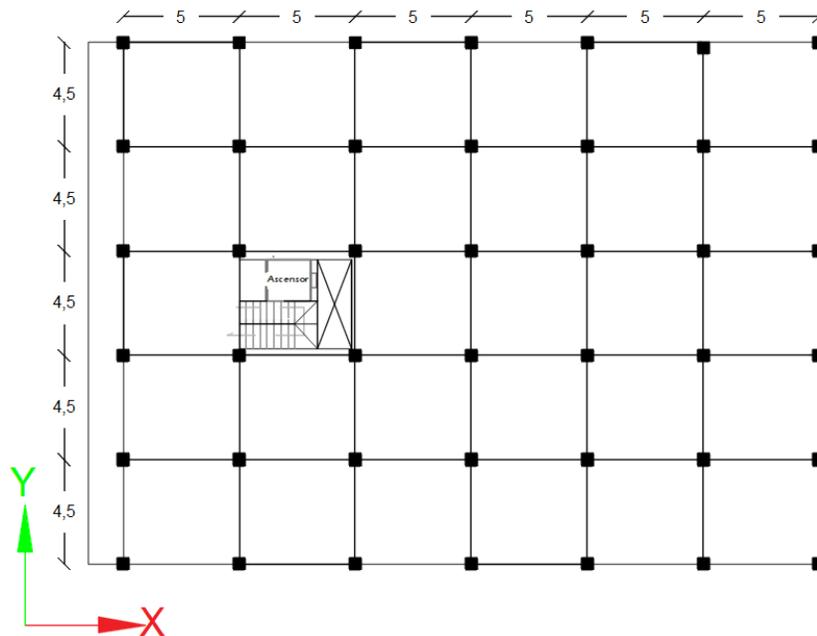


Ilustración 36 Planta del edificio a proteger mediante aislamiento sísmico de base. (El Autor)

Se plantea una edificación similar a la convencional; es decir, con las mismas 10 plantas y altura de 32.3 metros de altura.

Al realizar previamente el análisis de la edificación de base fija, se obtuvo la siguiente información:

- Número de aisladores a utilizar: 42 unidades (uno por cada intersección de los ejes estructurales)
- Peso sísmico de la estructura W (DL+0.25LL): 4677.84 Tonf
- Centro de masa (x, y) piso 1: (17.78; 12.38)
- Centro de rigidez (x, y) piso 1: (18.28; 11.25)
- Tipo de uso: convencional (Tipo I)
- Tipo de desempeño: Ocupación inmediata (IO, Immediate Occupancy)

Con base en lo anterior, se inicia el diseño de la capa de aislación teniendo en cuenta los pasos establecidos en el ASCE 7-16 (ver marco teórico, diseño de aisladores):

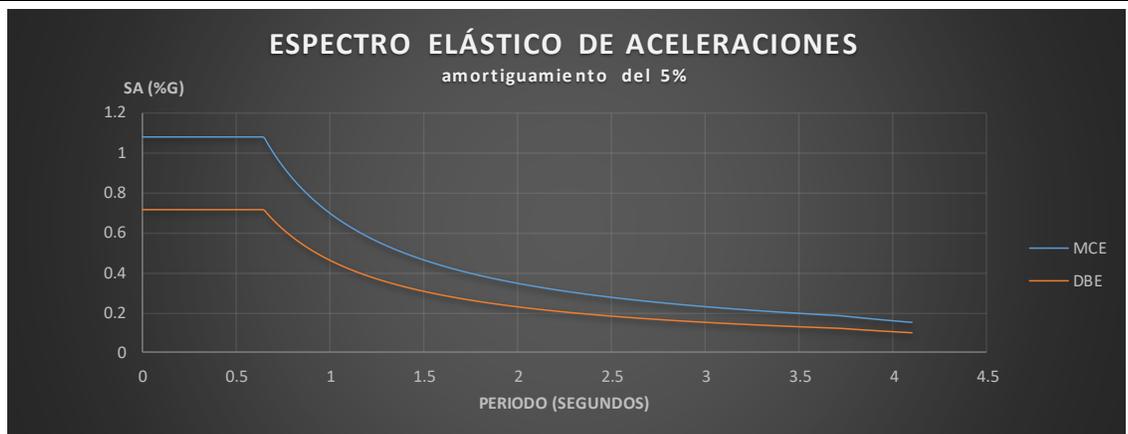
Tabla 22 Diseño de aisladores sísmicos en la base (El Autor)

1. Características principales de la edificación				Referencias
Ubicación del proyecto		<b>Manizales, Colombia</b>		
Uso		<b>Convencional (Tipo I)</b>		
Sistema Estructural		<b>Combinado, muros de concreto y Pórticos de concreto</b>		
Tipo de desempeño		<b>(IO, Immediate Occupancy)</b>		
Zona de amenaza sísmica		<b>Alta</b>		NSR-10 (Figura A.2.3-1)
Tipo suelo		<b>C</b>		

2. Peso sísmico de la superestructura				Referencias
Peso carga muerta	DL	<b>4399.906</b>	Tonf	} Estas cargas provienen del análisis sísmico de la edificación
Peso carga viva	LL	<b>1111.725</b>	Tonf	
Peso carga viva + muerta	DL+LL	5511.631	Tonf	
Carga de Servicio	1.2DL+1.6LL	7058.647	Tonf	
Peso sísmico de la estructura (1.0*DL+0.25*LL)	<b>W</b>	<b>4677.837</b>	<b>Tonf</b>	

3. Determinar la amenaza sísmica			Referencias
Factor de modificación sísmica (MCE/DBE)		<b>1.5</b>	ASCE/SEI 7-16 11.4.7
Coef. Aceleración pico efectiva	$A_a$	<b>0.25</b>	NSR-10 (Figura A.2.3-2)
Coef. Velocidad pico efectiva	$A_v$	<b>0.25</b>	NSR-10 (Figura A.2.3-3)
Coef. Amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos	$F_a$	<b>1.15</b>	NSR-10 (Tabla A.2.4-3)
Coef. Amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios	$F_v$	<b>1.55</b>	NSR-10 (Tabla A.2.4-4)
Período de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes	$T_0$	0.135	NSR-10 A.2.6.1.3
Período de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo.	$T_c$	0.647	NSR-10 A.2.6.1.1
Período de vibración correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para períodos largos.	$T_L$	3.72	NSR-10 A.2.6.1.2



Aceleración espectral del sismo máximo probable (MCE) para el período de 1 segundo amortiguamiento del 5%

**Sa**      **0.705**      **g**

#### 4. Seleccionar período y amortiguamiento objetivos

Período objetivo       $T_M$       **3**      **segundos**  
Amortiguamiento objetivo       $\beta_M$       **15%**

5. Determinar la acción sísmica en el edificio aislado				Referencias
Método de análisis		Estático, Fuerza Horizontal Equivalente		
Aceleración espectral máxima (MCE) para el periodo objetivo, amortiguamiento del 5%	S <sub>a_M</sub>	0.233	g	
Aceleración espectral de diseño (DBE) para el periodo objetivo, amortiguamiento del 5%	S <sub>a_D</sub>	0.155	g	

6. Calcular la rigidez efectiva del sistema				Referencias
Rigidez solicitada del sistema	k <sub>M</sub>	2092.375	Tonf/m	

7. Determinar los desplazamientos máximos del sistema de aislación por efecto del viento				
Presión neta		44.510	kgf/m <sup>2</sup>	NSR-10 titulo B. 6
Desplazamiento límite		6.150	cm	ASCE/SEI 7.5.6
Desplazamiento generado viento		2.061	cm	

8. Calcular el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento				Referencias
Factor de amortiguamiento	B <sub>M</sub>	1.350		ASCE/SEI 7-16 Tabla 17.5.1
Desplazamiento máximo	D <sub>M</sub>	0.389	m	

9. Obtener fuerzas de cortante				Referencias
Fuerza cortante de diseño	V <sub>b</sub>	813.77	Tonf	
Peso de la superestructura excluyendo la losa inferior	W <sub>s</sub>	4210.05	Tonf	Para este caso W <sub>s</sub> =W*9/10
Fuerza de diseño sísmico lateral total sin reducir	V <sub>st</sub>	761.90	Tonf	
Coefficiente numérico de disipación de energía de la	R <sub>I</sub>	2.00		
Fuerza cortante reducida	V <sub>s</sub>	380.95	Tonf	

10. Distribución vertical de la fuerza sísmica						Referencias
Fuerza sísmica actuante en el nivel 1	$F_1$	<b>25.930</b>	<b>Tonf</b>			
Periodo fundamental de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento usando análisis modal racional, asumiendo condiciones de base fija	$T_{1b}$	<b>0.995</b>	<b>s</b>			Obtenido en el análisis para la edificación de base fija
Parámetro relacionado con el periodo de la estructura	$k$	<b>2.09</b>				
Piso	Peso w (Tonf)	Altura h (m)	$h^k$	$w \cdot h^k$	$C_{vx}$	$F_x$ (Tonf)
Cubierta	<b>371.80</b>	<b>3.2</b>	6.69	2486.02	0.05	<b>19.14</b>
10	<b>768.78</b>	<b>3.2</b>	6.69	5140.36	0.10	<b>39.58</b>
9	<b>768.27</b>	<b>3.2</b>	6.69	5136.99	0.10	<b>39.55</b>
8	<b>766.98</b>	<b>3.2</b>	6.69	5128.34	0.10	<b>39.49</b>
7	<b>782.61</b>	<b>3.2</b>	6.69	5232.83	0.11	<b>40.29</b>
6	<b>782.61</b>	<b>3.2</b>	6.69	5232.83	0.11	<b>40.29</b>
5	<b>782.61</b>	<b>3.2</b>	6.69	5232.83	0.11	<b>40.29</b>
4	<b>782.61</b>	<b>2.9</b>	6.06	4742.25	0.10	<b>36.51</b>
3	<b>761.98</b>	<b>2.9</b>	6.06	4617.25	0.09	<b>35.55</b>
2	<b>761.98</b>	<b>4.1</b>	8.57	6527.84	0.13	<b>50.26</b>
1						<b>25.93</b>
$\Sigma$	7330.225			49477.53	1.00	<b>380.95</b>

11. Calcular las fuerzas axiales en los aisladores					
Numero de aisladores		<b>42</b>		Unidades	
Largo edificación // eje X	b	<b>30</b>		m	
Ancho edificación // eje Y	d	<b>22.5</b>		m	
Altura de la edificación	H	<b>32.3</b>		m	
Número de aisladores cara b		<b>7.0</b>			
Número de aisladores cara d		<b>6.0</b>			
Sentido de la carga sísmica:			$V_s(\leftarrow)$	$V_s(\rightarrow)$	
Fuerzas de tensión (cara b, //Y)	$N(b) (\uparrow)$	<b>150.440</b>	<b>72.314</b>	Tonf	
Fuerzas de tensión (cara d, //X)	$N(d) (\uparrow)$	<b>172.141</b>	<b>50.613</b>	Tonf	No se presentan fuerzas de tracción en ningún aislador
Fuerzas axiales contributivas	$N (\downarrow)$	<b>131.229</b>		Tonf	

**12. Calcular los desplazamiento máximos totales en cada aislador**

Radio de giro del sistema de aislamiento n **10.83** m

Ubicación de aisladores			
i	x (m)	y (m)	$x_i^2+y_i^2$
1	0	0	0.00
2	0	5	25.00
3	0	10	100.00
4	0	15	225.00
5	0	20	400.00
6	0	25	625.00
7	0	30	900.00
8	4.5	0	20.25
9	4.5	5	45.25
10	4.5	10	120.25
11	4.5	15	245.25
12	4.5	20	420.25
13	4.5	25	645.25
14	4.5	30	920.25
15	9	0	81.00
16	9	5	106.00
17	9	10	181.00
18	9	15	306.00
19	9	20	481.00
20	9	25	706.00
21	9	30	981.00
22	13.5	0	182.25
23	13.5	5	207.25
24	13.5	10	282.25
25	13.5	15	407.25
26	13.5	20	582.25
27	13.5	25	807.25
28	13.5	30	1082.25
29	18	0	324.00
30	18	5	349.00
31	18	10	424.00
32	18	15	549.00
33	18	20	724.00
34	18	25	949.00
35	18	30	1224.00
36	22.5	0	506.25
37	22.5	5	531.25
38	22.5	10	606.25
39	22.5	15	731.25
40	22.5	20	906.25
41	22.5	25	1131.25
42	22.5	30	1406.25

Relación entre el periodo translacional efectivo y el periodo rotacional efectivo del sistema de aislamiento P<sub>T</sub> **2.09**

Excentricidad actual medida en planta entre el centro de masas de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, incluyendo una excentricidad adicional del 5% medida en planta en la dirección más larga de la estructura, perpendicular a la aplicación de la carga sísmica e<sub>y</sub> 1.5 m

e<sub>x</sub> 1.125 m

D<sub>TMx</sub> 0.415 m

Desplazamiento máximo total (Acorde a ASCE 7-16 17.5.3.3, no debe ser menor que 1.15 D<sub>M</sub>) Se tomará: **0.45** m

D<sub>TM<sub>y</sub></sub> 0.415 m

Se tomará: **0.45** m

Desplazamiento a absorber D\* **0.467** m

13. Seleccionar las unidades de aislamiento

AISLADORES TIPO NRB			
Cantidad de aisladores NRB		18	Unidades
Aislador tipo NRB		NS080N3	
Tipo de goma		G0.30	
Módulo de Elasticidad	E	1.64	MPa
Módulo de Bulk	$E_{\infty}$	1200	MPa
Diámetro externo de la goma	$\phi_o$	800	mm
Diámetro interno de la goma	$\phi_i$	20	mm
Área de la sección del aislador	A	502300	mm <sup>2</sup>
Espesor de las láminas de goma	tr	5.4	mm
Número de capas	n	30	
Espesor total del aislador	H	162	mm
Primer factor de forma	S <sub>1</sub>	36.10	
Segundo factor de forma	S <sub>2</sub>	4.9	
	$\gamma_0$	0.0	%
	$\sigma_{cr}$	51.0	MPa
	$\gamma_2$	4.0	%
	$\sigma_2$	19.0	MPa
Deformación angular	$\gamma$	240.07	%
Módulo de elasticidad transversal de la goma	$G_{eq}$	0.294	MPa
Rigidez lateral	$K_h$	0.912	kN/m

AISLADORES TIPO LRB			
Cantidad de aisladores LRB		24	Unidades
Aislador tipo LRB		LH060G4B	
Tipo de goma		G4	
Módulo de Elasticidad	E	2.2	MPa
Módulo de Bulk	$E_{\infty}$	1176	MPa
Diámetro externo de la goma	$\phi_o$	600	mm
Diámetro interno de la goma	$\phi_i$	110	mm
Área de la sección del aislador	A	273200	mm <sup>2</sup>
Espesor de las láminas de goma	tr	4.0	mm
Número de capas	n	50	
Espesor total del aislador	H	200	mm
Primer factor de forma	S <sub>1</sub>	37.50	
Segundo factor de forma	S <sub>2</sub>	3.00	
	$\gamma_0$	0.0	%
	$\sigma_{cr}$	24.0	MPa
	$\gamma_2$	3.0	%
	$\sigma_2$	2.0	MPa
Deformación angular	$\gamma$	194.46	%
Módulo de elasticidad transversal de la goma	$G_{eq}$	0.385	MPa
Módulo de cortante de la goma	Gr	0.385	MPa
Rigidez lateral inicial elástica	$K_h$	7220.00	kN/m
Rigidez lateral plástica	Kd	554.00	kN/m
Rigidez lateral equivalente	$K_{eq}$	932.00	kN/m
Resistencia característica	Qd	75.7	kN
Factor de amortiguamiento equivalente	B	0.244	

Variación de las propiedades de los apoyos de goma (%)			
Nivel	NRB	LRB	
	Rigidez (Kh)	Rigidez Plástica (Kd)	Resistencia Característica Qd
Producción	±10	±10	±10
Envejecimiento	+10	+10	0
Temperatura	+6/-5	+6/-5	+23/-21
<b>Total</b>	<b>+26/-15</b>	<b>+26/-15</b>	<b>+33/-31</b>

Parámetros seleccionados para el sistema de aislamiento			
Nivel	NRB	LRB	
	Rigidez Kh (kN/mm)	Rigidez Plástica Kd (kN/mm)	Resistencia Característica Qd (kN)
Mínimo	0.775	0.471	52.233
Nominal	0.912	0.554	75.7
Máximo	1.149	0.698	100.681

**14. Calcular la rigidez aportada por los aisladores**

$K_{eq\_min}$	61.692	Tonf/m
$K_{eq\_max}$	97.545	Tonf/m
<b><math>k_{M(e)min}</math></b>	<b>1482.041</b>	<b>Tonf/m</b>
<b><math>k_{M(e)max}</math></b>	<b>2343.182</b>	<b>Tonf/m</b>

**15. Calcular el periodo eficaz del sistema**

<b><math>T_{M(e)min}</math></b>	<b>2.834</b>	<b>segundos</b>
<b><math>T_{M(e)max}</math></b>	<b>3.564</b>	<b>segundos</b>

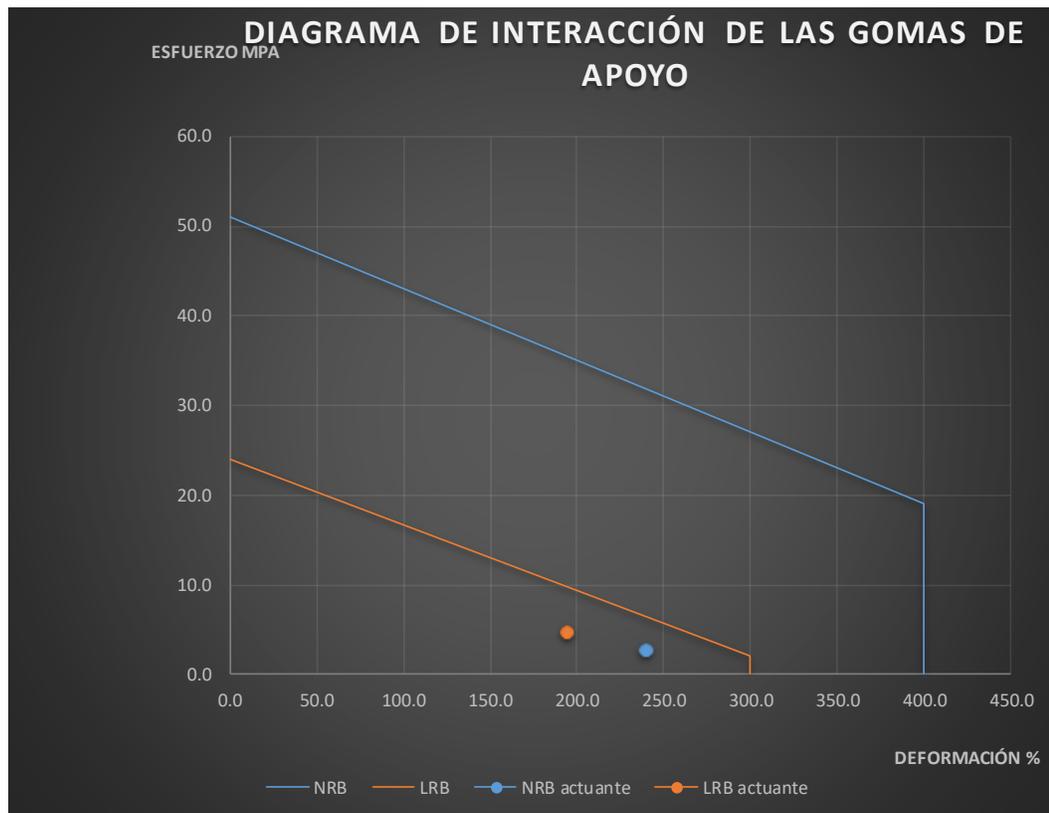
**16. Calcular el amortiguamiento de los aisladores**

Coeficiente característico de corrección de resistencia	$C_{Qd}$	1.00	
Esfuerzo de tensión transversal del plomo	$\sigma_{pb}$	<b>7.967</b>	MPa
Resistencia Característica efectiva	$Q_d$	75.71	kN
Relación rigidez inicial /rigidez posfluencia	$\beta$	<b>13</b>	
Rigidez a cortante de la goma laminada	$K_r$	53.61	Tonf/m
Módulo de cortante aparente del plomo	$\alpha_p$	0.583	MPa
Rigidez a cortante del núcleo de plomo	$K_p$	2.824	Tonf/m
Factor de corrección post-Rigidez posfluencia	$C_{Kd}$	0.531	
Rigidez inicial	$k_2=k_d$	29.983	Tonf/m
Rigidez equivalente efectiva máxima	$k_1$	389.781	Tonf/m
Rigidez equivalente efectiva mínima	$K_{eq\_max}$	24.880	kN/mm
Factor de amortiguamiento efectivo mínimo	$K_{eq\_min}$	15.735	kN/mm
Factor de amortiguamiento efectivo máximo	<b><math>H_{eq\_min}</math></b>	<b>13.792</b>	%
	<b><math>H_{eq\_max}</math></b>	<b>16.690</b>	%

**17. Calcular la resistencia vertical de los aisladores.**

Coefficiente adimensional que depende de la dureza de la goma	$k$	<b>0.85</b>	Para NRB y LRB, $k=0.85$
	$E_{b\_NRB}$	603.583	MPa
Factor de corrección NRB	$\alpha_{c\_NRB}$	0.994	
Carga crítica de pandeo LRB	$P_{cr\_LRB}$	2630.507	Tonf
Esfuerzo crítico de pandeo NRB	$\sigma_{cr\_NRB}$	<b>51.374</b>	MPa
Factor de corrección NRB	$\beta_{c\_NRB}$	0.809	
Esfuerzo crítico último	$\sigma_{c\_NRB}(\gamma)$	31.188	MPa
Deformación angular actuante	$\gamma_{NRB}$	<b>2.401</b>	%
Esfuerzo actuante	$\sigma_{NRB}$	<b>2.563</b>	MPa
	$E_{b\_LRB}$	704.737	MPa
Factor de corrección LRB	$\alpha_{c\_LRB}$	0.500	
Carga crítica de pandeo LRB	$P_{cr\_LRB}$	680.937	Tonf
Esfuerzo crítico de pandeo LRB	$\sigma_{cr\_LRB}$	<b>24.451</b>	MPa
Esfuerzo crítico último	$\sigma_{c\_LRB}(\gamma)$	10.187	MPa
Deformación angular actuante	$\gamma_{LRB}$	<b>1.945</b>	%
Esfuerzo actuante	$\sigma_{LRB}$	<b>4.712</b>	MPa

**18. Construir diagrama de interacción  $\sigma_{cr}$  vs.  $\gamma$**



Posterior a este diseño inicial se comprueban el diseño de la edificación aislada mediante el análisis y diseño tridimensional el software ETABS, ingresando las características de los aisladores como “Link Elements”, para cada dirección de estudio:

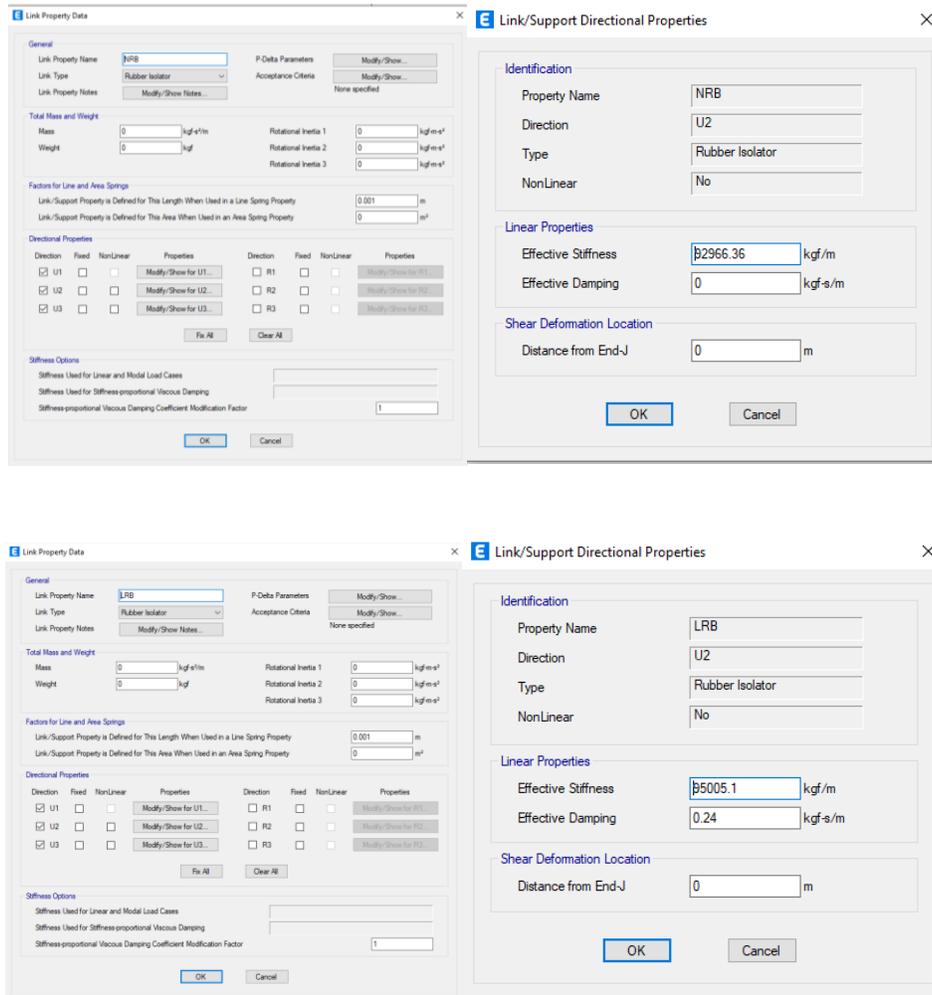
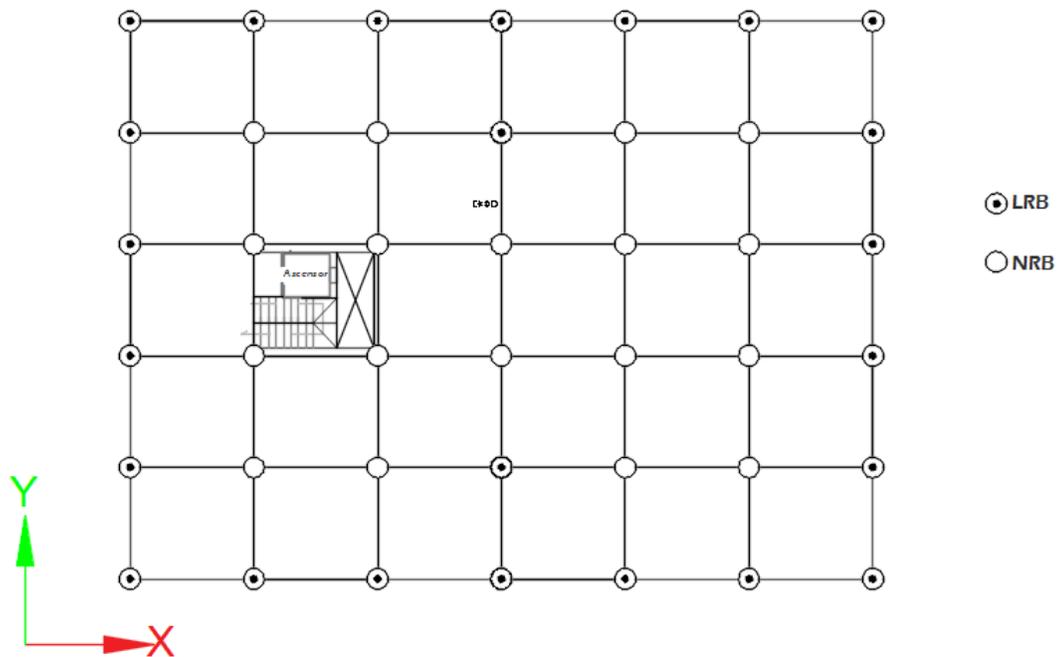
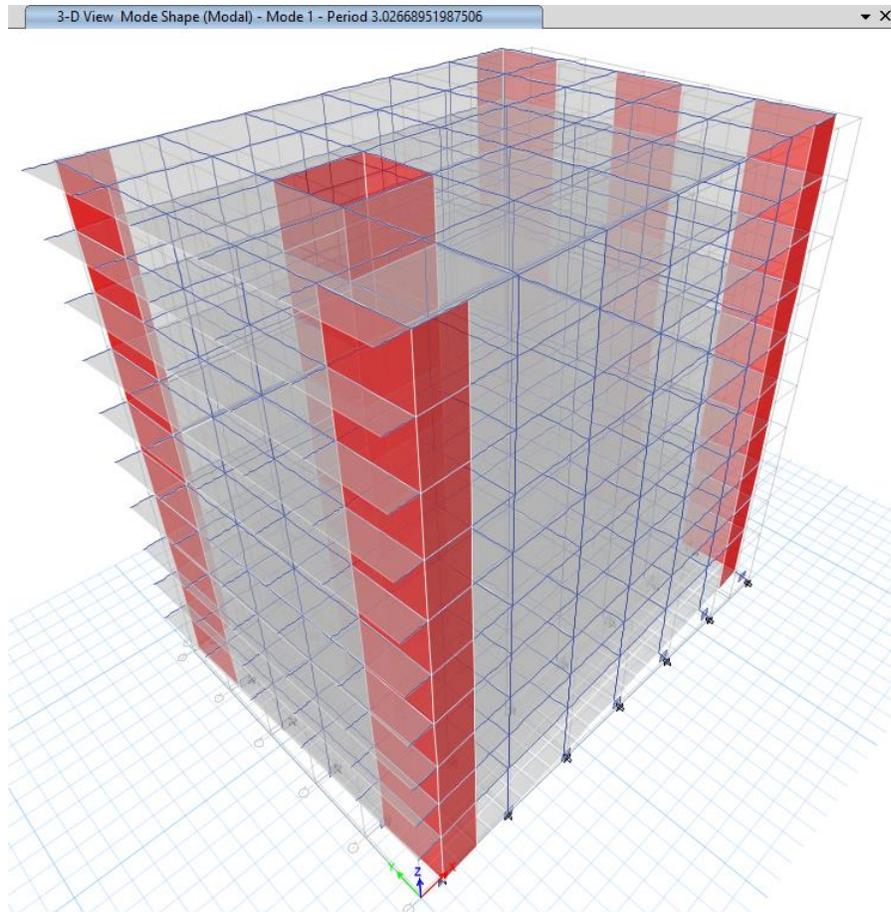


Ilustración 37 Características de las unidades de aislamiento NRB, LRB

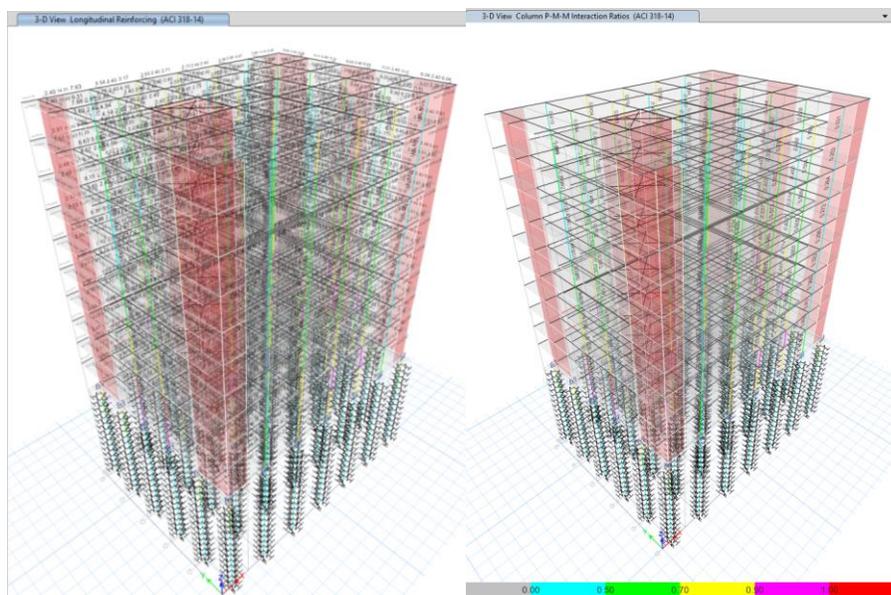


*Ilustración 38 Ubicación de los aisladores en la planta de la edificación (El Autor)*

Se verifica el valor del periodo del modelo del software computacional, el cual oscila es de 3.026 segundos, el cual se ajusta casi perfectamente valor designado del periodo objetivo (3 segundos).



*Ilustración 39 Comprobación de periodo objetivo.*



*Ilustración 40 Diseño de los elementos de la subestructura y superestructura*

## CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES HALLAZGOS

Una vez analizada y diseñada la estructura de base fija y base aislada, se procede a calcular las cantidades de acero de refuerzo y volúmenes de concreto por piso, con la ayuda del software CSI DETAILING. Con estos valores se procede a obtener costos totales de las dos estructuras. Se llegó a los siguientes resultados:

*Tabla 23 Cantidades de acero y concreto para la edificación de base fija (El Autor)*

Element	Tie Weight(Ton)	Long Rebar Height(Ton)	Rebar Weight(Ton)	Concrete Volume(M3)
<b>Total</b>	84.913	119.860	204.773	1696.976
<b>Story10</b>	7.777	12.576	20.353	165.432
<b>Story9</b>	8.047	12.292	20.339	165.432
<b>Story8</b>	8.026	12.132	20.158	164.172
<b>Story7</b>	8.549	12.250	20.800	169.955
<b>Story6</b>	8.615	12.015	20.630	170.655
<b>Story5</b>	8.588	11.885	20.473	170.655
<b>Story4</b>	8.547	11.791	20.338	170.655
<b>Story3</b>	8.131	11.273	19.404	162.600
<b>Story2</b>	8.101	11.155	19.257	162.600
<b>Story1</b>	10.532	12.490	23.022	194.820

*Tabla 24 Cantidades de acero y concreto para la edificación de base aislada (El Autor)*

Element	Tie Weight(Ton)	Long Rebar Height(Ton)	Rebar Weight(Ton)	Concrete Volume(M3)
<b>Total</b>	74.508	104.291	178.799	1204.441
<b>Story10</b>	7.019	11.645	18.664	120.002
<b>Story9</b>	7.269	10.057	17.326	120.002
<b>Story8</b>	7.198	10.015	17.213	119.192
<b>Story7</b>	7.199	10.144	17.343	119.525
<b>Story6</b>	7.247	9.989	17.236	120.002
<b>Story5</b>	7.255	9.905	17.161	119.397
<b>Story4</b>	7.243	9.809	17.052	119.397
<b>Story3</b>	7.214	10.251	17.466	113.744
<b>Story2</b>	7.378	10.598	17.975	114.266
<b>Story1</b>	9.485	11.878	21.364	138.914

Respecto al costo por unidad de los aisladores elastoméricos, se proyecta que cada unidad tiene un valor aproximado en el mercado de \$5000 USD (\$18.860.000 COP), para un total de 42 unidades se tiene un valor total para aisladores de \$210.000 USD (\$792.120.000 COP).

Tabla 25 Cantidades y costos asociados a la estructura de base aislada ( El Autor)

Item	Und	Base Fija			Base aislada		
		Cant	Vr Unit	Vr Parcial	Cant	Vr Unit	Vr Parcial
Acero superestructura	Tonf	204.77	\$ 5,200,000	\$ 1,064,804,000	178.8	\$ 5,200,000	\$ 929,760,000
Acero fundación	Tonf	34.6	\$ 5,200,000	\$ 179,920,000	33	\$ 5,200,000	\$ 171,600,000
Acero sótano	Tonf	N/A	N/A	N/A	9.6	\$ 5,200,000	\$ 49,920,000
Excavación fundación	m3	124	\$ 117,000	\$ 14,508,000	124	\$ 117,000	\$ 14,508,000
Concreto superestructura	m3	1696.98	\$ 522,475	\$ 886,629,626	1204.44	\$ 522,475	\$ 629,289,789
Concreto fundación	m3	123.7	\$ 522,475	\$ 64,630,158	123.7	\$ 522,475	\$ 64,630,158
Concreto sótano	m3	N/A	N/A	N/A	20.8	\$ 522,475	\$ 10,867,480
Excavación sótano	m3	N/A	N/A	N/A	1350	\$ 117,000	\$ 157,950,000
Aisladores NRB	Und	N/A	N/A	N/A	18	\$ 18,860,000	\$ 339,480,000
Aisladores LRB	Und	N/A	N/A	N/A	24	\$ 18,860,000	\$ 452,640,000
<b>TOTAL BASE FIJA</b>			<b>\$ 2,210,491,783</b>		<b>TOTAL BASE AISLADA</b>		
					<b>\$ 2,820,645,427</b>		

Con estos valores finales se puede evidenciar, que la edificación de base aislada tiene un costo del 127,60% del costo de la edificación de base fija. La aplicación de esta tecnología eleva los costos directos y a su vez mejora considerablemente el desempeño sísmico de la edificación.

## CAPÍTULO V. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Después de conocer los resultados de los dos análisis de manera individual se realiza la comparación de algunos aspectos importantes a evaluar de las edificaciones como se muestra a continuación:

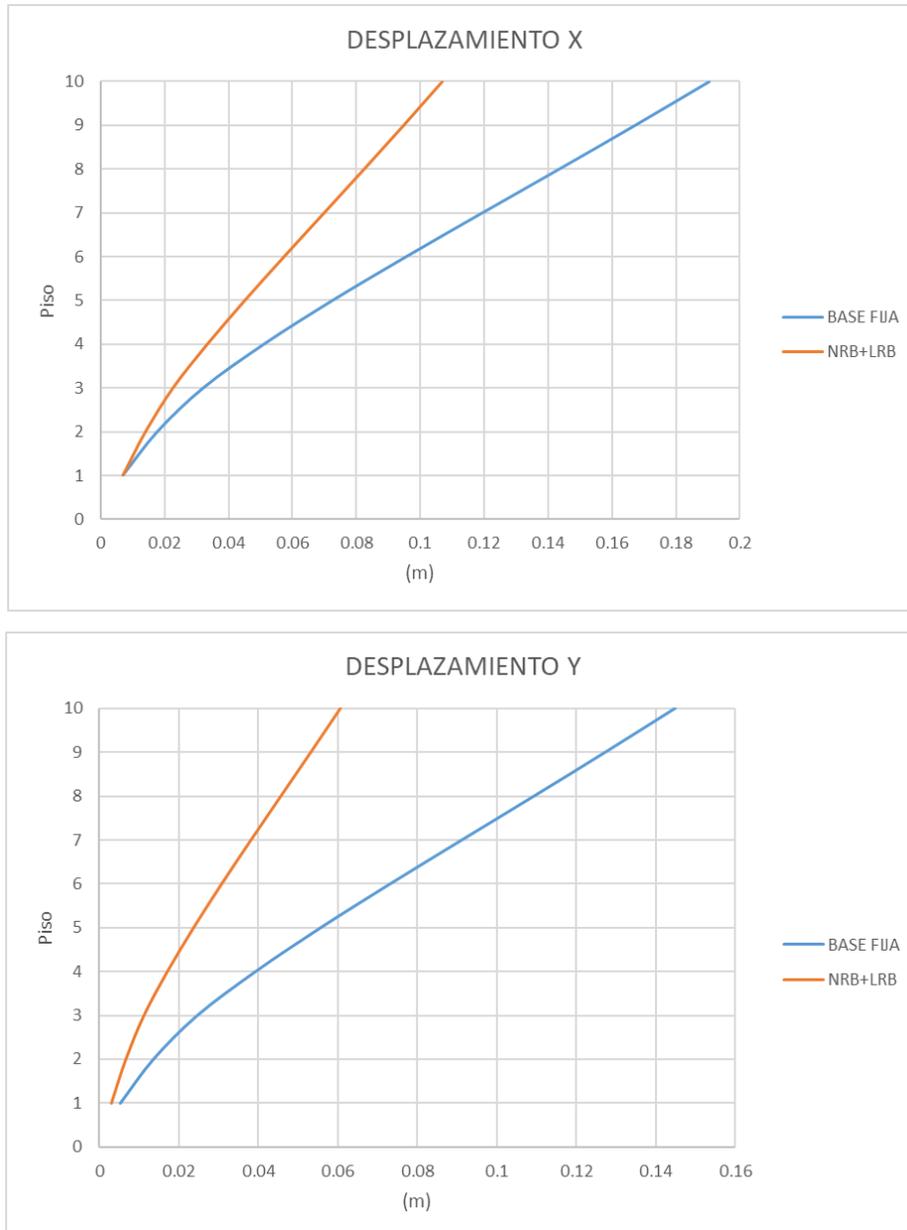


Ilustración 41 Gráfica comparativa entre desplazamientos horizontales

Se de las gráficas anteriores se aprecia que la edificación aislada (línea de color naranja) presenta menores desplazamientos horizontales en comparación a la edificación de base fija aproximadamente en un 58%.

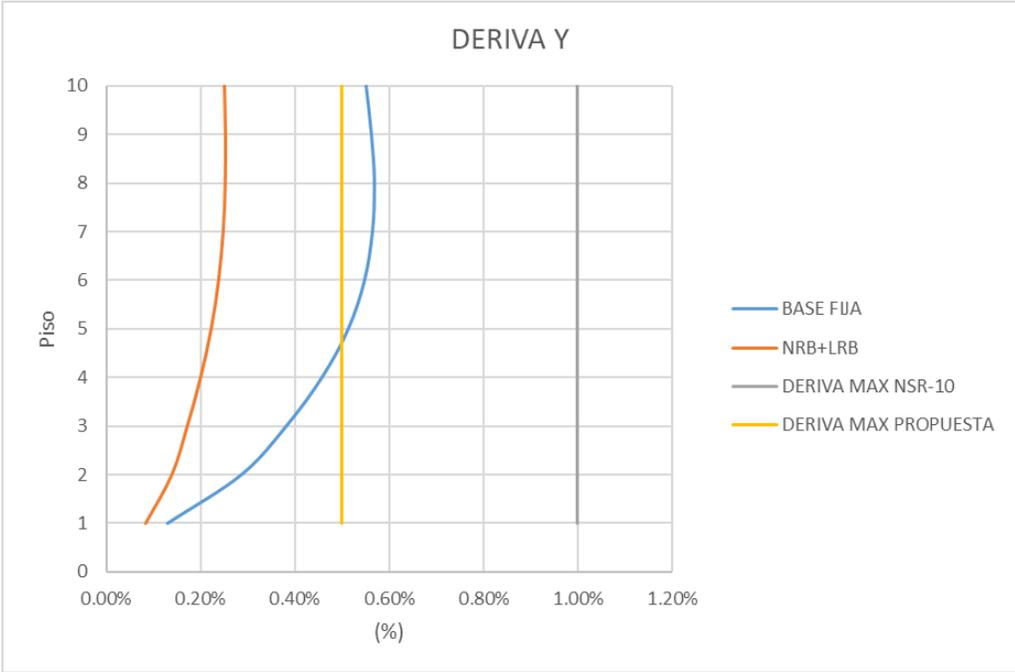
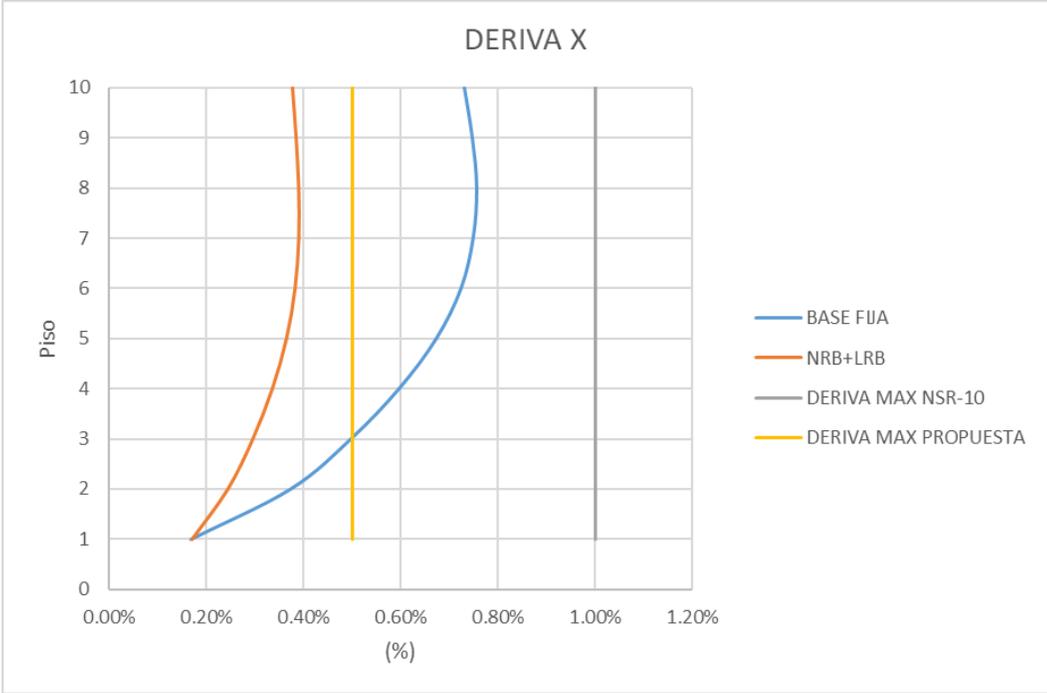


Ilustración 42 Gráfica comparativa entre derivas de edificaciones

Las derivas obtenidas en la superestructura, permiten comprobar que existe desacoplamiento parcial entre la edificación y su base, cuyo desplazamiento no sobrepasa el desplazamiento máximo calculado anteriormente de forma manual. Además, al comparar las derivas de las edificaciones se evidencia que la deriva de base aislada corresponde al 57% de la deriva de la edificación de base fija.

Teniendo en cuenta estos aspectos generales que demuestran el comportamiento de la edificación frente a eventos sísmicos importantes se puede afirmar que la mejor opción es la implementación de aisladores sísmicos en edificaciones, puntualmente para edificaciones ubicadas en zona de amenaza sísmica alta.

Respecto a los costos, se debe considerar que el 27.6% de costos adicionales de la edificación aislada en comparación de la edificación de base fija, son mínimos para las ventajas que brinda en relación a la conservación de vidas y preservación de la inversión de dicha edificación. Así pues, esta aplicación demuestra la viabilidad de la implementación de los aisladores sísmicos de base en cualquier tipo de edificaciones de la región.

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos al analizar y diseñar la estructura de la edificación convencional de base fija de 10 pisos que se obtuvieron, fueron revisados en orden de dar cumplimiento al comportamiento esperado de una edificación convencional de este tipo. En primer lugar, el periodo fundamental de la edificación es de 0.866 segundos; y por su parte, el peso sísmico de la edificación es 5025 tonf. También se corroboró que el porcentaje de participación modal fuera mayor al 90%, además que no fuera mixto, esto es que no presentara componentes rotacionales significativos y que, por el contrario, sus componentes tuvieran un comportamiento traslacional en la dirección x e y respectivamente. Los desplazamientos máximos calculados fueron alrededor de 18.93 cm, respetando las derivas máximas menores al 1% de la altura de entrepiso. Los elementos estructurales calculados como las columnas tienen una sección de 40cm x 40cm en los pisos superiores y 50cm x 50cm en los cuatro pisos inferiores; las vigas son de sección 35cm x 40cm. Los muros de carga tienen espesor de 40cm. Se cumplieron con las recomendaciones de aceros mínimos y máximos permitidos. El volumen de concreto calculado fue de 1697 m<sup>3</sup> y el peso del acero de refuerzo oscila en las 205 tonf.
2. Se diseñaron las unidades de aislamiento o Rubber Bearings de forma manual, se fijó un periodo objetivo del orden de 3 segundos y el amortiguamiento objetivo del 15%. Los cálculos realizados de forma manual, arrojaron que el periodo alcanzado se encuentra dentro de los valores de 2.834 segundos y 3.564 segundos para condiciones mínimas y máximas de funcionamiento. En este mismo orden de ideas, el amortiguamiento alcanzado fue de 13.792% y 16.690% siguiendo las mismas recomendaciones del fabricante de las unidades de aislamiento.

3. Los aisladores utilizados fueron **18 unidades NRB del tipo NS080N3**, y **24 unidades LRB del tipo LH060G4B**. en total son 42 unidades que se encuentran ubicadas cada una en las intersecciones de los ejes estructurales.
4. Para la superestructura de la edificación aislada luego de realizar el análisis y diseño de los elementos estructurales, incluyendo la capa de aislamiento, se calcularon los siguientes parámetros principales: el periodo de la edificación es de 3.02 segundos; el desplazamiento en la dirección de x es de 0.1903 metros, mientras que para la dirección y es de 0.1448 metros. Los elementos estructurales calculados como las columnas tienen una sección de 35cm x 35cm, por su parte las vigas son de sección 30cm x 30cm. Los muros de carga tienen espesor de 40cm. Se cumplieron con las recomendaciones de aceros mínimos y máximos permitidos. El volumen de concreto calculado fue de 1204 m<sup>3</sup> y el peso del acero de refuerzo oscila en las 178.8 tonf.
5. Acorde a precios actualizados al 2021 para la construcción en Colombia, se puede encontrar análisis de precios unitarios en la revista Construdata con aproximaciones de precios del concreto alrededor de COP 522.475/m<sup>3</sup>, y el precio de acero de refuerzo COP 5.200.000/Tonf. También se encuentran cotizaciones en el mercado de unidades de aislamiento por valor de COP USD 5.000/unidad. El costo aproximado de la estructura de la edificación convencional oscila en COP 2.210.491.783 (USD 585.951,88). Por otra parte, la edificación aislada, incluyendo el sistema de aislamiento tiene un costo aproximado de COP 2.820.645.427 (USD 747.689,96). La edificación de base aislada tiene un costo directo del 127.6% del costo directo de la edificación de base fija.
6. Dentro de las ventajas de este sistema se evidencia la reducción de los efectos de la torsión, así mismo la protección a la estructura durante los eventos sísmicos y la facilidad de inspección y reparación de los aisladores de ser necesario. Puede obtenerse un mejor rendimiento en el proceso constructivo

debido a menores secciones de elementos estructurales. La vida útil de los aisladores se proyecta en más de 60 años de acuerdo a las fichas técnicas del fabricante de los aisladores.

7. Como desventajas de la aplicación de este sistema, es estrictamente necesario que el constructor ejecute los diseños propuestos con todo el nivel de detalle necesario y no se sugieren cambios a lo largo del proceso constructivo. Así mismo, para los países suramericanos la adquisición de los elementos de aislamiento requiere procesos de importación que elevan su coste y su adquisición no es sencilla. Se deberá contar con personal técnico calificado para la realización de las labores de revisión periódicas. Se debe proyectar además las conexiones de redes internas con juntas flexibles que permitan el desplazamiento de la edificación en su base sin causar roturas, además de proyección de conexiones de perimetrales personalizadas y proyección de un sistema de protección al fuego del sótano, ya que es importante proteger los aisladores ante el fuego.

## CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis no lineal del modelo de la edificación de base fija y asilada, con el objetivo de corroborar la habitabilidad de la edificación de estudio (IMMEDIATE OCCUPANCY) al utilizar aisladores de base.

Aplicar esta metodología de diseño e implementar dicha tecnología en edificaciones de uso indispensable (grupo IV NSR-10) como hospitales y centros de salud, aeropuertos y sistemas masivos de transporte, edificaciones designadas como refugios, centrales de operación y control de línea de servicios públicos, aporta grandes beneficios para la región y el país, ya que se salvaguarda las vidas humanas y la inversión de dichas edificaciones que son indispensables para la atención a la comunidad en caso de eventos sísmicos importantes. Se considera mayor inversión, pero así mismo se garantiza la continuidad de prestación de servicios a la comunidad.

De acuerdo a las recomendaciones del fabricante de los aisladores, en este caso en particular Bridgestone, recomienda dos tipos de revisiones de los elementos de aislación:

- Revisión general por parte de ingeniero especialista, cada 10 años aproximadamente, para evaluar estado general del sistema de aislación.
- Revisión por evento sísmico: Deberá realizarse después de eventos sísmicos importantes y se debe de verificar estado general del sistema. De ser necesario se deberá reemplazar el aislador.

Se reconocen varias edificaciones a nivel latinoamericano que han aplicado dicha tecnología con excelentes resultados, lo cual conlleva a demostrar que es viable su aplicabilidad en la región.

## CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

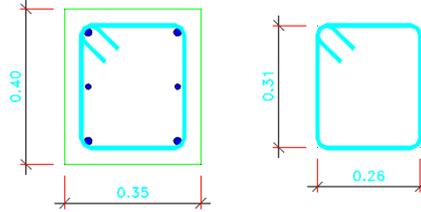
- Aguiar Falconí, R., Almazán, J. L., Dechent, P., & Suárez, V. (2016). *Aisladores de base elastoméricos y FPS*. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las fuerzas armadas ESPE.
- American Institute of Civil Engineers - Structural Engineering Institute. (2006). *Minimum Design Loads for Building and Other Structures - ASCE/SEI 7-05*. Reston, VA.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR 10*. Bogotá, D.C.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2016). *Introducción al Uso de Aisladores y Disipadores en Estructuras*. Caracas: CAF - Banco de Desarrollo de América Latina.
- Bridgestone Corporation. (Junio de 2017). Seismic isolation product line-up. Tokio, Japón.
- Cheng, F. Y., Jiang, H., & Lou, K. (2008). *Smart Structures Innovative systems for seismic response control*. CRC Press.
- Dynamic Isolation Systems, Inc. (2007). *Aislamiento sísmico para edificaciones y puentes*. McCarran, Nevada, USA.
- Federal Emergency Management Agency. (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings - Provisions and Commentary*. Washington, D.C.: National Institute of Buildings Sciences.
- Inaudi, J., Lopez Almansa, F., Rodellar, J., & Kelly, J. (1992). Control Activo de Estructuras con aislamiento de Base. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. vol. 8, 177-190.
- Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. A. (2011). *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and vibration Isolation*. Wiley.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures from theory to practice*. Wiley.
- Piscal, C. M. (2018). *New Design Considerations for Seismic Isolated Buildings in Colombia*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Piscal, C. M., & López Almansa, F. (2016). Cambios Recientes en la Filosofía de Diseño de Edificaciones Aisladas de Acuerdo a ASCE 7. Aplicabilidad a Colombia. *IX Congreso de Ingeniería Sísmica*, 10.
- Piscal, C. M., & López Almansa, F. (2016). Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*.
- Piscal, C. M., & López Almansa, F. (2018). Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia. *Revista DYNA*, 10.
- Piscal, C. M., & López Almansa, F. (2019). Comparación de Las Dos Metodologías de Análisis y Diseño más Recientes de ASCE 7, Para el Análisis de su Posible Empleo en Edificaciones Con Aislamiento Sísmico de Base en Colombia. *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, 14.
- Reyes, L. E. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogotá, D.C.: Universidad de Los Andes.

Trevor E. Kelly. (2001). *Base Isolation of Structures*. Wellington, N.Z.: Holmes Consulting Group Ltd.

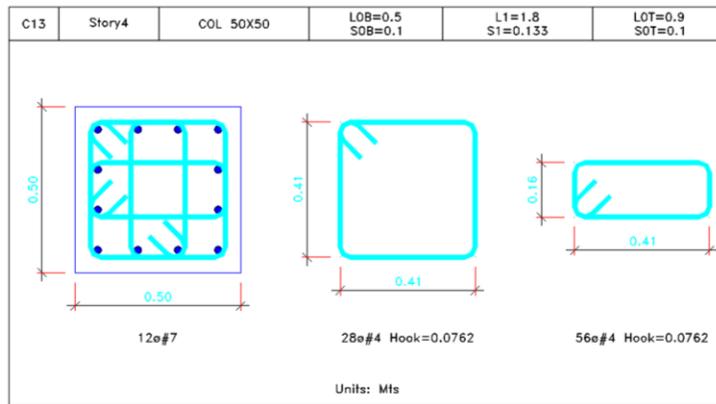
## APÉNDICE

- **Secciones elementos estructurales edificación base fija**

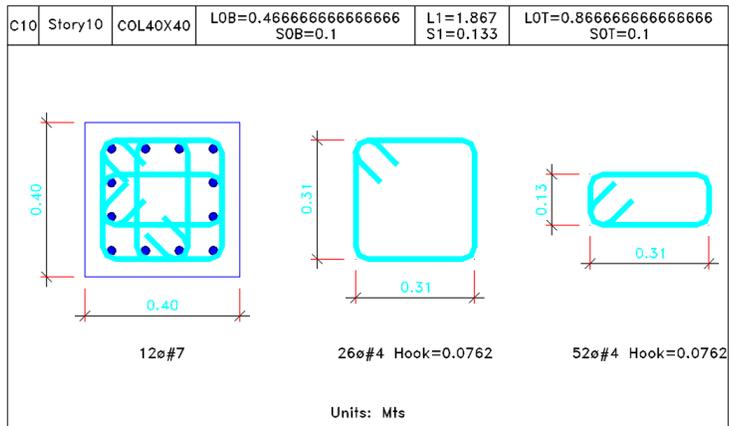
Vigas:



Columnas pisos 1, 2, 3 y 4:

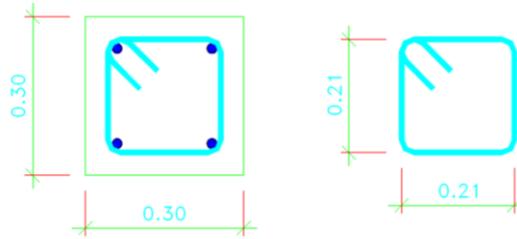


Columnas pisos 5, 6, 7, 8, 9 y 10:



- **Secciones elementos estructurales edificación base aislada**

Vigas:



Columnas (todos los pisos):

C4	Story8	COL35X35	LOB=0 SOB=0.076	L1=3.2 S1=0.076	L0T=0 S0T=0.076
		12ø#4	43ø#3 Hook=0.075	86ø#3 Hook=0.075	
Units: Mts					