



**INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO SOBRE LOS COSTOS DE LOS
MATERIALES PREDOMINANTES DE CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO
APORTICADO DE CONCRETO REFORZADO DE 8 NIVELES DISEÑADO CON
AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO, SEGÚN EL
FEMA P-1050 DE 2.015, EN LA CIUDAD DE CALI- COLOMBIA**

TRABAJO DE GRADO

Presentado por

FREDDY LEONARDO OVALLE BUENO

Presentado como requisito parcial para optar por el título de

MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C., Colombia

(Mayo de 2023)

**INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO SOBRE LOS COSTOS DE LOS
MATERIALES PREDOMINANTES DE CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO
APORTICADO DE CONCRETO REFORZADO DE 8 NIVELES DISEÑADO CON
AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO, SEGÚN EL
FEMA P-1050 DE 2.015, EN LA CIUDAD DE CALI- COLOMBIA**

FREDDY LEONARDO OVALLE BUENO

APROBADO:

ING. JESÚS DANIEL VILLALBA MORALES

Ph.D., M.Sc. Eng.

Tutor

ING. NELSON ANDRÉS ORTIZ CANO

Ph.D., M.Sc. Eng.

Co-Tutor

~~Nombres del primer jurado~~

~~Nombres del segundo jurado~~

~~Bogotá D.C. DÍA de MES de AÑO~~

NOTA DE ADVERTENCIA

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, sólo velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo a la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe”. (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

AGRADECIMIENTOS

Ante todo quiero agradecer a mi familia por su apoyo y comprensión a lo largo de toda la vida y, en particular, durante la ejecución del presente trabajo de grado. Igualmente, quisiera agradecer a los profesores Jesús y Nelson por su acompañamiento y asesoría para el desarrollo de esta tesis. Sus revisiones, consejos y acompañamiento permitieron que este trabajo fuera adquiriendo forma.

Así mismo, quisiera agradecer en general a las personas que me han apoyado para alcanzar este sueño de formarme en la ingeniería estructural. La profesora Silvia Caro, la ingeniera Olga Lucia Villamil y demás integrantes del equipo de ingeniería del IDU que compartieron conmigo durante todo lo que duró este estudio. Y por último, también a mis amigos que me han brindado su apoyo y cariño desde de la infancia. Todo ha sido determinante para que pudiera sortear los diversos obstáculos de la vida y los que enfrenté en el desarrollo de este trabajo.

Mil gracias a todos.

DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional y su comprensión durante las adversidades.
También por los bellos momentos compartidos.

Tabla de contenido

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Planteamiento del tema.....	3
1.2	Justificación del proyecto.....	6
1.3	Objetivos	10
1.3.1	Objetivo General.....	10
1.3.2	Objetivos específicos.....	10
1.4	Alcance y limitaciones	11
Capítulo 2	ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	13
2.1	Desempeño de los aisladores según el tipo de suelo.....	13
2.1.1	Estudios que muestran la inviabilidad de la solución del aislamiento sísmico en suelos blandos	13
2.1.2	Estudios que muestran la viabilidad del aislamiento sísmico en suelos blandos	15
2.1.3	Discusión sobre la viabilidad de la implementación del aislamiento sísmico en suelos blandos	16
2.2	Costos iniciales de las construcciones con aislamiento sísmico.....	17
2.2.1	Discusión sobre los costos de una edificación con aislamiento sísmico frente a una convencional	18
Capítulo 3	MARCO TEÓRICO.....	21
3.1	Generalidades de los aisladores	21
3.2	Diseño sismo resistente desde el punto de vista del balance de energía.....	23
3.3	Condiciones para el uso del aislamiento sísmico y sus limitaciones.....	24
3.4	Tipos de aisladores sísmicos	24
3.4.1	Relación constitutiva de los apoyos FSB (Friction Sliding Bearings) ó deslizadores (SLD-Sliders)	25
3.4.2	Relación constitutiva de los apoyos LDRB (Low Damping Rubber Bearings)	26
3.4.3	Relación constitutiva de los apoyos LRB (Lead Rubber Bearings).....	27
3.5	Aspectos dinámicos de las estructuras aisladas	29
3.5.1	Planteamiento de las ecuaciones dinámicas (teoría lineal)	29
3.5.2	Deducción de las propiedades dinámicas de una estructura con aislamiento en su base a partir de un análisis modal (teoría lineal).....	30
3.6	Reducción de las fuerzas inerciales en una estructura SDOF con aislamiento sísmico LRB.....	33
3.7	Desplazamientos de una estructura SDOF con aislamiento sísmico LRB.....	34

3.8	Diseño de estructuras con aislamiento según FEMA P-1050 de 2015	34
3.8.1	Diseño de los aisladores (área efectiva, capacidad de carga, control de las deformaciones y verificación del pandeo)	37
3.9	Ítems de costos de las estructuras con aislamiento sísmico	39
3.10	Efectos del suelo sobre la señal sísmica	40
3.11	Microzonificación sísmica de Santiago de Cali	41
Capítulo 4	METODOLOGÍA	45
Capítulo 5	DESARROLLO	51
5.1	Proyecto de investigación.....	51
5.1.1	Generalidades	51
5.1.2	Normativa	52
5.1.3	Descripción general del proyecto estructural.....	53
5.2	Edificaciones convencionales.....	54
5.2.1	Descripción estructural de las edificaciones	54
5.2.2	Elaboración del modelo de elementos finitos de las edificaciones convencionales.....	55
5.2.3	Análisis sísmico	57
5.2.4	Cimentación.....	57
5.3	Edificaciones con aislamiento sísmico de base	57
5.3.1	Descripción estructural de las edificaciones	57
5.3.2	Elaboración del modelo de elementos finitos de las edificaciones con aislamiento sísmico de base	59
5.3.3	Análisis sísmico	61
5.3.4	Cimentación.....	62
5.3.5	Conformación de los sistemas de aislamiento para cada edificación según el tipo de suelo	62
Capítulo 6	RESULTADOS Y ANÁLISIS	68
6.1	Comportamiento estructural	69
6.1.1	Flexibilización de la superestructura.....	69
6.1.2	Desplazamiento de las estructuras y los aisladores.....	71
6.1.3	Derivas en cada nivel del edificio	73
6.1.4	Análisis Modal: verificación del comportamiento de cuerpo rígido	75
6.1.5	Excentricidad: verificación del comportamiento de cuerpo rígido	79
6.2	Solicitaciones sísmicas.....	80
6.2.1	Cortantes basales y de piso: reducción de las fuerzas sísmicas	80
6.2.2	Momentos de volcamiento: tensiones sobre los aisladores	82

6.2.3	Cortantes inelásticos de diseño por piso: disminución del daño de la superestructura	84
6.3	Comportamiento de los sistemas de aislamiento sísmico: control de los desplazamientos	86
6.4	Cantidades de materiales de construcción	87
6.4.1	Superestructura	87
6.4.2	Resumen de las variaciones porcentuales de materiales	89
6.4.3	Subestructura	90
6.4.4	Sistema de aislamiento sísmico	92
6.5	Costos de los materiales de construcción.....	92
6.5.1	Superestructura	93
6.5.2	Subestructura	95
6.5.3	Sistema de aislamiento sísmico	96
6.5.4	Síntesis de los costos de cada edificación	97
Capítulo 7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100

Lista de figuras

Figura 1: Comparación de la reducción de la aceleración en estructuras de diferente altura con aislamiento. Estructura de baja y mediana altura (a) y Estructura de gran altura (b).	4
Figura 2: Forma espectral de las aceleraciones según el tipo de suelo.....	5
Figura 3: Influencia de la forma espectral sobre la eficiencia de los aisladores sísmicos. Suelo Firme.....	5
Figura 4: Influencia de la forma espectral sobre la eficiencia de los aisladores sísmicos. Suelo Blando.....	5
Figura 5: Objetivos de desempeño.	9
Figura 6: Objetivos de desempeño y capacidad y demanda de la estructura.	9
Figura 7: Esquemización de las características del aislamiento sísmico por medio de un espectro de respuesta de aceleraciones y desplazamientos (ADRS)	21
Figura 8: Esquema del comportamiento de una construcción MDF convencional y con aislamiento sísmico en la base en términos de desplazamientos.....	22
Figura 9: Tipos de Aisladores: apoyos planos de fricción (FSB) (a) y apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB) (b).	25
Figura 10: Comportamiento constitutivo de los deslizadores planos de fricción.....	26
Figura 11: Comportamiento constitutivo de los apoyos LDRB.	27
Figura 12: Curvas fuerza de corte vs. deformación apoyos LRB (a) Modelo bi-lineal y lineal (b).....	28
Figura 13: Análisis dinámico de una estructura SDOF con aislamiento en su base mediante apoyos LRB.	30
Figura 14: Comparación de la aceleración absoluta de una estructura convencional y con aislamiento (a).Comparación de las fuerzas sísmicas de una estructura convencional y con aislamiento (b).	33
Figura 15: Comparación de los desplazamientos de la base de una construcción SDOF (a) y de los desplazamientos relativos de la cubierta (b) para estructuras con aislamiento sísmico y sin aislamiento.	34
Figura 16: Área efectiva de los aisladores.....	37
Figura 17: Fuentes sismogénicas de Santiago de Cali.....	41
Figura 18: Microzonificación sísmica de Santiago de Cali.	42
Figura 19: Diagrama de flujo del procedimiento para el diseño del sistema de aislamiento sísmico.....	50
Figura 20: Espectros de derivas para las edificaciones convencionales.....	52
Figura 21: Espectros de aceleraciones para las edificaciones con aislamiento sísmico	52
Figura 22: Planta estructural original de la investigación fuente (a) y propuesta desarrollada para la presente investigación (b).	53
Figura 23: Disposición de las columnas y vigas en el sistema estructural de los edificios convencionales.....	54
Figura 24: Vista del modelo de elementos finitos de la edificación de sistema estructural PRM convencional.	55
Figura 25: Espectros de derivas para las edificaciones convencionales.....	57
Figura 26: Disposición de las columnas y vigas en el sistema estructural de los edificios aislados de deriva 0,3%.	58

Figura 27: Disposición de las columnas y vigas en el sistema estructural de los edificios aislados de deriva 0,4%. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).....	59
Figura 28: Vista del modelo de elementos finitos de la edificación de sistema estructural PRM y con aislamiento sísmico en la base.....	60
Figura 29: Espectros de aceleraciones para las edificaciones con aislamiento sísmico.	61
Figura 30: Espectros de derivas para las edificaciones con aislamiento sísmico.	62
Figura 31: Plantas del sistema de aislamiento de las diferentes edificaciones en los distintos tipos de suelo.	63
Figura 32: Aceleraciones (a) y desplazamientos (b) espectrales para las diferentes estructuras. Suelo firme.	70
Figura 33: Aceleraciones (a) y desplazamientos (b) espectrales para las diferentes estructuras. Suelo intermedio.....	70
Figura 34: Aceleraciones (a) y desplazamientos (b) espectrales para las diferentes estructuras. Suelo blando.	70
Figura 35: Desplazamiento máximo en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección X.	72
Figura 36: Desplazamiento máximo en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección Y.	72
Figura 37: Derivas en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección X. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).....	74
Figura 38: Derivas en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección Y. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).....	75
Figura 39: Primeros 3 modos de vibración de la edificación convencional. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).	76
Figura 40: Primeros modos de vibración de la edificación con aislamiento sísmico. Uy (a), Ux (b) y Rz. (c).....	76
Figura 41: Porcentaje de masa participativa en cada modo para las estructuras en suelo firme. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).	77
Figura 42: Porcentaje de masa participativa en cada modo para las estructuras en suelo intermedio. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).	78
Figura 43: Porcentaje de masa participativa en cada modo para las estructuras en suelo blando. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).....	78
Figura 44: Planta estructural básica.....	79
Figura 45: Ordenada espectral para cada estructura según el tipo de suelo. Dirección X....	81
Figura 46: Cortante basal para cada estructura según el tipo de suelo. Dirección X (a). Dirección Y (b).....	81
Figura 47: Cortantes sísmicos elásticos de diseño. Dirección X.....	82
Figura 48: Cortantes sísmicos elásticos de diseño. Dirección Y.....	82
Figura 49: Momentos de volteo. Dirección X (My).....	83
Figura 50: Momentos de volteo. Dirección Y (Mx).....	83
Figura 51: Cortantes sísmicos inelásticos de diseño. Dirección X.....	85
Figura 52: Cortantes sísmicos inelásticos de diseño. Dirección Y.....	85
Figura 53: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para los diferentes elementos estructurales de cada edificio analizado en suelo firme (B).	88
Figura 54: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para los diferentes elementos estructurales de cada edificio analizado en suelo intermedio.....	88

Figura 55: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para los diferentes elementos estructurales de cada edificio analizado en suelo blando.	89
Figura 56: Modelo de elementos finitos de la cimentación. Incluye pedestal, dado y pilotes.	90
Figura 57: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para la cimentación de los edificios en suelo firme (B).....	91
Figura 58: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para la cimentación de los edificios en suelo intermedio (D).....	91
Figura 59: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para la cimentación de los edificios en suelo blando (E).....	91
Figura 60: Costos de los insumos de obra para cada superestructura analizada. Suelo Firme (a), Suelo Intermedio (b) y Suelo Blando (c).	93
Figura 61: Comparación del costo del pilotaje de los distintos edificios analizados. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).....	96
Figura 62: Comparación del costo de los diferentes SAS según el tipo de suelo.....	97
Figura 63: Desagregación de los costos de cada proyecto. Suelo firme (a), suelo intermedio (d) y suelo blando (c).....	99

Lista de tablas

Tabla 1: Cálculo de las deformaciones de los aisladores.	38
Tabla 2: Control de las deformaciones de los aisladores.....	38
Tabla 3: Características de las edificaciones diseñadas.....	45
Tabla 4: Nomenclatura para el procedimiento de diseño del sistema de aislamiento sísmico	49
Tabla 5: Ecuaciones del procedimiento para el diseño del sistema de aislamiento sísmico	49
Tabla 6: Parámetros que definen los espectros de aceleraciones de las microzonas seleccionadas.	51
Tabla 7: Dimensiones de los elementos estructurales de los edificios convencionales	54
Tabla 8: Dimensiones generales de los pilotes que conforman la cimentación de los edificios convencional con sistema de PRM y deriva máxima permisible de 1,0%.	55
Tabla 9: Combinaciones de carga para la verificación de la deriva	56
Tabla 10: Combinaciones de carga para el diseño de los elementos estructurales.....	56
Tabla 11: Combinaciones de carga para la verificación de la capacidad portante de la cimentación.....	56
Tabla 12: Dimensiones generales de los pilotes que conforman la cimentación de los edificios convencionales.....	57
Tabla 13: Dimensiones de los elementos estructurales de los edificios con aislamiento sísmico y deriva máxima de 0,3%.	58
Tabla 14: Dimensiones de los elementos estructurales de los edificios con aislamiento sísmico y deriva máxima de 0,4%.	59
Tabla 15: Dimensiones generales de los pilotes que conforman la cimentación de los edificios con aislamiento	62
Tabla 16: Resumen de los tipos de aisladores empleados en los diferentes edificios.	64
Tabla 17: Resumen de las características principales de los dispositivos LRB empleados en los diferentes edificios	65
Tabla 18: Resumen de las características principales de los dispositivos LDRB empleados en los diferentes edificios	65
Tabla 19: Resumen de las características principales de los dispositivos SLD empleados en los diferentes edificios.	65
Tabla 20: Períodos objetivo de las estructuras con aislamiento sísmico.	66
Tabla 21: Amortiguamientos objetivo de las estructuras con aislamiento sísmico.	66
Tabla 22: Convención de abreviaturas y colores para todas las gráficas del capítulo 6.....	68
Tabla 23: Desplazamientos del nivel base de las estructuras con aislamiento en cada tipo de suelo.....	73
Tabla 24: Excentricidades en planta de la configuración estructural de las edificaciones aisladas.....	79
Tabla 25: Variación de las ordenadas espectrales y del cortante basal de las edificaciones en dirección X. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).	81
Tabla 26: Parámetros principales del comportamiento de los aisladores para los edificios con deriva 0,3%.	86
Tabla 27: Parámetros principales del comportamiento de los aisladores para los edificios con deriva 0,4%.	86

Tabla 28: Variación porcentual de las cantidades de materiales de las superestructuras de los edificios con aislamiento frente a los convencionales. Concreto (a), Acero (b)	89
Tabla 29: Variación porcentual de las cantidades de materiales de los edificios aislados frente a los convencionales. Subestructura.	92
Tabla 30: Características generales de los sistemas de aislamiento sísmico para cada tipo de suelo.....	92
Tabla 31: Variación porcentual del costo de las superestructuras de los edificios aislados frente a los convencionales según el tipo de suelo.	93
Tabla 32: Costo de los dispositivos de aislamiento sísmico.....	96
Tabla 33: Costos implementación SAS en suelo firme (B).....	97
Tabla 34: Costos implementación SAS en suelo intermedio (D).....	97
Tabla 35: Costos implementación SAS en suelo blando (E).....	97
Tabla 36: Comparación de los costos de cada parte de la estructura con aislamiento sísmico frente a la convencional, según el tipo de suelo.	99

Lista de abreviaturas y símbolos

A: Área del aislador
Ar: Área efectiva del aislador producto de las deformaciones por corte
BF: Base Fija. Designa de manera abreviada la edificación de referencia de base fija (edificio de pórtico resistente a momentos de deriva 1%)
Bm: Factor de amortiguamiento para las estructuras aisladas por el cual se debe reducir el espectro a partir de T_m de acuerdo con el β_m impuesto por el sistema de aislamiento
 $C_{s/b}$: Coeficiente de amortiguamiento viscoso
Db: Diámetro externo del aislador
Di: Diámetro interno del aislador LRB (se debe a la presencia del núcleo de plomo)
DBE: Desing-Basis Earthquake ó Sismo de Diseño ($T_r=475$ años)
 D_M : Desplazamiento máximo del centro de masa de la edificación aislada bajo los efectos del MCE
 D_y : Desplazamiento de fluencia de un aislador LRB
E: Energía
 E_h : Energía disipada por mecanismos de histéresis
 E_k : Energía cinética
 E_p : Energía potencial
 E_v : Energía disipada por el mecanismo de amortiguamiento viscoso
 $f_{1/2}$: factores que se emplean en el cálculo de las deformaciones por corte y rotacionales, respectivamente
G: Módulo de corte del cacho de los dispositivos de aislamiento sísmico elastoméricos
h: Altura
HDRB: High Damping Rubber Bearings ó Apoyos de caucho de alto amortiguamiento
I: Factor de importancia de la construcción analizada
ISE: Interacción suelo estructura
k: relación del módulo volumétrico del caucho de los aisladores elastoméricos
 k_1 : Rigidez inicial de un aislador LRB
 k_2 : Rigidez post-elástica de un aislador LRB
 k_{ef} : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento sísmico o de un dispositivo del sistema
 k_h : Rigidez horizontal del sistema de aislamiento sísmico o de un dispositivo del sistema
 k_M : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento sísmico o de un dispositivo del sistema
LDRB: Low Damping Rubber Bearings ó Apoyos de caucho de bajo amortiguamiento
 $k_{s/b}$: Rigidez de la superestructura ó del sistema de aislamiento sísmico, respectivamente
LRB: Lead Rubber Bearings ó Apoyos de caucho con núcleo de plomo
 m_b : Masa del nivel base en una estructura con aislamiento sísmico
 m_s : Masa de la superestructura de un edificio con aislamiento sísmico
MCE: Maximum Considered Earthquake ó Sismo Máximo Considerado ($T_r=2.475$ años)
MDOF: Multi-Degree of Freedom. Hace referencia a un sistema dinámico de varios grados de libertad
 P_{crit} : Carga crítica de pandeo
 P'_{crit} : Carga crítica de pandeo reducida por la relación del área efectiva y el área total
PRM: Pórtico resistente a momentos
 P_u : Solicitación máxima axial sobre un dispositivo de aislamiento

Q_d : Resistencia característica de un aislador LRB. Resistencia del aislador sin padecer ninguna deformación; ésta es función de las propiedades mecánicas y geométricas del núcleo de plomo

R : Coeficiente de Capacidad de disipación de energía

S : Factor de forma de un dispositivo de aislamiento

SAS.: Sistemas de Aislamiento Sísmico

SDOF: Single-Degree of Freedom. Hace referencia a un Sistema dinámico de 1 solo grado de libertad

SLD: Sliders o deslizadores

T_m : Período de la estructura aislada

t_r : Altura de una capa de caucho que conforma un dispositivo elastomérico

T_r : Altura total del caucho en un dispositivo de aislamiento sísmico elastomérico

u : Desplazamiento de un dispositivo de aislamiento

$U_{s/b/g}$: Desplazamiento de la superestructura, nivel base ó del terreno, respectivamente

$\dot{U}_{s/b/g}$: Velocidad de la superestructura, nivel base ó del terreno, respectivamente

$\ddot{U}_{s/b/g}$: Aceleración de la superestructura, nivel base ó del terreno, respectivamente

V_{st} : Cortante basal correspondiente al diseño de la superestructuras

V_b : Cortante basal correspondiente al diseño de la infraestructura y sistema de aislamiento

V_x/y : Cortante basal en la dirección x ó y , según se indique

W : peso sísmico de la estructura

β_M : Relación de amortiguamiento viscoso equivalente del sistema de aislamiento sísmico o de un dispositivo del sistema (LRB ó SLD)

Δ : Deriva relativa de piso

γ_c/r : deformación de los aisladores de corte y rotacionales, respectivamente, bajo cargas verticales

ξ : Relación de amortiguamiento con respecto al crítico

φ^i : Vector propio

μ : Coeficiente de fricción

Γ : Factores de participación modal

ω : Valor propio

RESUMEN

Los sistemas de aislamiento sísmico (SAS) son dispositivos cuyo propósito principal consiste en dotar a la edificación con aislamiento sísmico de base de un desempeño superior al de las construcciones convencionales. Para este fin, los SAS principalmente **1)** reducen las solicitaciones sísmicas sobre la estructura y **2)** controlan las deformaciones de la superestructura para que esta no experimente daños.

No obstante, el desempeño de los SAS puede verse afectado por condiciones locales como el tipo de suelo, el cual constituye una de las principales restricciones a su uso. De hecho, varios autores señalan que los SAS no son eficientes bajo los efectos de un suelo blando toda vez que: **1)** los desplazamientos a que estarían sometidas estas construcciones aisladas serían excesivos y **2)** podrían presentarse fenómenos de resonancia entre la señal sísmica característica de este perfil de suelo y la construcción con aislamiento sísmico de base. Esto último incrementaría las solicitaciones inerciales sobre la construcción en lugar de disminuirlas, por lo cual los SAS no cumplirían su propósito.

En este orden de ideas, esta investigación compara el costo de un total de 9 estructuras que fueron analizadas y diseñadas en 3 diferentes condiciones de estrato: firme, intermedio y blando, con y sin aislamiento sísmico y bajo tres límites de deriva (0.3 y 0.4% para las estructuras aisladas, y 1% para el edificio de base fija). Estos diseños reúnen las condiciones establecidas en el reglamento NSR-10 y el FEMA P-1050 de 2015; este último sólo aplica para el diseño de las edificaciones aisladas. Las edificaciones se localizan en la ciudad de Cali, y para definir los efectos sísmicos según las condiciones de estrato se recurre al estudio de microzonificación sísmica. Los costos totales consideran algunos de los costos directos de construcción (iniciales de la construcción), en particular se consideran 3 ítems: el costo de concreto, el acero figurado y el precio unitario de los aisladores puestos en obra. En este sentido, se asume la premisa que estos costos constituyen la mayor parte de los costos directos de la estructura (sin incluir acabados u otros elementos) y que sufren cambios significativos durante el diseño de cada una de las 9 soluciones estructurales. Se tiene, por tanto, una aproximación razonable de los beneficios/limitaciones económicas de un edificio aislado comparado con un edificio tradicional (de base fija). Los resultados muestran que el sistema de aislamiento sísmico reduce su eficiencia a medida que se flexibiliza el suelo, en cuanto a la reducción de las solicitaciones sísmicas; no obstante, continúan controlando las deformaciones de la superestructura. La cantidad de materiales se reduce para suelos firme e intermedio, pero aumenta levemente para suelo blando. Sin embargo, debido al elevado costo de los aisladores, el costo total del proyecto aumenta considerablemente para todos los tipos de suelo.

Palabras clave: Aislamiento Sísmico, Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo -LRB-, Efectos de Sitio, Concreto Reforzado.

ABSTRACT

Seismic isolation systems (SAS) are devices whose main purpose is to provide the isolated building with a superior performance to that of conventional constructions. For this purpose, the SAS **1)** reduce the seismic forces on the structure and **2)** control the deformations of the superstructure so that it does not experience damage.

However, the performance of the SAS can be affected by local conditions such as the type of soil, which constitutes one of the main restrictions on its use. In fact, several authors point out that SAS are not efficient under the effects of soft soil since: **1)** the displacements to which these isolated constructions would be subjected would be excessive and **2)** resonance phenomena could occur between the characteristic seismic signal of this soil profile and the construction with basic seismic isolation. The latter would increase the inertial demands on the construction instead of decreasing them; therefore, the SAS would not fulfill its purpose.

In this order of ideas, this research compares the cost of a total of 9 structures that were analyzed and designed in 3 different stratum conditions: firm, intermediate and soft, with and without seismic isolation and under three drift limits (0.3 and 0.4% for isolated structures and 1% for the fixed base building). These designs meet the conditions established in regulation NSR-10 and FEMA P-1050 of 2015; the latter only applies to the design of isolated buildings. The buildings are located in the city of Cali, and to define the seismic effects according to the stratum conditions, the seismic microzoning study is used. The total costs consider some of the direct construction costs (initial construction), in particular 3 items are considered: the cost of concrete, figured steel and the unit price of the isolators placed on site. In this sense, it is assumed that these costs constitute the majority of the direct costs of the structure (not including finishes or other elements) and that they undergo significant changes during the design of each of the 9 structural solutions. There is, therefore, a reasonable approximation of the economic benefits/constraints of an isolated building compared to a traditional (fixed base) building. The results show that the seismic isolation system reduces its efficiency as the soil becomes more flexible, in terms of reducing seismic forces; however, they continue to control the deformations of the superstructure. The amount of materials is reduced for firm and intermediate soils, but increases slightly for soft soil. However, due to the high cost of the isolators, the total cost of the project increases considerably for all types of soil.

Keywords: Seismic Isolation, Lead Rubber Bearings -LRB-, Site Effects, Reinforced Concrete.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

El hecho de que un país con una amenaza sísmica relevante, como es el caso de Colombia, donde el 85% de la población vive en una zona de amenaza sísmica intermedia o alta (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), 2010), disponga de construcciones con un desempeño superior es fundamental para la sociedad. En efecto, la *operación inmediata de edificios indispensables y edificios de atención a la comunidad* le permite a la comunidad hacer frente a las situaciones adversas que desencadena un evento telúrico importante, contribuyendo de esta forma a que la sociedad pueda recuperar su normal funcionamiento lo antes posible (*resiliencia de la comunidad*). Así mismo, la reducción de las pérdidas económicas y muertes asociadas directamente a daños de edificios de menor importancia, o a algunas de sus partes, también disminuye la magnitud de los impactos de la catástrofe.

Es en este escenario donde los sistemas de aislamiento sísmico (SAS) cobran un significado social importante toda vez que con ellos se busca dotar a las construcciones de un desempeño superior al ofrecido por los edificios convencionales (Genatios & Lafuente, 2016). De esta manera, las edificaciones en las que se implementan estos sistemas presentan un menor nivel de daño que las estructuras convencionales homólogas cuando son expuestas a un mismo movimiento del terreno.

De otra parte, ciudades extensas y densamente pobladas comprenden varias condiciones de suelo, de relieve, etc., motivo por el cual resulta importante verificar el adecuado desempeño de los SAS en función de estas características locales. Como se señala brevemente a continuación y se explica más detalladamente Capítulo 2, condiciones como la rigidez del suelo podrían afectar su funcionamiento adecuado.

Con relación al desempeño de los SAS en función del tipo de estrato de cimentación, la literatura especializada reporta un comportamiento adecuado siempre que las mismas estén apoyadas sobre estratos firmes. Pues sólo así se consigue un desacoplamiento satisfactorio entre la superestructura y el movimiento del terreno, reduciendo las intensidades de movimiento (aceleraciones) que afectan al edificio. No obstante, en lo que concierne a su implementación en edificaciones sobre estratos blandos, no existe un consenso. De una parte, algunos autores (Chopra, 2012; R. González & Noguez, 1994; Komodromos, 2000; Tena, 1996) afirman que esta solución estructural resultaría ser más perjudicial que la solución convencional porque se presentarían problemas de resonancia entre el edificio y la señal sísmica característica de estos estratos, la cual presenta una cantidad de energía importante en el rango de períodos que comprende al de las estructuras aisladas. Por otro lado, algunos investigadores encuentran que la implementación del aislamiento bajo estas condiciones de suelo es satisfactoria (Almansa et al., 2020; Karabork et al., 2014).

Acerca de esta discrepancia de conceptos acerca del desempeño de los SAS en suelos blandos, es preciso advertir que la misma podría deberse principalmente a la diferencia de latitudes en las cuales se desarrollan estos estudios y las consiguientes diferentes rigideces

de estratos locales considerados como *suelos blandos*. Como se explica más detalladamente en el Capítulo 2, los estudios de concepto negativo se adelantan con base en el sismo de Michoacán-Guerrero de 1.985 registrado en los suelos blandos de Ciudad de México, cuyos períodos predominantes se encuentran alrededor de 2,0- y 3,0 s, comprendiendo el rango de períodos de las estructuras aisladas. De esta forma existe el riesgo de que la estructura sí entre en resonancia con la señal sísmica. Por el contrario, los estudios de concepto positivo se adelantan con base en suelos clasificados como blandos en las normas de Turquía y China, cuyos períodos dominantes son menos pronunciados (alrededor de 0,8 s y 1,2 s). Por tanto, la edificación aislada no entraría en resonancia con el sismo y los SAS podrían constituir una solución adecuada.

La discusión anterior resalta la relevancia de evaluar el desempeño del aislamiento con base en las condiciones locales de sismicidad y tipos del terreno.

En este orden de ideas, surge el interés por estudiar la respuesta de la estrategia del aislamiento sísmico considerando distintas condiciones de suelos propias del país, así como su sismicidad. Consecuentemente, se estudia las solicitaciones y la respuesta de una estructura de mediana altura, con 8 niveles sobre el terreno, regular en planta y en altura, la cual se ubica en la ciudad de Santiago de Cali con el fin de incluir las condiciones de suelo y sismicidad nacionales, así como de recrear condiciones de diseño reales. Al respecto, la ciudad de Cali se encuentra clasificada como una zona de amenaza sísmica alta de acuerdo con la NSR-10 y dispone de un Estudio y Decreto de Microzonificación Sísmica (Decreto No. 411.0.20.0158 de 2014 “Por el cual se Adopta la Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali y se Definen sus Respectivas Curvas y Parámetros de Diseño Estructural Sismo Resistente,” 2014; Departamento administrativo de gestión del medio ambiente (DAGMA); Instituto Colombiano de geología y minería (INGEOMINAS), 2005). Por tanto, se implanta esta construcción sobre tres estratos de diferente rigidez (suelos tipo B, D y E, clasificados de acuerdo con la NSR-10 como estratos de tipo firme, intermedio y blando, respectivamente) y se adelanta su análisis y diseño observando las curvas de diseño propias de cada microzona. Este estudio comprende la comparación y valoración de los respectivos diseños y resultados de los análisis de las estructuras con aislamiento, calculados con una deriva límite de 0,3% y 0,4%, frente a su correspondiente solución homóloga convencional de pórticos resistentes a momento (PRM) de deriva 1% (para un total de 9 estructuras analizadas y diseñadas).

El análisis y diseño de las edificaciones convencionales se adelanta considerando lo estipulado en la NSR-10. En el caso de las estructuras aisladas, el diseño del sistema de aislamiento observa el FEMA P-1050 de 2015 (Federal Emergency Management Agency & Building Seismic Safety Council (FEMA & BSSC), 2015) mientras que el análisis y diseño de la estructura propiamente dicha considera la NSR-10 (superestructura y fundación).

Ahora, la selección de los límites de deriva en esta investigación para las estructuras aisladas es consistente con el objetivo de desempeño de *Operación Inmediata* establecido por el FEMA P-1050 de 2015 para todas las construcciones con aislamiento sísmico bajo las solicitaciones del Sismo Considerado Máximo MCEr. Esta referencia establece que las construcciones aisladas no deben experimentar daños significativos en su estructura, en sus elementos no estructurales ni en su contenido. Esto último señala que la construcción no

debe incursionar significativamente en su rango inelástico, motivo por el cual las derivas de 0,3% y 0,4% cumplen con dicho propósito.

Al respecto, los comentarios del FEMA P-1050 precisan: “*Se esperaría que el aislamiento sísmico, diseñado de acuerdo con estas provisiones, mitigara el daño estructural y no estructural y que protegiera la edificación contra la pérdida de operación*” (FEMA & BSSC, 2015, pg. 418) .

1.1 Planteamiento del tema

Los SAS constituyen una aproximación al diseño estructural que tiene por objeto principal reducir de forma significativa las fuerzas inducidas a una construcción rígida por un sismo convencional a través del desacoplamiento de la superestructura y su fundación (Karabork et al., 2014). Al respecto, se aclara que por sismo convencional se denomina a aquellos movimientos telúricos que tienen lugar en suelos firmes o roca y, por tanto, su contenido frecuencial principal se encuentra dentro del rango de períodos bajos. En cuanto al funcionamiento de estos sistemas y el porqué de la restricción de su implementación a edificios rígidos así como a sismos convencionales que tienen lugar en estratos firmes, estos interrogantes se explican a continuación.

La capacidad de los sistemas de aislamiento para reducir las solicitaciones sísmicas depende principalmente de dos factores (Chopra, 2012): **1)** el período natural de vibración de la estructura homóloga sin aislamiento y **2)** la forma que adopta el espectro de aceleraciones de diseño. Respecto al primer factor, cuanto más rígida sea la construcción y menor sea su período, de manera tal que éste se encuentre dentro del rango de las frecuencias dominantes de un sismo convencional, tanto mayor y significativa es la disminución de la demanda sísmica. Lo anterior como consecuencia del hecho de que la flexibilización de una estructura inicialmente rígida impide que la misma vibre en resonancia con el contenido principal de la señal sísmica. Por el contrario, esta edificación de período extendido sólo es susceptible de ser excitada por ondas de menor participación y energía en la conformación de la señal, reduciendo significativamente la intensidad de movimiento que le es transmitida a la superestructura por el suelo. De esta manera, se reduce la demanda sísmica.

De otra parte, si el período de la estructura sin aislamiento es de tal magnitud que se encuentra por fuera del rango de las frecuencias dominantes de los sismos convencionales (p. ej. estructuras de gran altura), la reducción que experimenta la demanda sísmica sobre la superestructura de período extendido no es tan significativa respecto a la convencional (ver Figura 1 a y b).

La Figura 1 a y b muestra cómo el aislamiento sísmico es más eficiente en estructuras rígidas de baja y mediana altura toda vez que reduce de manera más drástica las intensidades de movimiento que afectan a la edificación. Así las cosas, la altura de las edificaciones en las cuales es eficiente implementar esta tecnología está restringida a construcciones, por lo general, de 12 pisos o menos (Komodromos, 2000).

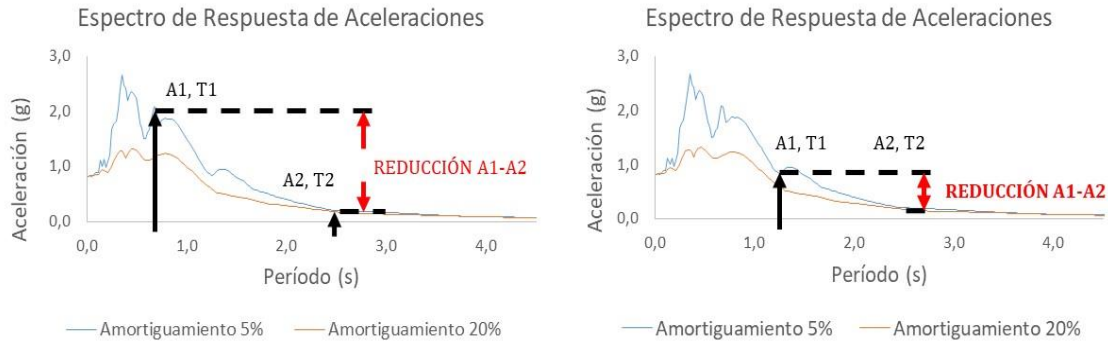


Figura 1: Comparación de la reducción de la aceleración en estructuras de diferente altura con aislamiento. Estructura de baja y mediana altura (a) y Estructura de gran altura (b).
Elaboración propia con datos proporcionados en el curso (Carrillo, 2018).

Por lo anterior, la selección de la estructura objeto de análisis de este trabajo de grado (de 8 pisos), es apropiada en el sentido de que es lo suficientemente rígida y no está sujeta a los efectos de gran altura, permitiendo analizar únicamente los efectos del tipo de suelo, los cuales se relacionan con la forma del espectro de aceleraciones, como se indica a continuación.

La influencia de la forma que adoptan los espectros de respuesta de aceleraciones también es muy relevante para la eficiencia de los aisladores. En efecto, la disminución de la aceleración que tiene lugar en una construcción con el incremento de su período de vibración sólo es posible si el comportamiento de la forma espectral es decreciente. Pues sólo así se sustenta el hecho de que la estructura de período extendido sea perturbada con una menor intensidad que la que le correspondía inicialmente cuando era de base fija y excitada por ondas de mayor participación y energía en la señal.

Acerca de la forma que adoptan los espectros de respuesta de aceleraciones y, por consiguiente, los espectros de aceleraciones de diseño, la misma está influenciada de manera muy significativa por el tipo de suelo que conforma el último trayecto del recorrido de la señal sísmica hacia la superficie (Kramer, 1996). De hecho, en el caso de suelos firmes, el contenido frecuencial de la señal correspondiente a períodos bajos se amplifica, razón por la cual sus espectros tienen un comportamiento decreciente que asocia mayores aceleraciones a este rango de períodos mientras que asocia menores valores a los períodos intermedios y largos. No obstante, en suelos blandos, el contenido frecuencial de la señal sísmica dentro del rango de períodos intermedios y/o largos se amplifica, y pasa a conformar el contenido ondulatorio principal de la señal. Esto conlleva a que los movimientos del suelo asociados a estos períodos se acentúen, lo cual modifica la forma espectral. Dicha curva ahora presenta un comportamiento creciente de las aceleraciones (ordenadas) conforme aumenta el período (abscisas) (ver Figura 2).

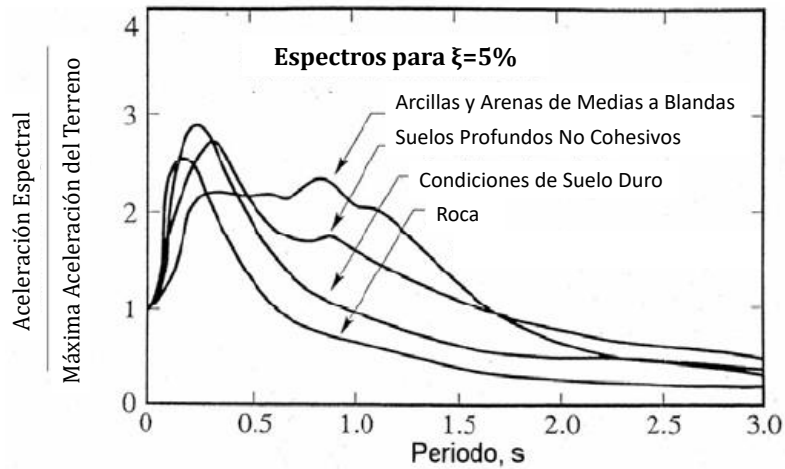


Figura 2: Forma espectral de las aceleraciones según el tipo de suelo.
(Seed et al., 1976) en (Rosales, 2001)

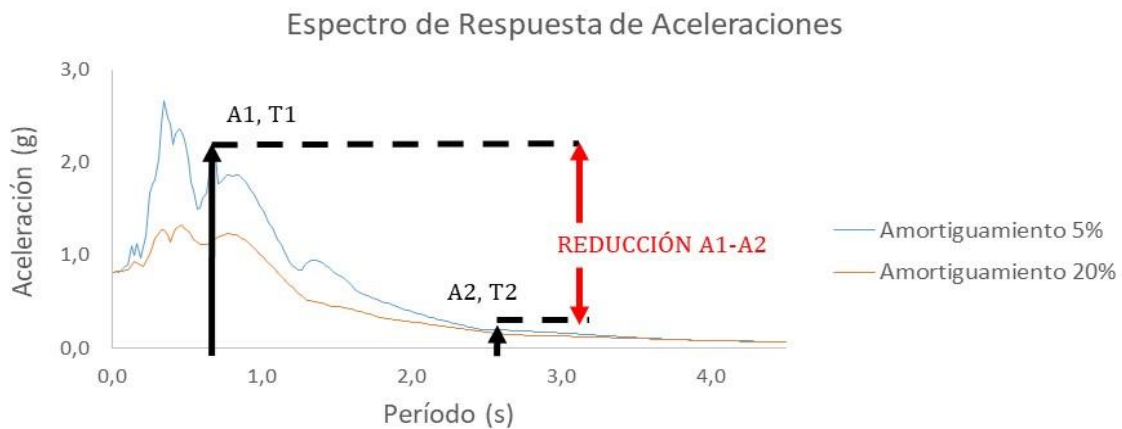


Figura 3: Influencia de la forma espectral sobre la eficiencia de los aisladores sísmicos. Suelo Firme.
Espectro de respuesta de aceleraciones para suelo firme (Kobe, Japón (16/01/1995)).
Elaboración propia con datos proporcionados en el curso (Carrillo, 2018)

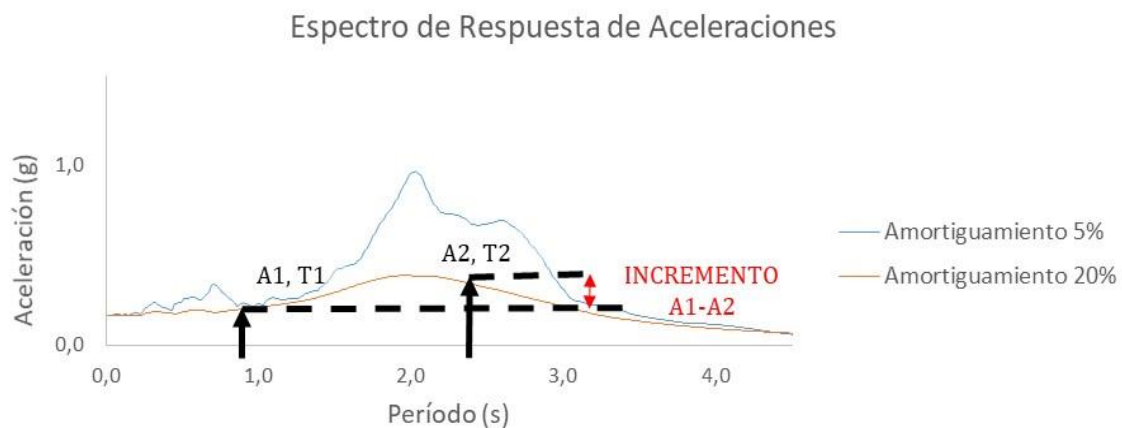


Figura 4: Influencia de la forma espectral sobre la eficiencia de los aisladores sísmicos. Suelo Blando.
Espectro de respuesta para suelo blando (Michoacán-Guerrero (19/09/1985)).
Elaboración propia con datos proporcionados en el curso (Carrillo, 2018)

En este orden de ideas, surgen dudas acerca del desempeño adecuado de las unidades de aislamiento cuando son implementadas en edificios rígidos apoyados sobre estratos blandos debido al comportamiento creciente de su espectro correspondiente. Lo anterior porque la flexibilización de la construcción incrementaría la intensidad de los movimientos sísmicos que la afectan, aumentando la demanda sísmica en lugar de reducirla. De esta forma, el empleo de estos dispositivos no cumpliría con su misión de disminuir la energía sísmica que llega al sistema de resistencia principal. En lugar de esto último, aumentaría dicha energía (ver Figura 3 y Figura 4).

De otra parte, en términos generales, se puede afirmar que la magnitud de las fuerzas inerciales está estrechamente relacionada con la robustez del diseño de una edificación, siempre que sean las fuerzas sísmicas las que controlen el diseño, como sucede en zonas donde la amenaza sísmica es relevante y cuando la estructura es de baja o mediana altura (los edificios de gran altura el diseño está controlado por las fuerzas de viento, aún en zonas de amenaza sísmica alta (Taranath, 2005), situación para la cual el aislamiento no resulta idóneo al ser un sistema concebido para la protección de la estructura frente a sismos). De esta forma, para iguales objetivos de desempeño y niveles de amenaza sísmica, la estructura será tanto más robusta en términos de secciones, propiedades de materiales y sus cantidades, así como mecanismos de ductilidad, cuanto mayor sean las solicitaciones sísmicas. Consecuentemente, la eficiencia de los dispositivos de aislamiento para reducir la demanda sísmica tiene un impacto importante en la esbeltez de la construcción y, por ende, en los costos de las cantidades de obra. Por lo anterior, en el presente trabajo los costos de los materiales de construcción constituyen una medida adecuada para evaluar el desempeño de los aisladores en cuanto a la reducción de las solicitaciones sísmicas según el tipo de suelo.

En este orden de ideas, la pregunta de investigación del presente trabajo de grado es: ¿Cómo influye el tipo de suelo en los costos de los materiales predominantes de construcción (concreto, acero y aisladores) de una edificación de pórticos resistentes a momento, de 8 pisos, de planta y alzado regular, y con aislamiento sísmico de base, localizada en una ciudad de amenaza sísmica alta, como Cali?

1.2 Justificación del proyecto

El alcance de las investigaciones acerca de los efectos del tipo de suelo sobre las construcciones con aislamiento sísmico se limita a mostrar los impactos negativos debidos a la disminución de la rigidez del suelo sobre la demanda sísmica de la superestructura y su comportamiento estructural. De esta manera, la mayoría de investigaciones consignadas en Capítulo 2 muestran los detrimentos que tienen los suelos blandos sobre algunas magnitudes tales como cortantes basales y de piso, momentos de volteo, aceleraciones en la base, desplazamientos de la base y la azotea y derivas de piso, entre otros. Como se ve, estos resultados se circunscriben únicamente a la superestructura, obviando los posibles efectos sobre otros elementos estructurales.

En este orden de ideas, el presente trabajo permite observar los efectos que tiene el tipo de suelo sobre el diseño de todos los elementos estructurales que conforman una edificación con aislamiento, a saber: superestructura, subestructura y sistema de aislamiento. Con este

propósito, se establecen las cantidades de obra necesarias para cada uno de estos componentes, lo cual permite observar dónde y cómo tienen lugar dichos impactos. Como se mencionó, los incrementos o reducciones de las solicitaciones sobre la estructura a raíz de los efectos del tipo de suelo sobre el desempeño del aislamiento, impactan la robustez de los diseños. Así, por ejemplo, el aligeramiento de la superestructura a raíz de las menores fuerzas inerciales reduce las cargas que llegan a la cimentación, lo cual permite a su vez reducir sus dimensiones (Dusi et al., 2008). Igualmente, la simulación de las condiciones geotécnicas propias de cada microzona permite incluir los efectos de la rigidez del suelo sobre el diseño de la cimentación, obteniendo resultados más esbeltos para los suelos más rígidos con mejores capacidades portantes y viceversa. Por todo lo anterior, este estudio evalúa de una manera más completa los impactos del tipo de suelo sobre las construcciones.

De otra parte, este trabajo de grado se circunscribe dentro de la necesidad de investigación que se debe de adelantar en el país sobre los sistemas de protección sísmica en general para extender su uso. Esta necesidad es planteada en la referencia (Oviedo & Duque, 2009), así: *“(...) Colombia todavía está lejos de ser considerado un país de vanguardia en el uso de sistemas de control de respuesta sísmica. Muchos promotores desconocen las técnicas, otros desconfían de sus ventajas tanto económicas como estructurales, por lo tanto, **hacen falta proyectos de investigación y aplicación donde se diseñen edificaciones con los mismos criterios sísmicos, con control de respuesta sísmica y sin él, y se haga una comparación económica y técnica que permita verificar o derrumbar estos preconceptos (...)**”* (Oviedo & Duque, 2009, p. 123).

En este sentido (Oviedo & Duque, 2009) identifican que algunas de las razones por las cuales las tecnologías de control de respuesta sísmica no se han extendido en el país son: **1)** el desconocimiento, por parte de los profesionales, de las metodologías de diseño estructural cuando se emplean estos dispositivos y **2)** el posible sobre costo inicial del proyecto. Por tanto, este estudio contribuye a entender estos dos puntos, de la siguiente manera: **1)** la circunscripción de este trabajo de grado dentro del ámbito nacional por medio de la adaptación de la normativa internacional al caso colombiano contribuye tanto a la fomentación y apropiación del conocimiento concerniente a la tecnología de aislamiento sísmico, así como a aclarar y ejemplificar la metodología de análisis y diseño. Igualmente, **2)** la determinación y comparación de los costos de los materiales de obra estructural tanto para las soluciones con aislamiento como para las convencionales, contribuyen a que los profesionales colombianos comprendan el impacto en el costo inicial del proyecto.

Otra de las razones que ameritan la ejecución de este trabajo tiene que ver con las ventajas que representa el uso mismo de los SAS en edificaciones para las comunidades expuestas a algún nivel de amenaza sísmica importante, como sucede en el territorio nacional donde más del 85% de la población vive en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta (NSR-10, 2010). Esto es así debido a que esta tecnología mejora el desempeño de las construcciones, lo cual representa una reducción de su vulnerabilidad frente a la amenaza sísmica.

Por todo lo anterior, este trabajo fomenta y promociona el uso más extenso de la tecnología de aislamiento sísmico en el país.

En efecto, las edificaciones con aislamiento sísmico expuestas a un sismo presentan una reducción tan considerable en la cantidad e intensidad de daños en comparación con las construcciones homólogas sin aislamiento que se les puede asociar objetivos de desempeño más exigentes que los tradicionales de *preservación de la vida y el patrimonio de los ciudadanos y del estado*, como la *operación inmediata*¹ (ver Figura 5 y Figura 6) (Genatios & Lafuente, 2016). Dicho objetivo de *operación inmediata* es muy significativo e indispensable para las comunidades desde el punto de vista de su *resiliencia* toda vez que la habilidad para resistir y recuperarse de un evento disruptivo como un sismo exige que las construcciones donde se prestan servicios *indispensables* operen de manera aceptable durante el evento y recuperen su normal funcionamiento en el menor tiempo posible con el fin de asistir a las comunidades en la atención de las situaciones adversas que desencadena el movimiento telúrico. En caso de que esto no ocurra, la interrupción de la prestación de servicios esenciales como salud, transporte, vías de comunicación, seguridad, centros de respuesta de emergencias, servicios públicos, entre muchos otros, tiene un impacto negativo en la forma cómo la comunidad responde y se recupera de estas situaciones adversas (Mcallister, 2013).

Aunado a lo anterior, el mejor desempeño de las edificaciones aisladas también se extiende a las construcciones *no indispensables* bajo la forma de un objetivo de desempeño superior, el cual puede ser menos estricto que el de *operación inmediata*, pero en todo caso superior al de la filosofía de diseño convencional. Este mejor desempeño de los edificios aislados *no indispensables* ofrece una mejor protección a la vida y promueve una reducción de las intensidades de daños y los costos necesarios para su reparación. Consecuentemente, también incide en la reducción de los tiempos en los que las edificaciones están por fuera de servicio mientras duran las reparaciones. Con relación a este restablecimiento rápido de la operación de las edificaciones, el mismo también contribuye a la *resiliencia de la comunidad* en el sentido en que puede significar la posibilidad de que las personas retornen a sus hogares y a sus trabajos, ambos de los cuales no sufren interrupciones drásticas en su funcionamiento. Así mismo, dicho restablecimiento de la funcionalidad puede significar la continuidad de los negocios (Almufti & Willford, 2013). En conclusión, el rápido retorno a la normalidad (operación de las edificaciones e infraestructura en general) evita que se prolongue el cese de actividades económicas y sociales, lo cual puede desencadenar otro tipo de impactos negativos a la comunidad (Genatios & Lafuente, 2016)².

En conclusión, el mejor desempeño de ambos tipos de construcciones (*esenciales y no esenciales*) a raíz de la implementación del aislamiento tiene impactos positivos en términos

¹ Con relación a este objetivo de desempeño convencional, el mismo se encuentra comprendido entre los niveles de daño protección de la vida y prevención del colapso (Mitropoulou et al., 2011).

² El aspecto de resiliencia tratado hasta el momento corresponde al de *resiliencia de la infraestructura* en el sentido en cómo ésta asiste mejor a la comunidad frente a la amenaza sísmica a partir de la reducción de su vulnerabilidad. No obstante, el término *resiliencia* tiene un significado más amplio y comprende también la etapa de planificación necesaria que debe de adelantar la comunidad para definir los criterios y prioridades para la infraestructura frente a las amenazas de carácter local y regional. Esta planificación se circunscribe en el objetivo general de recuperar la normalidad lo más pronto posible. En la práctica del diseño sismo-resistente, estas prioridades adoptarían la forma de objetivos de resiliencia, los cuales consisten en definir un nivel de desempeño para la infraestructura y el tiempo que tarda para recuperar su operación a partir del papel que la misma desempeña dentro de la comunidad (Mcallister, 2013).

de: **1**) mejor protección de la vida y reducción de los lesionados, **2**) reducción o eliminación de los tiempos de interrupción de operación de los edificios, disminuyendo el lucro cesante, y **3**) mitigación de los costos de las reparaciones de los elementos estructurales y no estructurales y del contenido de la edificación (FEMA & BSSC, 2016). Todo lo anterior conlleva a un restablecimiento pronto de la normalidad anterior a la disrupción del sismo.

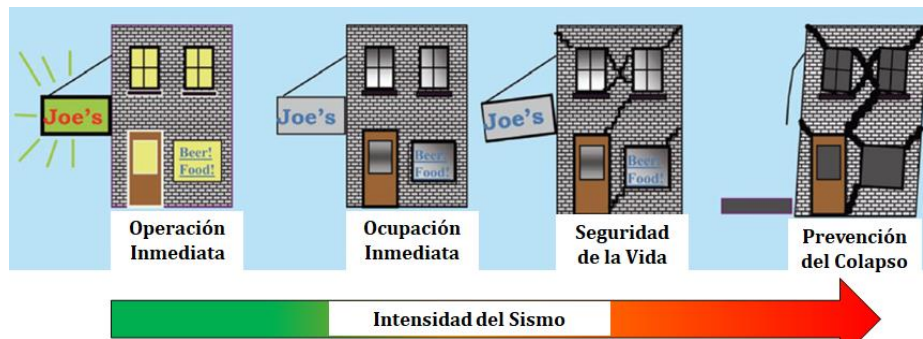


Figura 5: Objetivos de desempeño.
Adaptado de (FEMA & BSSC, 2016)

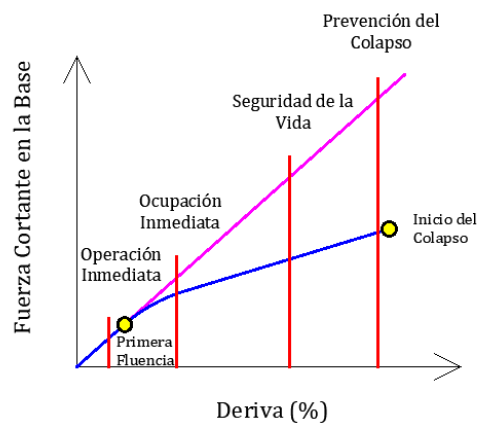


Figura 6: Objetivos de desempeño y capacidad y demanda de la estructura.
Adaptado de (Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020)

De otra parte, la filosofía de diseño sismo resistente convencional presenta algunos inconvenientes frente al diseño estructural con aislamiento sísmico, razón por la cual estaría en un nivel inferior. Esto último ameritaría la difusión y promoción del diseño con la tecnología de aislamiento.

Como se señaló, esta filosofía designa para las edificaciones *no esenciales* un objetivo de desempeño comprendido entre los niveles de daño de *seguridad de la vida* y *prevención del colapso* con el cual busca **1**) preservar la vida y **2**) proteger el patrimonio de los particulares y del estado. Respecto al primer propósito, las disposiciones de la filosofía convencional están orientadas a cuidar la estabilidad de la construcción de manera tal que los ocupantes puedan evacuar de forma segura, sin ningún tipo de amenaza a su persona. En cuanto al segundo propósito, puede ocurrir que un edificio, cuyo diseño cumpla con las exigencias de estos códigos, sufra tal intensidad de daños en el sistema estructural y/o en las instalaciones mecánicas, eléctricas y de plomería que su reparación no resulte viable desde un punto de vista económico, sino que en su lugar sea más factible su demolición y reemplazo (Almufti

& Willford, 2013). Esta última situación constituye el primer gran inconveniente de esta concepción de diseño y es una consecuencia directa de la forma como esta modalidad de diseño establece que se debe de “*hacer frente*” a los efectos de un sismo, a saber: por medio del daño de la estructura como mecanismo de disipación de la energía inyectada en la construcción por el sismo (ver 3.2).

En cuanto a los edificios *esenciales*, los códigos convencionales señalan la *operación inmediata* como uno de los objetivos de desempeño necesarios. Consecuentemente, estos códigos especifican *factores de importancia* que buscan aumentar la capacidad de la estructura y de los elementos no estructurales con el propósito de que éstos padezcan menores daños bajo el sismo de diseño, con lo cual se reduce el riesgo de que se interrumpa su funcionamiento. Así mismo, señalan requisitos de anclaje para conservar la estabilidad y operación de algunos equipos en caso de un sismo (McAllister, 2013). Sin embargo, esta estrategia no ha sido exitosa toda vez que este tipo de construcciones continua presentando daños en sus elementos no estructurales y su contenido que interrumpen su funcionamiento (Genatios & Lafuente, 2016). Sobre este particular, la referencia (FEMA & BSSC, 2016) señala que la protección de estos dos ítems es muy difícil de conseguir desde esta concepción tradicional de diseño sismo-resistente. En esto consiste el segundo inconveniente de esta concepción de diseño.

Aunado a los inconvenientes del diseño convencional mencionados, existen otros más que tienen que ver con el incremento del costo del ciclo de vida del proyecto debido a los daños inducidos por un movimiento telúrico; estos costos son ineludibles desde la concepción tradicional del diseño sismo resistente a raíz de su designación del daño como mecanismo de disipación de energía. De hecho, la ocurrencia necesaria de daño en las estructuras implica costos adicionales como: los costos asociados a la interrupción de ingresos debido al cese de actividades en el edificio mientras es reparado, los costos debidos a la renta de otras instalaciones para continuar con las actividades durante este lapso y los gastos asociados a la reparación misma de la estructura y su contenido.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la influencia del tipo de suelo sobre el costo directo de los materiales predominantes de construcción (acero y concreto) de un edificio de concreto reforzado de mediana altura con aislamiento sísmico en la base, en la ciudad de Santiago de Cali.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las variaciones de los costos directos de los materiales predominantes de construcción (acero y concreto) de las superestructuras objeto de estudio respecto al tipo de suelo.

- Determinar las variaciones de los costos directos de los materiales predominantes de construcción (acero y concreto) de la subestructura de los edificios objeto de estudio respecto al tipo de suelo.
- Determinar las variaciones de los costos directos de los materiales predominantes de construcción de los sistemas de aislamiento sísmico respecto al tipo de suelo (aisladores sísmicos).

1.4 Alcance y limitaciones

El desarrollo del presente trabajo de grado tiene las siguientes limitaciones:

- Los análisis sísmicos de los edificios regulares de mediana altura y con aislamiento sísmico en la base, se efectúan en todos los casos de estudio por medio del Método de la Fuerza Horizontal Equivalente siguiendo las recomendaciones mínimas estipuladas en el FEMA P-1050 sección 17.4. No obstante, para el caso de suelo blando tipo E, para el cual el FEMA P1050 sección 17.4.2.2 establece que se debe de adelantar un Análisis Cronológico No Lineal, en esta investigación se practica un Análisis Dinámico Modal Espectral sin atender esta restricción para este tipo de suelo. Lo anterior debido a que en este proyecto sólo se adelantan análisis lineales a partir de las propiedades efectivas (lineales) de los dispositivos de aislamiento sísmico.
- El análisis y diseño de las edificaciones con aislamiento sísmico en la base se adelanta observando únicamente los valores nominales de las propiedades de los aisladores. De esta manera, no se atiende lo estipulado por el FEMA P-1050 en cuanto al **1)** desarrollo de propiedades límite para cada dispositivo de aislamiento por medio de la inclusión de factores de modificación de propiedades, (FEMA P-1050 secciones 17.2.8.3 y 17.2.8.4, respectivamente), ni **2)** el análisis de dos modelos distintos cada uno de los cuales observa un conjunto distinto de valores límite para las propiedades FEMA P-1050 secciones 17.2.8.4 y 17.6.2.2).
- Los efectos de sitio son considerados en esta investigación por medio de las curvas de diseño propias de cada microzona. De esta manera, esta investigación no analiza los efectos de interacción suelo-estructura ni las modificaciones particulares de la señal sísmica para cada sitio.
- Toda vez que el propósito central de este trabajo de grado lo conforma el análisis de las solicitaciones sísmicas, este trabajo no observa las cargas laterales de viento en el análisis y diseño de las edificaciones. Así, no se atiende la observación del FEMA P-1050 sobre: **1)** la resistencia de la superestructura ante las fuerzas eólicas de diseño ni **2)** la inclusión de un sistema de restricción de desplazamientos ante fuerzas eólicas en la interfaz de aislamiento que limite el desplazamiento del sistema de aislamiento a un valor de igual al permitido entre los diferentes pisos de la superestructura según 17.5.6 (FEMA P-1050 sección 17.2.4.2).
- En total se adelanta el diseño de 9 superestructuras. No obstante, solamente se adelanta el diseño de las cimentaciones para 6 de ellas: 3 edificaciones de PRM convencionales y 3 edificaciones de PRM con aislamiento de deriva 0,3%.
- En el detallado de los elementos de concreto reforzado no se consideran las longitudes de refuerzo requeridas por el desarrollo del refuerzo ni los traslapes dentro de los elementos. Por tanto, éstas no son tenidas en cuenta en la determinación de los costos directos de los materiales predominantes de construcción de los edificios.

Capítulo 2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Desempeño de los aisladores según el tipo de suelo

2.1.1 Estudios que muestran la inviabilidad de la solución del aislamiento sísmico en suelos blandos

En la referencia (R. González & Noguez, 1994) los autores estudian la respuesta dinámica de un modelo conformado por un PRM plano de 9 pisos ($h=24,05$ m) en concreto reforzado. Este modelo plano equivalente sustituye a la estructura 3-D dentro del marco de la investigación. En este trabajo los autores buscan establecer los efectos que tiene tanto el aislamiento sísmico en la base de tipo LRB como los efectos de la interacción suelo estructura (ISE) sobre la respuesta dinámica de la construcción según el tipo de suelo (firme, intermedio y blando). Para este propósito, incluyen los resultados de la estructura homóloga sin aislamiento como referencia. El análisis que se adelanta es de tipo cronológico no lineal y se ejecuta por medio del software DRAIN-2D; las no linealidades se disponen en la superestructura y en el sistema de aislamiento. Los sismos considerados corresponden a las distintas condiciones de suelo de interés, a saber (en orden, desde el suelo firme hasta el blando): El Centro (El Centro, California, 1.940), Ebro (obtenido artificialmente a partir del sismo de Michoacán- Guerrero de 1.985) y SCT (Michoacán-Guerrero, 1.985).

Esta referencia encuentra que las situaciones con aislamiento sobre suelo firme e intermedio (ambas sin ISE, para ser afín a la metodología y alcance de este trabajo de grado) presentan valores del cortante basal significativamente menores que los de la situación convencional bajo los efectos de los mismos suelos. Por ejemplo, la estructura aislada sobre suelo firme tiene un cortante basal de 41 Ton mientras la convencional, uno de 79 Ton. Por su parte, en la situación de suelo intermedio, el edificio aislado presenta un cortante basal de 39 Ton frente a uno de 75 Ton del convencional. Estas reducciones son del orden del 50% y son muy significativas. Por el contrario, en suelo blando el cortante basal de la estructura aislada es mayor que el de la convencional (98 Ton y 88 Ton, respectivamente). En cuanto a los desplazamientos de la estructura con aislamiento medidos en la base, los mismos se incrementan significativamente para el caso de suelo blando. De esta manera, para el caso de suelo firme, intermedio y blando el edificio aislado se desplaza 10 cm, 8 cm y 33 cm, respectivamente. Como se ve, los desplazamientos bajo la condición más desfavorable (suelo blando) con relación a la más favorable (suelo firme o intermedio) se incrementan alrededor de 330%. Igual comportamiento presentan los desplazamientos medidos a nivel de la cubierta respecto a los aisladores, los cuales se acentúan conforme el estrato se hace menos rígido (5 cm $-\Delta=0,2\%$ -, 4 cm $-\Delta=0,17\%$ - y 12 cm $-\Delta=0,49\%$ - para las condiciones de suelo firme, intermedio y blando, respectivamente). Lo anterior implica que el comportamiento de cuerpo rígido de la superestructura se ve levemente afectado conforme el suelo se flexibiliza. No obstante, los aisladores continúan controlando las deformaciones de la estructura, la cual se comporta como un cuerpo rígido aún en la situación de suelo blando.

Por lo anterior, los autores concluyen que los aisladores sísmicos de neopreno con núcleo de plomo no son eficientes para mejorar el desempeño de la estructura en los suelos blandos, pero sí en suelos intermedios y firmes donde predomina el componente de períodos cortos en la señal.

En la referencia (Tena, 1996) se estudia también la respuesta dinámica de dos construcciones con aislamiento LRB ($T_{ef}=1,71$ s) bajo diferentes condiciones de suelo con la intención de evaluar la eficiencia de distintos tipos de reforzamiento estructural para las escuelas públicas de México. Para tal fin, el autor analiza la respuesta dinámica de 2 edificios aislados, uno de 3 niveles y otro de 4 niveles ($h=9,0$ m y $12,4$ m, en el mismo orden), conformados por PRM tridimensionales, ordinarios resistentes a momentos de concreto reforzado. El análisis adelantado es de tipo cronológico no lineal con solicitaciones en ambas direcciones, para lo cual se emplea el software 3D Basis. Una limitación de este estudio, consiste en que emplea igual sistema de aislamiento para las 3 condiciones de suelo, es decir, propone un sistema y evalúa su viabilidad en cada tipo de estrato sin adelantar el diseño particular de cada sistema de aislamiento en función del tipo de suelo.

En términos generales, el sistema de aislamiento propuesto resulta adecuado para un sismo severo en los suelos firmes de Ciudad de México; sin embargo; no sucede lo mismo en los suelos blandos de esta ciudad, donde el sistema resulta inestable debido a que éste excede su capacidad de desplazamiento. Así mismo, las solicitaciones asociadas al estrato firme son menos severas que las asociadas al suelo blando. Por ejemplo, para el sismo de Michoacán-Guerrero de 1.985, los cortantes en la base obtenidos para el edificio de 3 niveles sobre suelo blando (estación SCT) son considerablemente mayores frente a los de suelo firme (estación TACY), como se indica a continuación: para la dirección x: 806 Ton ($V_x/W=0,42$) vs. 133,4 Ton ($V_x/W=0,067$), respectivamente; para la dirección y: 378,9 Ton ($V_y/W=0,198$) vs. 112,5 Ton ($V_y/W=0,057$), respectivamente. Igualmente, los desplazamientos medidos en la base para el edificio aislado exceden en 4,6 y 2,70 veces la capacidad del aislador (15 cm), para las direcciones X y Y, respectivamente. Por el contrario, para el suelo firme, ambos valores están por debajo de 0,15 veces la capacidad de desplazamiento del aislador. En cuanto a los desplazamientos de la cubierta con respecto a los aisladores, para el suelo blando este valor corresponde a 1,37 cm $-\Delta=0,15\%$ - y 0,37 cm (en X y Y, respectivamente) y, para el suelo firme, a 0,23 cm $-\Delta=0,026\%$ - y 0,10 cm (en X y Y, respectivamente). Los resultados para el edificio de 4 pisos son coherentes con lo indicado, por lo que no se comentan.

Con base en lo anterior, el autor concluye que la tecnología de aislamiento LRB es efectiva en suelo firme; no obstante, para situaciones de suelo blando, la implementación de aisladores LRB no es una solución técnica viable ya que está sujeta a efectos de amplificación dinámica.

En las referencias (Bozzo & Barbat, 2000; Chopra, 2012) se señala el buen desempeño de los aisladores sobre suelos firmes. Así mismo, indican que se debe de evitar implementar esta tecnología en estructuras apoyadas sobre suelos blandos toda vez que las estructuras de período extendido pueden entrar en resonancia con la señal característica de estos suelos, como se muestra en la Figura 4. En este sentido, (Komodromos, 2000) señala que en situaciones de suelo blando, la estrategia del diseñador debe consistir en hacer la estructura

lo más rígida posible ya que el suelo filtra el contenido de la señal correspondiente a estos períodos que coinciden con los de las estructura con aislamiento sísmico.

2.1.2 Estudios que muestran la viabilidad del aislamiento sísmico en suelos blandos

El estudio (Karabork et al., 2014) investiga los efectos que tiene la interacción suelo-estructura (ISE) en la respuesta sísmica de una edificación aislada sobre estratos blandos con apoyos HDRB de 3 distintas rigideces (flexible, intermedio, rígido). Para este propósito, el trabajo compara la respuesta de la estructura convencional, que sirve de referencia, frente a cada una de las 3 soluciones aisladas (según su tipo de aislador HDRB), tanto considerando como omitiendo la interacción suelo-estructura. El edificio que se analiza consiste de un pórtico plano de concreto reforzado de 15 niveles ($h=45,0$ m) con 3 vanos. Esta investigación ejecuta un análisis cronológico no-lineal por medio del software SAP2000 en el cual las no linealidades se concentran en los aisladores. Adicionalmente, emplea 3 registros acelerográficos característicos de suelos blandos de Turquía (Duzce 1.999, Marmara 1.999 y Erzincan 1.992).

Los resultados de interés para el presente proyecto de grado consisten en la eficiencia de los aisladores flexibles en cuanto a la reducción del cortante basal para la condición que omite la interacción suelo-estructura. Igualmente, los desplazamientos de la cubierta con respecto a los aisladores. El empleo de este tipo de aislamiento reduce significativamente el cortante sísmico en la base en un 62%, 45% y 58% para los sismos de Duzce, Marmara y Erzincan, respectivamente. Respecto a los desplazamientos de la cubierta (los cuales los autores reportan mas no comparan frente a la situación convencional) los mismos ascienden a 10,7 cm $-\Delta=0,24\%$ -, 8,7 cm $-\Delta=0,19\%$ - y 12,7 cm $-\Delta=0,28\%$ - para los mismos sismos en igual orden. Con base en estos resultados, junto a la reducción de las fuerzas internas y de la aceleración de la cubierta, así como el incremento de la aceleración del nivel base (que no se comentan), los autores concluyen que la eficiencia de los aisladores para reducir la respuesta sísmica de la superestructura sobre suelos blandos cuando no se considera la interacción suelo-estructura, es inversamente proporcional a la rigidez del sistema de aislamiento. De esta manera, el sistema de aislamiento flexible muestra el mejor desempeño en suelos blandos.

La referencia (Almansa et al., 2020) muestra que el aislamiento sísmico es viable en regiones de sismicidad moderada en estructuras de mediana altura sobre suelos blandos siempre que el sistema de aislamiento se implemente apropiadamente. Para este propósito, el estudio evalúa el desempeño del edificio aislado frente al convencional considerando únicamente estratos blandos. El caso de estudio consiste en un edificio de PRM de 6 niveles ($h=22,95$ m) de concreto reforzado construido en la ciudad de Shanghái-China, en el cual se implementa un sistema de aislamiento conformado por aisladores de caucho (LDRB y LRB) y amortiguadores de tipo viscoso. Este proyecto se ejecutó realmente a pesar de que el código de aislamiento chino no recomienda el aislamiento en suelos blandos. La investigación adelanta un análisis cronológico no lineal, en el cual las no linealidades se concentran en los dispositivos de caucho. Los acelerogramas que se consideran representan las condiciones de suelo blando propias del sitio, con períodos predominantes de 0,9 s y 1,1 s, escalados a 1 m/s^2

y $2,2 \text{ m/s}^2$, respectivamente (10% y 2% de excedencia en 50 años, en el mismo orden). Esta investigación observa las prescripciones del código Chino y Europeos pertinentes. Los resultados que se comentan a continuación corresponden a la situación del sismo con una probabilidad del 2% de ser excedido en 50 años, toda vez que la misma es afín al alcance de este trabajo de grado.

El cortante sísmico en la base del edificio sin aislamiento, obtenido como el promedio de los resultados máximos de cada conjunto de acelerogramas, corresponde a 0,379 en la dirección de análisis X y a 0,387, en Y (3.629 Ton y 3.705 Ton, en el mismo orden, considerando un peso sísmico del edificio de 9.576 Ton, como indica la investigación). Por su parte, este valor se reduce drásticamente para la situación con aislamiento en la base, en la cual dichos valores descienden a 0,095 en X y a 0,105, en Y (909 Ton y 1.005 Ton, respectivamente). Como se ve, la reducción que tiene lugar en la magnitud del cortante basal con el aislamiento asciende a aproximadamente el 24% y 27%, en X y Y, respectivamente. En cuanto a los correspondientes desplazamientos de los aisladores, los mismos ascienden a 44,0 mm en X y a 85,0 mm, en Y (considerando una altura de 200 mm del caucho, como indica la investigación). Con relación a las derivas máximas que presentan las correspondientes superestructuras, para el caso convencional, la misma asciende al 2% mientras que para la situación con aislamiento, al 0,475%. De esta manera, resulta que la implementación del aislamiento en los suelos blandos de Shanghái-China es satisfactoria.

2.1.3 Discusión sobre la viabilidad de la implementación del aislamiento sísmico en suelos blandos

De conformidad con los estudios citados, no existe un consenso acerca de la idoneidad de implementar sistemas de aislamiento sísmico en suelos blandos. No obstante, sí se pueden inferir algunas conclusiones generales.

De una parte, los estudios que consideran inadecuada esta solución estructural se adelantaron considerando el registro acelerográfico del sismo de Michoacán-Guerrero de 1.985 correspondiente a la estación SCT, la cual en los suelos blandos de Ciudad de México (R. González & Noguez, 1994; Tena, 1996). Como se ve en la Figura 4, esta señal presenta un contenido de energía importante alrededor de los períodos comprendidos entre 2,0 y 3,0 s. Por el contrario, los registros acelerográficos considerados en los estudios que señalan el adecuado comportamiento de los aisladores sísmicos en suelos blandos, tienen su contenido ondulatorio principal alrededor de los períodos 0,8 s y 1,1 s (Almansa et al., 2020; Karabork et al., 2014). Por tanto, existe una diferencia sustancial en cuanto a lo que los respectivos autores denominan *suelo blando*. Lo anterior podría explicar la diferencia de resultados de los diferentes estudios en cuanto a la idoneidad de los aisladores. Pues, efectivamente, el rango de períodos dominantes dentro de la señal correspondiente al sismo de Michoacán-Guerrero de 1.985 en la estación SCT, comprende el rango de valores que se usa para las estructuras aisladas (2,0 s-3,0 s), razón por la cual sí se presenta resonancia entre la señal sísmica y la superestructura, desfavoreciendo su respuesta sísmica.

Con base en lo anterior, la viabilidad de la implementación del aislamiento sísmico debe de adelantarse considerando las condiciones locales de suelo blando ya que resulta deficiente

categorizar como viable/no viable esta solución estructural de manera categórica. Por tanto, resulta importante adelantar previamente un estudio de factibilidad que evalúe la eficiencia de la implementación de esta solución estructural que se ajuste a las condiciones locales de suelo.

De otra parte, es preciso resaltar que, en términos generales, estas investigaciones mencionadas están de acuerdo en los siguientes puntos: **1)** incremento del cortante basal de las estructuras con aislamiento apoyadas sobre estrato blando frente a las de suelo firme. **2)** Incremento de las solicitaciones sobre los aisladores en términos de desplazamientos conforme se flexibiliza el suelo. Además, **3)** el sistema de aislamiento continúa controlando las deformaciones de la superestructura, aún en suelos blandos. Consecuentemente, se identifica que conforme el suelo se flexibiliza, los aisladores sísmicos pierden eficiencia en algunos aspectos. Sin embargo, continúan exhibiendo ventajas en otros, como es el caso del control de las deformaciones de la superestructura.

Por último, debido a que la mayoría de investigaciones señalan desplazamientos importantes del nivel base, se debe de evaluar la necesidad de implementar amortiguamiento adicional al ofrecido por el sistema de aislamiento sísmico mismo con el fin de controlar estos desplazamientos. Pues como muestra el estudio de (Almansa et al., 2020), esta variable se controló satisfactoriamente a valores admisibles con esta tecnología.

2.2 Costos iniciales de las construcciones con aislamiento sísmico

La referencia (Mayes, Jones, & Buckle, 1990) reporta que la implementación del sistema de aislamiento ocasiona que el costo del proyecto exceda al de la construcción homologa sin aislamiento. Este incremento se ha estimado en un rango entre el 1% y 5% del proyecto. De igual manera, la referencia (González, 2020) presenta una comparación de costos y comportamiento estructural de dos edificaciones ubicados en zonas de amenaza sísmica alta en Colombia, las cuales se diseñan según la filosofía tradicional (NSR-10) y con aislamiento sísmico (NSR-10 y ASCE 7-16), respectivamente. El estudio compara 2 estructuras convencionales de sistema estructural *combinado* frente a sus 2 correspondientes estructuras homólogas de PRM con aislamiento; ambas estructuras en concreto reforzado. Las estructuras aisladas fueron analizadas mediante un análisis cronológico no lineal mientras que las convencionales observaron un análisis modal de respuesta espectral. Para el caso de la clínica Villa Clemencia, esta referencia reporta que el incremento de costos asociados únicamente a la estructura para el proyecto con aislamiento es del 5,23% frente al convencional (Este edificio se ubica en la ciudad de Armenia-Quindío, con un sistema de PRM de altura total de 18 pisos, 3 de los cuales se encuentran bajo el nivel de aislamiento mientras que 15 pisos están sobre el mismo. Su sistema de aislamiento está conformado por 30 aisladores LRB y 2 deslizadores SLD –aisladores de fricción-).

Así mismo, esta referencia reporta que para el caso del edificio de vivienda Venetto el incremento de los costos asociados únicamente a la estructura es del 4,00% (Este edificio se ubica en Manizales -Caldas-, tiene 21 pisos y fue proyectado originalmente de base fija mediante un sistema de tipo *combinado* en concreto reforzado. En el caso hipotético con

aislamiento, la estructura es de PRM en concreto reforzado y tiene 17 pisos sobre el aislamiento, el cual se compone de 24 aisladores LRB y 15 SLD).

Por considerarse de importancia en el marco del presente trabajo de grado, ya que parámetros tales como el sismo y la deriva observada en el diseño de las estructuras aisladas pueden influir en la robustez de la estructura, se indica que en su diseño se consideran el sismo MCE y una deriva general del 1% (además del chequeo adicional del umbral de daño que aplica para el caso de la clínica).

Igualmente, la referencia (Ruiz & Gutiérrez, 2020) hace una comparación de costos y comportamiento estructural de una edificación convencional de PRM de concreto reforzado de 5 pisos frente a su homóloga de PRM y con aislamiento sísmico; ambas estructuras son analizadas mediante análisis modales espectrales. Con relación al sistema de aislamiento, éste se compone de 32 dispositivos HDRB. Esta investigación observa la NSR-10 y el ASCE 7-10 y ASCE 7-16 para adelantar los respectivos análisis y diseños. Consecuentemente, para el caso del análisis de la estructura aislada, se observa el sismo MCE y una deriva del 0,5%. Este estudio reporta que se presenta un incremento de las cantidades de materiales de la superestructura para la situación con aislamiento sísmico frente a la convencional; dicho incremento asciende a 51,82% y 74,87% para las cantidades de concreto y acero, respectivamente. Consecuentemente, el costo de la superestructura se incrementa en un 56,51%. Ahora, una vez incluidos los costos totales (acabados, mampostería, etc.) y del sistema de aislamiento sísmico, el incremento de costos totales iniciales reportado es del 23% a favor de la estructura convencional frente a la de aislada.

Por último, la referencia (K. González & Pérez, 2014) compara los costos iniciales y a largo plazo de 2 estructuras convencionales de PRM en concreto reforzado con respecto a las edificaciones homólogas con aislamiento en la base. Las edificaciones son de 6 y 10 pisos, se ubican en un la ciudad de Medellín (zona de amenaza sísmica intermedia) y su uso es de tipo hospitalario. Esta investigación se adelanta observando la NSR-10 y el FEMA 451. Consecuentemente, para el caso de las estructuras con aislamiento sísmico, se observa el sismo de diseño DBE (10%/50 años, $T_r=475$ años) y una deriva del 1%/R (0,5% para estos casos). Los análisis adelantados para la estimación de los costos iniciales son del tipo modal espectral. La situación con aislamiento, requiere de 20 aisladores LRB. Esta investigación reporta que el costo del edificio aislado de 6 niveles se incrementa en un 22% frente al convencional mientras que la estructura aislada de 10 niveles, sólo un 5% frente a su edificación homóloga sin aislamiento.

2.2.1 Discusión sobre los costos de una edificación con aislamiento sísmico frente a una convencional

Primero es relevante advertir que en la revisión bibliográfica reportada, las estructuras aisladas resultan ser más costosas que las convencionales debido a la inversión adicional requerida por los dispositivos de aislamiento. Dicha variación parece oscilar entre un 23% y un 5%, correspondiendo el menor incremento a las edificaciones de mayor altura y el mayor, a las de menor altura.

De otra parte, se encuentra que la definición de algunos parámetros tales como el sismo a emplear en la evaluación de derivas, así como la deriva máxima permisible y la altura del edificio, constituyen parámetros relevantes frente a la magnitud del incremento de costos de las estructuras aisladas frente a las convencionales. De hecho, en las situaciones en las cuales se presentan ahorros de materiales a favor de las superestructuras con aislamiento (y por tanto un menor incremento del proyecto aislado frente al convencional), se emplean criterios menos exigentes para su análisis, bien por medio de la deriva máxima permisible (1%, (R. González & Noguez, 1994)) o bien por medio de sismos de menor severidad (10%/50 años, $T_r=475$ años, (K. González & Pérez, 2014)). Por el contrario, en la situación en que se incrementaron los materiales de la superestructura significativamente, se emplea tanto un sismo MCE (2%/50 años) junto con un requisito de deriva más estricto (0,5%) (Ruiz & Gutiérrez, 2020). Esto último podría explicar la discrepancia en cuanto a resultados.

De otra parte, en las situaciones en que se presentaron ahorros de la superestructura a favor del aislamiento, se evidencia que cuanto más alta la construcción, mayores son los ahorros de costos de la superestructura aislada. De ahí que el proyecto aislado sólo sea levemente más costoso que el convencional. Lo anterior parece lógico ya que la inversión adicional del nivel base se compensa cada vez más según haya más ahorros en otras partes de la superestructura.

De acuerdo con lo anterior, no es posible afirmar categóricamente si la implementación del aislamiento sísmico reduce por sí sólo los costos iniciales sino que se debe de considerar otros parámetros como lo son el sismo de diseño, la deriva máxima permisible considerada y la altura del edificio. Pues éstos se relacionan con la robustez e incrementos/ahorros de las cantidades de materiales de la superestructura.

Por último, las secciones de los elementos verticales del sistema resistente a fuerzas sísmicas (columnas y muros) sí se reducen en todos los casos revisados para las situaciones con aislamiento. Este resultado es lógico ya que al reducirse las solicitaciones sísmicas debido a la implementación del aislamiento, el cual evita que llegue la misma energía sísmica al sistema de resistencia sísmica principal, estos elementos de rigidez pueden hacerse más esbeltos. De esta manera, el incremento parecería tener lugar en las vigas adicionales (que conforman el nivel base) y en los aisladores.

Capítulo 3 MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades de los aisladores

Los sistemas de aislamiento sísmico constituyen una alternativa al diseño sismo resistente convencional con la cual se busca mejorar el desempeño de las construcciones por medio de la modificación de sus propiedades dinámicas (Oviedo & Duque, 2006). De esta manera, los edificios con aislamiento sufren menos daños que los convencionales.

Con relación a la modificación de las propiedades dinámicas, los aisladores sísmicos en general modifican 2 de ellas: **1)** el período natural de vibración y **2)** la cantidad de amortiguamiento (ver Figura 7). Respecto al primer aspecto, la instalación de los aisladores en un piso de la edificación flexibiliza horizontalmente toda la parte del edificio que se encuentra apoyada sobre el mismo, con lo cual se extiende su período natural de vibración en esta dirección. De esta manera, se consigue reducir la transmisión de movimientos del terreno hacia esta parte aislada ya que su período extendido se distancia más de la frecuencia del contenido predominante de la señal sísmica, evitando así el fenómeno de resonancia. Lo anterior resulta en una disminución de las fuerzas sísmicas que afectan a la estructura. Por el contrario, al ser la construcción más flexible, sus desplazamientos se incrementan (no obstante, los mismos se concentran en el sistema de aislamiento, como se explica más adelante).

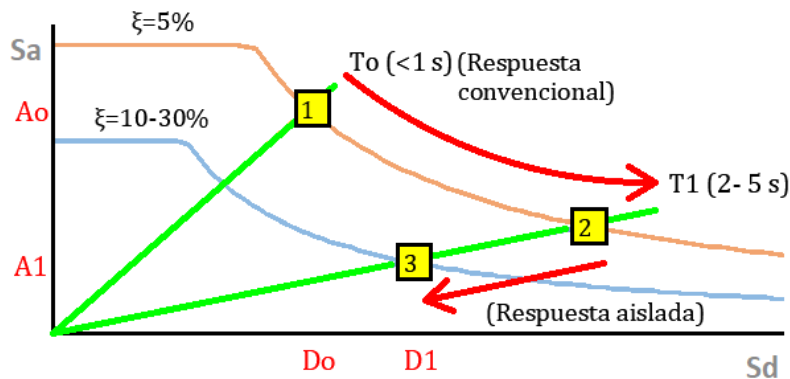


Figura 7: Esquematación de las características del aislamiento sísmico por medio de un espectro de respuesta de aceleraciones y desplazamientos (ADRS)
Adaptado de (FEMA & BSSC, 2007)

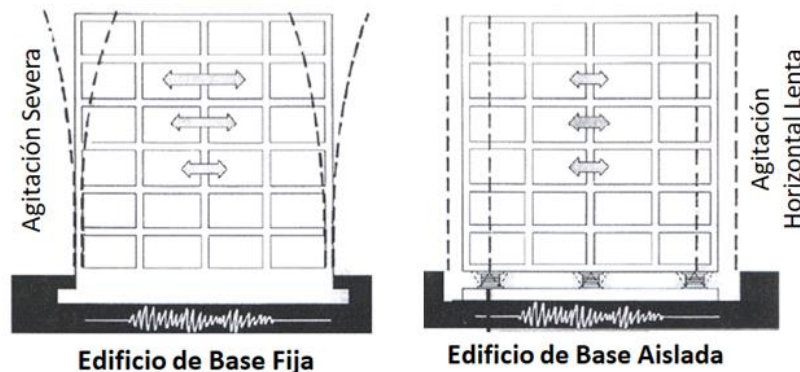
Con relación a la cantidad de amortiguamiento de la estructura, los dispositivos de aislamiento en general (salvo los LDRB y los SLD) incluyen mecanismos de disipación de energía que incrementan la magnitud del amortiguamiento disponible. Dichos mecanismos se basan en la disipación de energía mediante la fricción que tiene lugar en el dispositivo o como consecuencia de su comportamiento histerético, como se explica más adelante. Consecuentemente, la disipación de energía en una estructura con aislamiento sísmico se concentra en las unidades de aislamiento y, por tanto, no requiere del daño de la superestructura para este fin, protegiendo a la misma. Igualmente, estos mecanismos de disipación tampoco implican el daño de las unidades de aislamiento mismas después de cada

evento telúrico, sino que solamente exigen de su revisión por parte de un profesional calificado tras un sismo importante con la finalidad de verificar su estado y si deben ser reemplazadas o no (Genatios & Lafuente, 2016).

Los efectos que tiene el incremento de amortiguamiento sobre la respuesta estructural de un edificio consisten en: **1)** reducción de la magnitud de la aceleración impartida a la superestructura por parte del terreno en movimiento y **2)** reducción de la magnitud de desplazamientos que se concentran en el SAS (ver Figura 7).

Como consecuencia de los efectos mencionados debidos a la modificación de estas 2 propiedades dinámicas, el movimiento horizontal que experimenta toda la superestructura tiene lugar de manera lenta (Figura 8). Lo anterior indica que las aceleraciones de piso son pequeñas e inferiores a las de una construcción convencional, resultando en una mayor protección del contenido del edificio frente a las sacudidas severas del terreno debido a la menor magnitud de las fuerzas inerciales que experimenta (Komodromos, 2000).

Otra de las bondades dinámicas de la implementación de los SAS consiste en el control de las deformaciones y, por ende, las derivas y mecanismos de daño que padece tanto la parte de la construcción aislada como sus elementos no estructurales. En efecto, debido a la diferencia de rigideces que existe entre el piso aislado y el sistema de resistencia sísmica de la edificación, ésta se comporta como un cuerpo rígido que se desplaza horizontalmente sobre el piso aislado cuando es perturbada (Figura 8) (FEMA & BSSC, 2016). Adicionalmente, los dispositivos de aislamiento proveen a la superestructura de una capacidad de recentrado una vez la misma ha sido desplazada de su posición original debido a la perturbación.



*Figura 8: Esquema del comportamiento de una construcción MDF convencional y con aislamiento sísmico en la base en términos de desplazamientos.
Adaptado de (Bueno, 2005)*

De otra parte, estos dispositivos también hacen parte del sistema de resistencia de cargas verticales toda vez que los mismos se instalan en la base o bajo un piso y, por tanto, hacen parte del trayecto de las cargas hacia las partes inferiores del edificio, como su cimentación. Por tanto, se debe verificar en el diseño su capacidad de carga, posibles fallas por pandeo y rigidez en esta dirección (Oviedo & Duque, 2006).

Todos estos mecanismos expuestos contribuyen a que la construcción con aislamiento pueda cumplir con objetivos de desempeño más exigentes que los propuestos en los códigos de diseño convencionales (Almufti & Willford, 2013).

3.2 Diseño sismo resistente desde el punto de vista del balance de energía

La aproximación al diseño estructural mediante esta tecnología de protección sísmica se fundamenta en la reducción de la energía sísmica que entra al sistema, así (Aguilar et al., 2016):

$$E_{entrada} = E_{elástica} + E_{disipada} = E_k + E_p + E_v + E_h$$

*Ecuación 1: Balance energético en el diseño sismo-resistente.
(Aguilar et al., 2016)*

donde el término $E_{elástica}$ se compone a partir de la energía cinética asociada al movimiento desencadenado en la superestructura, E_k , y la energía potencial asociada a sus deformaciones elásticas, E_p . Por su parte, el término $E_{disipada}$ está conformado por la energía que disipa el sistema estructural, bien por mecanismos del tipo *amortiguamiento viscoso*, E_v , o bien del tipo *amortiguamiento histerético* que surge como consecuencia del daño que sufre la estructura por la incursión del material de sus elementos en el rango inelástico, E_h . Por su parte, el término $E_{entrada}$, al lado izquierdo de la ecuación, se asocia al trabajo que realiza el cortante basal. Al respecto, en la modalidad de diseño con aisladores sísmicos en la base, este término (que representa la demanda sísmica) se reduce drásticamente a raíz de la reducción de las intensidades de movimiento que el suelo le transmite a la superestructura. Lo anterior disminuye la energía total que debe ser balanceada en el sistema por medio de los otros términos del lado derecho de la ecuación, principalmente E_h . De esta manera, el SAS disminuye la energía que debe de ser resistida por el sistema de resistencia sísmica principal, reduciendo o eliminando completamente su daño (K. González & Pérez, 2014). Consecuentemente, el daño de la superestructura no constituye el mecanismo de disipación de energía con la implementación de los SAS.

Por el contrario, la concepción tradicional de diseño sismo resistente se basa en el daño del sistema de resistencia sísmica como mecanismo para disipar energía, motivo por el cual la disponibilidad del *amortiguamiento histerético* de la estructura debe ser superior a la demanda que impone el sismo (Bueno, 2005)³. Así las cosas, en los códigos convencionales existen provisiones orientadas a: **1)** hacer que estos daños tengan lugar de una manera controlada con el fin de garantizar la estabilidad de la edificación y hacer que los mismos sean reparables (p. ej. el diseño por capacidad de vigas y columnas y el mecanismo de falla de viga débil-columna fuerte) y **2)** maximizar la energía que se disipa mediante la inclusión de rótulas plásticas en los extremos de las vigas (las vigas tienen una ductilidad significativa en comparación de las columnas debido a su baja carga axial).

³ Esta forma de proceder obedece a razones económicas ya que para que una estructura responda dentro de su rango elástico frente a la excitación del sismo, se requerirían demasiados recursos. Así mismo, las dimensiones requeridas de sus elementos para que esto suceda serían excesivas, lo cual comprometería la funcionalidad de la edificación (Rochel, 2012).

3.3 Condiciones para el uso del aislamiento sísmico y sus limitaciones

La implementación de los sistemas de aislamiento en edificaciones es una estrategia adecuada en edificios indispensables de atención a la comunidad en caso de desastres que se encuentren en zonas de amenaza sísmica importante. Lo anterior debido a que el desempeño superior de este tipo de construcciones hace que la operación de estos centros no se vea interrumpida. Así mismo, esta estrategia es adecuada en instalaciones cuyo contenido sea vulnerable y costoso o represente una amenaza para la sociedad (p. ej. museos, centrales nucleares, plantas químicas, etc.), o negocios cuyos costos asociados al cese de actividades sean importantes (FEMA & BSSC, 2016). En resumen, el aislamiento es viable cuando la amenaza sísmica es importante y la edificación requiere de la *operación inmediata* debido a su grupo de uso o cuando la relevancia de las actividades que se desarrollan en él lo ameritan. Así mismo, cuando los costos asociados a los daños del sismo, tanto en la edificación misma como en su contenido, son tan importantes que se justifica la inversión inicial superior asociada a este sistema frente al de una estructura convencional; este es el caso de todos los edificios ubicados en zonas de amenaza sísmica alta, según (Terzic et al., 2012).

En cuanto a las limitaciones que existen sobre la implementación del sistema, como se explicó en 1.1, las estructuras deben de ser rígidas (baja altura), estar apoyadas sobre estratos firmes y no encontrarse cerca a la ubicación de la falla que produce el sismo. Adicionalmente, no pueden ser muy esbeltas (gran relación altura sobre dimensiones laterales) ya que la magnitud de los momentos de volteo podría ocasionar fuerzas de tensión en los aisladores, solicitaciones para las cuales estos dispositivos no presentan una resistencia importante.

Respecto a la limitación de la altura de las construcciones, es conveniente indicar adicionalmente que el diseño de las edificaciones de gran altura se encuentra por lo general controlado por las fuerzas de viento, aún en zonas de amenaza sísmica alta (Taranath, 2005). De esta manera, los SAS no serían adecuados en estos casos al ser un sistema concebido para la protección de la edificación ante sismos. Consecuentemente, la implementación de estos dispositivos está limitada a edificios de baja y mediana altura (Oviedo & Duque, 2009) (aunado a lo anterior, como se explicó en 1.1, el aislamiento no es muy eficiente en construcciones de gran altura).

Por último, es conveniente señalar que la implementación del aislamiento sísmico tiene impactos positivos en términos de una mejor protección de la vida, reducción de los lesionados, disminución en las pérdidas de funcionalidad del edificio y mitigación de los costos de las reparaciones de los elementos estructurales y no estructurales y del contenido de la edificación (Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020), aspectos que conforman la resiliencia de la comunidad en caso de una catástrofe (Almufti & Willford, 2013).

3.4 Tipos de aisladores sísmicos

Los dispositivos de aislamiento sísmico se clasifican en dos clases. De una parte se tienen los aisladores por fricción, los cuales desvinculan el movimiento de la superestructura del de su fundación mediante un plano de deslizamiento entre los dos, consiguiendo reducir la

transmisión de fuerzas cortantes (Genatios & Lafuente, 2016). Ejemplos de este tipo de aisladores son el aislador de base de fricción y los sistemas de péndulos de fricción (ver Figura 9-a)

De otra parte, los aisladores elastoméricos o de caucho consisten en bloques conformados por láminas de caucho natural intercaladas con láminas de acero; las láminas de caucho están vulcanizadas entre sí y todo el conjunto se dispone de manera horizontal. Adicionalmente, en sus superficies superior e inferior, este bloque cuenta con dos placas metálicas gruesas para su sujeción al edificio y a la cimentación (ver Figura 9-b).

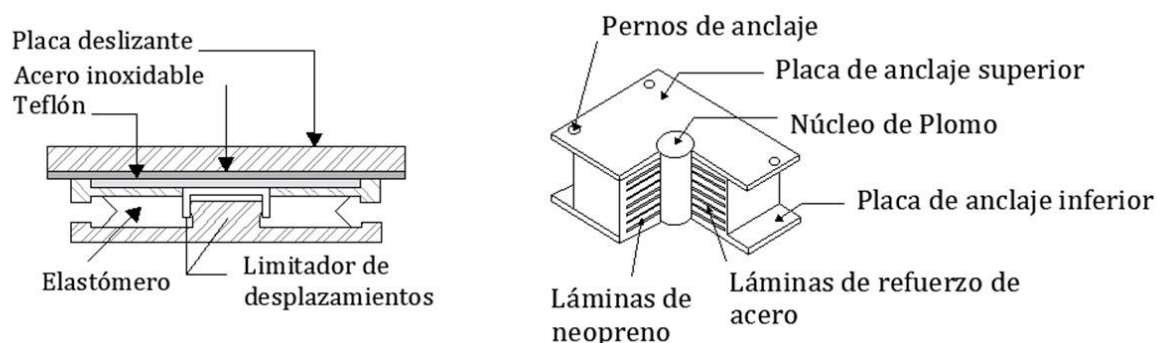


Figura 9: Tipos de Aisladores: apoyos planos de fricción (FSB) (a) y apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB) (b).

(Bozzo & Barbat, 2000) (a) y (R. González & Noguez, 1994) (b)

3.4.1 Relación constitutiva de los apoyos FSB (Friction Sliding Bearings) ó deslizadores (SLD-Sliders)

El concepto básico de los aisladores FSB consiste disponer de un plano deslizante de baja fricción entre la superestructura y su fundación, el cual se compone de dos placas, así: una placa superior, generalmente de acero inoxidable, integrada a las columnas y una placa inferior, generalmente de Teflón, integrada a la fundación. De esta manera, la magnitud del cortante basal transmitido a la superestructura está limitado por arriba por la máxima fuerza horizontal necesaria (μw) para iniciar el desplazamiento de la edificación sobre el plano. Pues, una vez se inicia el desplazamiento, cualquier incremento del cortante no se transmite a la superestructura sino que desencadena el movimiento del dispositivo y de la superestructura que soporta. Consecuentemente, “(...) el nivel de la respuesta de aceleración es independiente de la frecuencia y magnitud de la excitación (...). Esto implica que los aisladores de fricción pura pueden ser usados en todos los sitios” (Girish & Pranesh, 2013, p. 30).

En cuanto a la fricción que se desarrolla entre las 2 placas, ésta constituye un mecanismo de disipación de energía.

De conformidad con lo anterior, el modelo constitutivo de estos apoyos friccionantes planos puede ser asumido dentro del alcance de este trabajo de grado (análisis lineales como el de la FHE) como completamente rígido y perfectamente plástico, de acuerdo con la ley de

Coulomb, como muestra la Figura 10. Por tanto, es conveniente definir a partir de dicho comportamiento una rigidez efectiva, como se muestra en la misma figura.

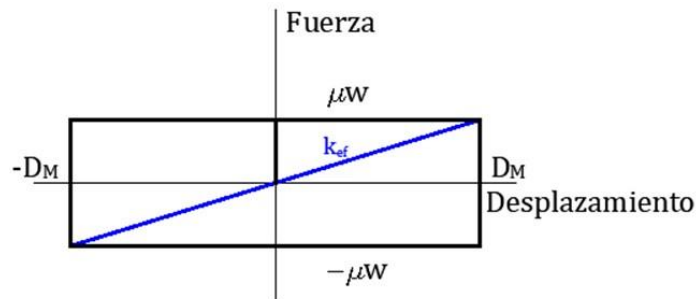


Figura 10: Comportamiento constitutivo de los deslizadores planos de fricción.
Adaptado de (FEMA & BSSC, 2007).

Así mismo, este apoyo no admite fuerzas de tensión. Igualmente, como se ve, el valor de la meseta depende del peso del apoyo/presión de contacto, el cual varía en un análisis sísmico cronológico debido al volcamiento.

Alternativamente, el dispositivo puede incluir un apoyo de caucho en medio de las 2 placas con el fin de que las perturbaciones menores sean absorbidas elásticamente y sólo las perturbaciones mayores desencadenen el desplazamiento. De esta manera, la respuesta inicial del dispositivo descrito es de tipo elástica.

De otra parte, una limitación muy importante acerca de la utilidad de estos dispositivos consiste en la ausencia de mecanismos que generen una fuerza de recentrado, lo cual incide en la aparición de desplazamientos residuales que pueden llegar a ser considerables. Por tanto, su empleo con fines de aislamiento sísmico está limitado a sistemas híbridos en los cuales se disponga de dispositivos suplementarios que suministren esta fuerza restauradora; estos apoyos pueden ser apoyos de caucho natural de bajo amortiguamiento (LDRB), apoyos de caucho natural con núcleo de plomo (LRB) o apoyos de caucho de alto amortiguamiento (HDRB).

Por último, en el documento (Mazza & Labernarda, 2021) se encuentran consignadas varias referencias en las cuales se explica de manera más minuciosa el comportamiento de estos apoyos con el fin de adelantar un análisis cronológico no lineal (p. ej. incremento del coeficiente de fricción conforme aumenta la velocidad de deslizamiento, disminución de este coeficiente cuando aumenta la presión de contacto, etc.).

3.4.2 Relación constitutiva de los apoyos LDRB (Low Damping Rubber Bearings)

En cuanto al funcionamiento de los dispositivos LDRB, el caucho se encarga de constituir un medio flexible horizontalmente que extienda el período natural de vibración de la estructura. Así mismo, éste provee la fuerza restauradora necesaria que devuelve a la superestructura a su posición original después de haber sido desplazada de allí por la

perturbación del terreno. Por su parte, las láminas de acero proveen la rigidez vertical necesaria al dispositivo para evitar su deformación excesiva en esta dirección por el peso propio de la construcción. De igual forma, evita las vibraciones de la superestructura en esta dirección debido a cargas de servicio y ambientales. Toda vez que estos dispositivos no adicionan amortiguamiento a la estructura en el sentido indicado en 3.1, éstos se usan de manera conjunta con dispositivos de amortiguamiento adicionales o apoyos LRB (Naeim & Kelly, 1999).

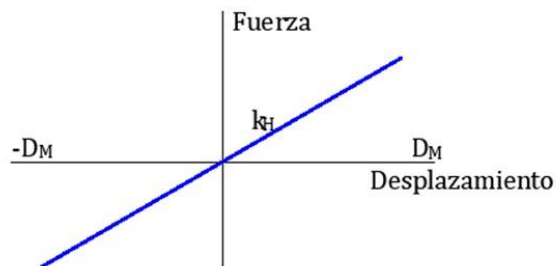
La propiedad mecánica más relevante de este tipo de dispositivos consiste en su rigidez horizontal, la cual se expresa mediante la siguiente expresión:

$$k_H = \frac{GA}{T_r}$$

*Ecuación 2: Rigidez horizontal de un dispositivo LDRB
(Naeim & Kelly, 1999)*

Donde: G: Módulo de corte del caucho
 A: Área de la sección transversal del caucho
 T_r: Altura total del bloque de caucho

De conformidad con lo anterior, el comportamiento constitutivo de estos apoyos es completamente elástico, como muestra la Figura 11.



*Figura 11: Comportamiento constitutivo de los apoyos LDRB.
Elaboración propia.*

Este tipo de apoyo no admite esfuerzos de tracción grandes sino solamente las que resiste el elastómero, que son del orden de 3 veces su módulo de corte, G (FEMA & BSSC, 2016).

3.4.3 Relación constitutiva de los apoyos LRB (Lead Rubber Bearings)

Los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo fueron desarrollados en Nueva Zelanda y consisten de un apoyo de caucho natural (de bajo amortiguamiento) reforzado al cual se le ha practicado una perforación en su centro para instalar un núcleo de plomo de manera vertical. En cuanto al funcionamiento del caucho natural reforzado, éste es idéntico al descrito anteriormente para los apoyos LDRB. Por su parte, el núcleo de plomo incrementa el amortiguamiento del dispositivo por medio de su comportamiento histerético cuando la

unidad incursiona en el rango post-elástico bajo las excitaciones reversibles del sismo (González, 2020).

Como consecuencia del trabajo en paralelo del núcleo de plomo con el elastómero, la respuesta del aislador como unidad es bi-lineal, como muestra la Figura 12-a; los parámetros que definen esta curva esfuerzo deformación son Q_d (resistencia del aislador sin padecer ninguna deformación; ésta es función de las propiedades mecánicas y geométricas del núcleo de plomo, en particular su esfuerzo de fluencia al corte, $Q_d = A_l \tau_{l,y}$), k_2 (rigidez post-elástica, la cual es función de las propiedades mecánicas y geométricas del caucho, en particular su módulo de cortante, $k_2 = GA/T_r$) y k_1 (rigidez inicial, la cual se define generalmente un múltiplo de K_2 -10 veces K_2 -) (Aguiar et al., 2014). Este modelo se muestra en la Figura 12-b.

Esta respuesta bi-lineal se caracteriza por su amortiguamiento histerético, el cual sólo actúa una vez el apoyo incursiona en su rango post-elástico. Adicionalmente, este modelo cuenta con una rigidez inicial importante.

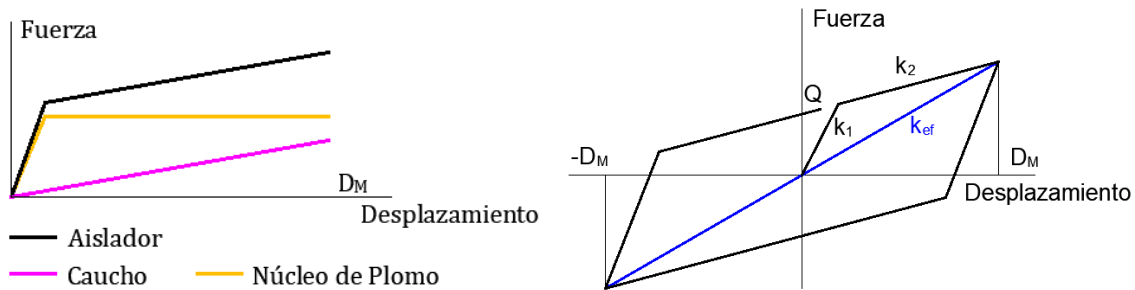


Figura 12: Curvas fuerza de corte vs. deformación apoyos LRB (a) Modelo bi-lineal y lineal (b) Adaptado de (Komodromos, 2000) y (Naeim & Kelly, 1999)

No obstante, es posible representar este comportamiento bi-lineal de los aisladores LRB de forma lineal por medio de la definición de una rigidez efectiva, k_M , y de un amortiguamiento viscoso equivalente, β_M ; todo lo anterior con el fin de poder adelantar análisis sísmicos lineales (ver Figura 12-b). En cuanto a las propiedades equivalentes, se tiene una rigidez efectiva la cual se define como la pendiente secante que es función del desplazamiento D_M , entre otros (ver Ecuación 3). En cuanto al amortiguamiento equivalente, el mismo se define de manera tal que disipe igual cantidad de energía por ciclo que el amortiguamiento histerético del modelo bilineal (Ecuación 4). En este modelo el amortiguamiento está disponible tanto en el rango lineal como no lineal. Así mismo, la rigidez es bastante menor que la que exhibe el modelo bi-lineal. Las ecuaciones que definen las propiedades equivalentes del modelo lineal se indican a continuación (Naeim & Kelly, 1999):

$$k_M = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D_M^+| + |D_M^-|} = k_2 + \frac{Q_d}{D_M} \quad D_M \geq D_y$$

Ecuación 3: Rigidez efectiva de un apoyo de neopreno con núcleo de plomo (Naeim & Kelly, 1999)

donde: D_M es el máximo desplazamiento traslacional de la unidad de aislamiento y D_y el desplazamiento correspondiente a la fuerza de fluencia del aislador.

$$\text{Razón de pérdida de energía} = \beta_M = \frac{1}{2\pi} \frac{(\text{Área del ciclo de histeresis})}{(\text{Área de la energía elástica})}$$

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \frac{4Q (D_M - D_y)}{K_M D_M^2} = \frac{2}{\pi} \frac{Q_d (D_M - D_y)}{K_M D_M^2}$$

*Ecuación 4: Definición del amortiguamiento viscoso equivalente
(Naeim & Kelly, 1999)*

Este tipo de apoyo no admite esfuerzos de tracción grandes sino solamente las que resiste el elastómero, que son del orden de 3 veces su módulo de corte, G (FEMA & BSSC, 2016).

3.5 Aspectos dinámicos de las estructuras aisladas

3.5.1 Planteamiento de las ecuaciones dinámicas (teoría lineal)

El problema de equilibrio dinámico de una estructura SDOF con aislamiento sísmico en su base es del tipo MDOF toda vez que los aisladores requieren que se disponga de un diafragma rígido encima de ellos; de ahí que surja una masa adicional concentrada en el nivel base, la cual requiere de un grado de libertad adicional para su análisis (Chopra, 2012). Así las cosas, el análisis consiste en dos ecuaciones: una para la superestructura cuya masa se concentra en el nivel 1, m_s , y otra para la losa que sirve de diafragma rígido a los aisladores (nivel de base), m_b (Figura 13).

Las **ecuaciones de tipo lineal** son las siguientes:

$$m_s(\ddot{U}_s(t) + \ddot{U}_b(t) + \ddot{X}_g(t)) + C_s \dot{U}_s + k_s U_s(t) = 0$$

*Ecuación 5: Ecuación dinámica para la superestructura SDOF
(Bozzo & Barbat, 2000)*

$$Y \quad m_b(\ddot{U}_b(t) + \ddot{X}_g(t)) + m_s(\ddot{U}_s(t) + \ddot{U}_b(t) + \ddot{X}_g(t)) + c_b \dot{U}_b + k_b U_b = 0$$

$$(m_s + m_b)\ddot{U}_b(t) + m_s \ddot{U}_s(t) + c_b \dot{U}_b + k_b U_b = -(m_s + m_b)\ddot{X}_g(t)$$

*Ecuación 6: Ecuación dinámica para la losa-diafragma rígido
(Bozzo & Barbat, 2000)*

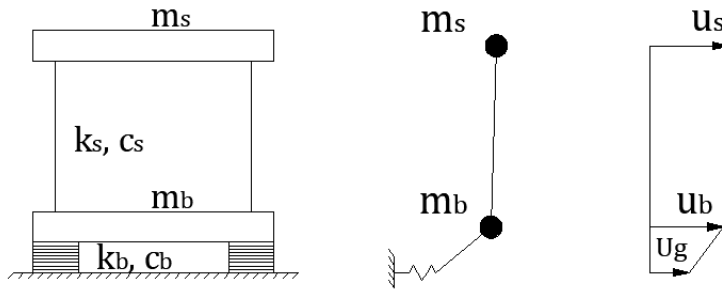


Figura 13: Análisis dinámico de una estructura SDOF con aislamiento en su base mediante apoyos LRB.
Adaptado de (Komodromos, 2000) y (Naeim & Kelly, 1999)

El primer término de la Ecuación 5 corresponde a la fuerza inercial que desarrolla la masa de la estructura, m_s , en virtud de las tres componentes de aceleración que la afectan: la aceleración del terreno, $\ddot{X}_g(t)$, la aceleración relativa de la losa-diafragma rígido de los aisladores con respecto a la base de los mismos, $\ddot{U}_b(t)$, y la aceleración relativa de la masa de la estructura, m_s , con respecto a su base, $\ddot{U}_s(t)$. Así mismo, el segundo y tercer término de esta ecuación, $C_s\dot{U}_s$ y $k_sU_s(t)$, corresponden a la fuerza de amortiguamiento de la estructura y a la fuerza desarrollada por el sistema de resistencia sísmica debida a su deformación relativa, respectivamente.

Con relación a la Ecuación 6, se precisa primero que las fuerzas de rigidez y amortiguamiento del edificio sobre los aisladores corresponden a: $c\dot{U}_s + k_sU_s(t) = m_s(\ddot{U}_s(t) + \ddot{U}_b(t) + \ddot{X}_g(t))$. De igual manera, las fuerzas inerciales sobre la losa, m_b , corresponden al producto de esta masa por la aceleración del terreno más la aceleración relativa de la losa con respecto a la base de los aisladores, $m_b(\ddot{U}_b(t) + \ddot{X}_g(t))$. Y, por último, las solicitaciones que ejercen los apoyos de neopreno sobre la losa consisten en las fuerzas de amortiguamiento y rigidez, $c_b\dot{U}_b$ y k_bU_b , respectivamente. Al respecto, el amortiguamiento c_b y la rigidez k_b corresponden a las propiedades equivalentes.

3.5.2 Deducción de las propiedades dinámicas de una estructura con aislamiento en su base a partir de un análisis modal (teoría lineal)

A continuación se incluye los principales resultados del análisis dinámico modal de una estructura SDOF con aisladores en su base sometida a la excitación de un sismo. Este estudio es adelantado por diversos autores (Chopra, 2012; Naeim & Kelly, 1999) y sus resultados principales se presentan de una manera sintetizada a continuación con el fin de hacer hincapié en las **características principales** de este sistema de protección sísmica.

Primero, se precisa que el amortiguamiento de la estructura con aislamiento no es del tipo clásico toda vez que existe una gran diferencia entre la magnitud del amortiguamiento de la estructura y el de los apoyos. Sin embargo, en el análisis que se muestra a continuación, se omite esta consideración y se supone que el amortiguamiento es clásico (Chopra, 2012).

El problema dinámico señalado anteriormente puede plantearse matricialmente así:

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = -[M][\gamma]\{\ddot{X}_g(t)\}$$

donde:

$$M = \begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \quad \{\ddot{U}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{U}_b \\ \ddot{U}_s \end{Bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \quad \{\dot{U}\} = \begin{Bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_s \end{Bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad \{U\} = \begin{Bmatrix} U_b \\ U_s \end{Bmatrix} \quad \gamma = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Ahora bien, calculando los valores y vectores propios:

$$[K] - \omega_i^2 [M] \{\varphi^i\} = \{0\}$$

Ecuación 7: Problema de valores y vectores propios

Expandiendo el polinomio característico:

$$\omega^4(1 - \gamma) - \omega^2 \left(\frac{k_b}{m_s + m_b} + \frac{k_s}{m_s} \right) + \frac{k_s}{m_s} \frac{k_b}{m_s + m_b} = 0$$

Ecuación 8: Ecuación característica del sistema

donde $\gamma = m_s / (m_s + m_b)$.

Ahora, $\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$ y $\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_b + m_s}}$. A partir de estas dos cantidades se puede expresar las frecuencias angulares naturales como:

$$\omega^2 = \frac{\omega_b^2 + \omega_s^2}{2(1 - \gamma)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1 - \gamma)\epsilon}{(1 + \epsilon)^2}} \right]$$

Ecuación 9: Raíces de la ecuación característica del sistema

donde $\epsilon = \omega_b^2 / \omega_s^2$. Por lo tanto, $\epsilon^2 \cong 0$ (toda vez que la rigidez de la estructura es muy superior a la del aislador) y $(1 + \epsilon)^2 \cong 1$

Con todas estas simplificaciones, resulta que:

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{1 - \gamma}$$

Ecuación 10: Frecuencia de los apoyos y frecuencia fundamental modificada del edificio, ω_1^2 y ω_2^2 , respectivamente

De acuerdo con la Ecuación 10, la frecuencia fundamental del conjunto conformado por la estructura y su aislamiento sísmico en la base es muy parecida a la de los apoyos elastoméricos; en esto consiste el aislamiento de la estructura con respecto a su base, a saber: **1)** aumentar el período fundamental de la edificación para que coincida con el del sistema de

aislamiento y, por tanto, la respuesta espectral se aleje del contenido frecuencial principal de los movimientos de diseño en suelos duros.

Con relación a la segunda frecuencia natural, la misma es mayor que la frecuencia de la estructura, indicando que este modo puede entrar en resonancia con la señal sísmica. No obstante, se precisa que, como se muestra más adelante (Ecuación 14), el primer modo es el que contribuye casi en su totalidad a la solución del desplazamiento (superposición modal), siendo la contribución de este segundo modo muy reducida.

De otra parte, determinando los *vectores propios*:

$$\phi_1^T = \{1 \quad -\epsilon/\gamma\} \quad \phi_2^T = \{1 \quad -1/\gamma\}$$

Ecuación 11: Vectores propios del edificio con aislamiento sísmico

Al respecto, se señala que las primeras componentes de los *vectores propios* indican que el desplazamiento lateral importante tiene lugar en los apoyos de neopreno. Además, las derivas de piso del modo 1 de la superestructura son casi nulas. No obstante, el segundo modo señala que las derivas de piso pueden ser importantes ya que el factor γ es menor que la unidad. Sobre este particular, considerando su escasa participación en la conformación de la respuesta cuando se realiza la superposición modal, no representa ningún riesgo (Ecuación 14).

De conformidad con lo anterior, **2)** las deformaciones laterales importantes y los consecuentes daños se concentren en el sistema de aislamiento en tanto que las derivas de piso de la superestructura son mínimas; esto es, la superestructura se comporta como un cuerpo rígido que se quiere se comporte dentro de su rango elástico.

Siguiendo con el ejercicio:

$$\xi_1 \cong \xi_b \quad \xi_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} [\xi_s + \gamma \xi_b \sqrt{\epsilon}]$$

Ecuación 12: Coeficiente de amortiguamiento para cada uno de los modos de vibración

donde

$$\xi_b = \frac{c_b}{2 \omega_b (m_b + m_s)} \quad \xi_s = \frac{c_s}{2 \omega_s m_s}$$

Ecuación 13: Coeficientes de amortiguamiento para el edificio con aislamiento sísmico

la anterior Ecuación 13 muestra que **3)** el amortiguamiento modal del modo fundamental corresponde al del sistema de aislamiento, lo cual causa que dicho modo se encuentra muy amortiguado y disipe energía. De esta manera, se consigue reducir los desplazamientos del sistema de aislamiento.

Y

$$\Gamma_1 = \frac{1-\epsilon}{1-2\epsilon+\epsilon^2/\gamma} \cong 1 \quad \Gamma_2 \cong \gamma\epsilon$$

Ecuación 14: Factores de participación modal del edificio con aislamiento sísmico

Esta ecuación establece que el 4) factor de participación modal para el modo 1 es muy cercano a la unidad, lo cual señala que la contribución del vector propio ϕ_1^T en la solución del movimiento en coordenadas cartesianas, U_i , tiene un peso importante con respecto a los modos superiores de vibración. Así mismo, la baja participación del segundo modo en la respuesta hace que los posibles problemas debidos a la resonancia de este modo con el movimiento sísmico sean mínimos. De igual manera, los grandes desplazamientos de la superestructura asociados al segundo modo se pueden despreciar por esta misma razón. Esta observación está de acuerdo con la nota realizada a la Ecuación 14 en el sentido de que el edificio se comporta como un cuerpo rígido de acuerdo con el modo fundamental; así mismo, en que los modos superiores se desprecian.

3.6 Reducción de las fuerzas inerciales en una estructura SDOF con aislamiento sísmico LRB

En la Figura 14-a y Figura 14-b, los investigadores (Bozzo & Barbat, 2000) comparan la respuesta y solicitaciones de una estructura SDOF convencional frente a una edificación aislada sometidas al acelerograma del sismo de El Centro, California (N,S, 18/05/1940). En la primera figura, los autores muestran el espectro de respuesta de aceleraciones absolutas. De acuerdo con la investigación en mención, la aceleración de la estructura con aislamiento es muy reducida con respecto a la convencional; además, su valor es prácticamente constante. Así mismo, la Figura 14-b muestra de forma general el coeficiente de sísmico, $C_s = \frac{V}{W}$, que corresponde a la fracción del peso de la estructura que actúa como cortante basal, en función del tipo de estructura y su respuesta. Según el estudio en mención, las estructuras con aislamiento son afectadas por fuerzas que son inclusive menores a las fuerzas inelásticas en las construcciones sin aislamiento dentro del rango de períodos intermedios, el cual comprende los períodos de las estructuras con aislamiento sísmico.

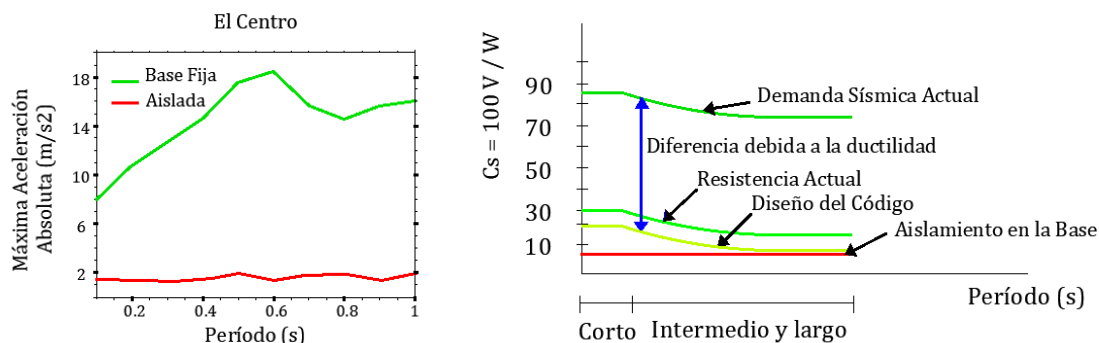


Figura 14: Comparación de la aceleración absoluta de una estructura convencional y con aislamiento (a). Comparación de las fuerzas sísmicas de una estructura convencional y con aislamiento (b). (Bozzo & Barbat, 2000)

3.7 Desplazamientos de una estructura SDOF con aislamiento sísmico LRB

Con el propósito de mostrar gráficamente lo indicado acerca de las estructuras con aislamiento en cuanto al comportamiento de la superestructura como un cuerpo rígido y la concentración de los desplazamientos en la interfaz de aislamiento, se incluye la Figura 15-a y Figura 15-b. Estas figuras esquematizan, en función de su condición de apoyo (de base fija y con aislamiento LRB), los desplazamientos de la base (Figura 15-a) y los desplazamientos relativos de la cubierta (Figura 15-b) para una estructura SDOF bajo la señal de excitación del sismo de El Centro, California (N,S, 18/05/1940). La fuente de la figura y del análisis corresponde al estudio (Bozzo & Barbat, 2000).

Como se ve en la Figura 15-b, la estructura aislada presenta desplazamientos relativos sustancialmente menores que la convencional. Adicionalmente, para el rango de períodos inferiores a 0,8 s, los desplazamientos de la estructura aislada son prácticamente despreciables. Por el contrario, los desplazamientos de la base de la Figura 15-a son mayores que los desplazamientos relativos de la cubierta, lo cual señala que la superestructura se desplaza horizontalmente como un cuerpo rígido sobre el sistema de aislamiento.

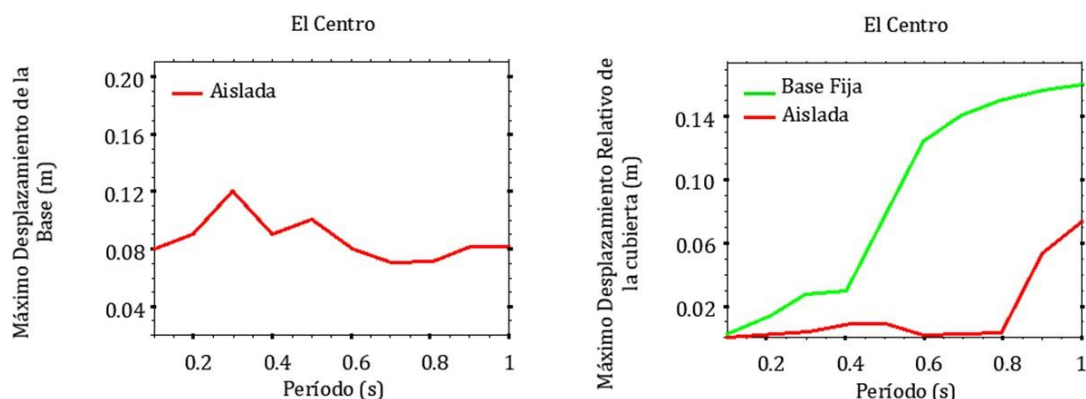


Figura 15: Comparación de los desplazamientos de la base de una construcción SDOF (a) y de los desplazamientos relativos de la cubierta (b) para estructuras con aislamiento sísmico y sin aislamiento. (Bozzo & Barbat, 2000)

3.8 Diseño de estructuras con aislamiento según FEMA P-1050 de 2015

El diseño con aislamiento sísmico propuesto por el estándar de diseño FEMA P-1050 de 2015 (FEMA & BSSC, 2016) se circunscribe dentro de la metodología de *diseño prescriptivo*⁴.

⁴ En la práctica, el **diseño prescriptivo** consiste en determinar las solicitaciones de los elementos estructurales de una construcción para la cual los códigos estipulan un objetivo de desempeño y un nivel de amenaza sísmica; posteriormente, en el diseño se determina el detallado de estos elementos con una resistencia mayor a dichas solicitaciones. Este es el procedimiento del que se vale el diseño convencional para garantizar que la resistencia general de la construcción sea superior a la demanda sísmica, cumpliendo con el objetivo de desempeño seleccionado (Almufti & Willford, 2013; Mitropoulou et al., 2011).

Pero a diferencia del diseño convencional, esta referencia establece que el objetivo de desempeño para la estructura sea el de *ocupación inmediata* y el nivel de amenaza, el *Sismo Considerado Máximo* MCE_R ($T_r=2.475$ años, probabilidad de ser excedido igual al 2% en 50 años; adicionalmente, este movimiento se encuentra ajustado por el riesgo de colapso de las estructuras del 1%/50 años y corregidos por “(...) *efectos de respuesta máxima de las componentes horizontales*” (AIS-180, 2013, p. 69)).

En cuanto a las partes que constituyen el SAS, este estándar designa con el nombre de *sistema de aislamiento* al conjunto conformado por los dispositivos de aislamiento, la losa diafragma-rígido construida sobre estos apoyos y las conexiones de los aisladores a elementos estructurales. Adicionalmente, este diafragma, no presente en estructuras convencionales, recibe el nombre de *nivel base* mientras que el conjunto de aisladores, el de *interfaz de aislamiento* toda vez que separa la superestructura (aislada) de la fundación (que se mueve junto con el terreno) ((American Society of Civil Engineers (ASCE) & Structural Engineering Institute (SEI), 2017) según (FEMA & BSSC, 2016)).

Así mismo, esta referencia establece que se debe disponer de un espacio libre alrededor de la estructura aislada con el fin de que ésta se pueda mover libremente bajo los efectos de un sismo sin experimentar impactos. De esta manera, cuando los aisladores se dispongan bajo el nivel del terreno, se requiere de un *foso* alrededor del perímetro de la estructura durante toda la vida del proyecto. Este *foso* debe de estar contenido por estructuras de contención. Por el contrario, si los aisladores están sobre el nivel del terreno, no se requiere de dicho foso (Komodromos, 2000).

En lo que respecta al proceso de análisis y diseño del edificio en general, el FEMA P-1050 recomienda que se efectúen dos análisis a partir de dos modelos matemáticos independientes, cada uno de los cuales considera los valores de las propiedades en alguno de sus límites. Estos límites surgen porque los valores de los parámetros de los modelos indicados en secciones anteriores pueden variar entre diferentes ciclos histeréticos con respecto a su valor nominal por diferentes motivos (calentamiento debido al movimiento cíclico, velocidad de aplicación de la carga, variaciones debidas al proceso de producción, etc.).

Con el propósito de incluir estas posibles variaciones dentro del proceso de diseño para que el mismo resulte adecuado para todo el rango de valores que pueden adoptar estos parámetros, este estándar define factores de modificación de propiedades, $\lambda_{\max} \geq 1,8$ y $\lambda_{\min} \leq 0,6$, que establecen un límite superior y uno inferior para los valores de estos parámetros, respectivamente. Por tanto, el análisis y diseño de una edificación aislada debe adelantarse por medio de dos modelos, uno con los valores inferiores de la curva esfuerzo deformación y otro con sus valores superiores. De esta manera, el valor de la respuesta de la estructura a

Generalmente, los códigos establecen generalmente que el objetivo de desempeño corresponda a un nivel de daño comprendido entre la seguridad de la vida y la prevención del colapso (Mitropoulou et al., 2011); lo anterior con el propósito de preservar la vida de los ocupantes, permitiéndoles escapar del edificio. En cuanto al nivel de amenaza, usualmente seleccionan un sismo de una intensidad correspondiente a una probabilidad de ser excedido del 10% en 50 años.

En contraposición al diseño prescriptivo, el **diseño basado en desempeño** verifica de forma explícita, mediante modelos analíticos y registros de sismos pasados, que el diseño propuesto cumpla con los objetivos de desempeño propuestos para los niveles de amenaza considerados (Almufti & Willford, 2013).

usar en el diseño corresponde al más crítico que arrojen los dos modelos (p. ej. k_M , β_M , D_M , T_M , D_{TM} , V_b , V_S y V_{st}).

Con relación al proceso de diseño de los aisladores, a los mismos se le prescriben desplazamientos y resistencias al corte correspondiente a las solicitaciones inducidas por el MCE_R (V_b); lo anterior considerando un coeficiente de disipación de energía $R = 1$ y los efectos direccionales del sismo (100%-30%). Adicionalmente, la referencia (Aguilar et al., 2016) señalan que se debe verificar su *capacidad de carga*, su *pandeo* y la *ausencia de levantamientos* importantes sobre los mismos; estas disposiciones tienen como fin garantizar que el sistema de aislamiento sea funcional bajo los efectos del sismo MCE_R , el cual es uno de los objetivos del estándar de diseño en mención.

Así mismo, la disposición de los aisladores también debe considerar la capacidad de los mismos para proveer una fuerza restauradora que aumente conforme se incrementa el desplazamiento. Con este propósito, el FEMA P-1050 de 2015 establece valores de referencia con el fin de que la estructura vuelva a su posición original después de la perturbación (esta disposición debe ser tal que la fuerza restauradora del SAS bajo el D_M sea al menos 2,5% del peso, W , mayor que la fuerza restauradora que produce los dispositivos bajo un desplazamiento igual al 50% del D_M).

En cuanto a las provisiones o criterios de diseño de la superestructura, esta referencia de diseño prescribe una solicitación cortante V_{st} ($\neq V_b$) que se establece con base en la fuerza cortante que desarrolla el aislador bajo la excitación del MCE_R (V_b). Así mismo, esta estándar prescribe que se debe de usar un coeficiente de disipación de energía, R_I , definido así: $R_I = 3/8 R_0$, donde $1 \leq R_I \leq 2$ y R_0 corresponde al sistema estructural convencional de base fija.

Adicionalmente, este estándar dispone que se debe de observar una deriva del 1,5% para la superestructura cuando se sigan los procedimientos de análisis de la Fuerza Horizontal Equivalente o Análisis Dinámico Modal Espectral, que son los que conforman el alcance del presente trabajo de grado. Ahora, cuando se practica un análisis modal espectral, si la deriva en alguno de los pisos excede el valor de 1%/R, se deben de incluir los efectos $P\Delta$ en el análisis sísmico del edificio, de acuerdo con esta referencia.

Sobre la modalidad de análisis sísmico a emplear, se establece las condiciones que debe cumplir la edificación para adelantar un análisis de la Fuerza Horizontal Equivalente, Dinámico Modal Espectral o Cronológico No Lineal. Estas condiciones están dadas en términos de tipo de suelo, características del edificio (altura y regularidad) y del sistema de aislamiento (rigidez, amortiguamiento y período efectivo, fuerza restauradora provista y disposición de espacio libre alrededor de su perímetro).

Como complemento a esta breve descripción, en el Capítulo 4 METODOLOGÍA se indica de forma más detallada cómo adelantar el análisis y diseño de una estructura con aislamiento sísmico a la luz de lo expuesto con relación al FEMA P-1050 de 2015.

3.8.1 Diseño de los aisladores (área efectiva, capacidad de carga, control de las deformaciones y verificación del pandeo)

Tanto las solicitaciones verticales como las de corte sobre los dispositivos de aislamiento sísmico causan que los mismos experimenten una *deformación de corte*, γ_c , y deformaciones rotacionales, γ_r . De esta manera, el primer tipo de deformación origina el concepto de *área efectiva*, la cual corresponde al área de traslapo del círculo de la parte de arriba del dispositivo con el de abajo cuando el aislador está deformado, como se muestra en la Figura 16 y en la Ecuación 15.

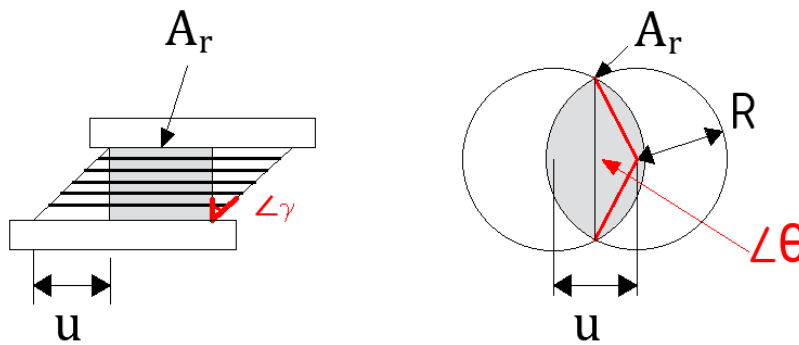


Figura 16: Área efectiva de los aisladores.
(Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020)

$$A_r = A \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\pi} \right), \quad \theta = 2 \arccos \left(\frac{u_{max}}{D_b} \right)$$

Ecuación 15: Cálculo del área efectiva
(Komodromos, 2000)

En cuanto a la capacidad de carga, se debe observar que para cada solicitación de desplazamiento, u , y carga, P_u , los valores de presiones de contacto estén dentro de los valores indicados en los catálogos. Para este propósito, el catálogo de DIS (Dynamic Isolation Systems Inc, 2007) indica una carga máxima permisible para cada dispositivo bajo una deformación de corte del 250%, por lo que se debe de obtener para cada deformación particular la carga máxima permisible observando lo indicado anteriormente para la relación desplazamiento-área efectiva.

Con relación a los valores permisibles de la deformación por corte, así como su cálculo, la Tabla 1 y la Tabla 2 indican cómo hacerlo. Se precisa que en las ecuaciones, t_r y T_r corresponden al espesor de una capa de caucho individual y al espesor total de goma, respectivamente; G , al módulo de corte; S , al factor de forma y f_1 y f_2 son factores que dependen del factor de forma, S , la relación del módulo volumétrico, k , y el módulo de corte, G . Estos valores se pueden consultar en la literatura, por ejemplo en las referencias (Aguar et al., 2016; Aguiar, Castillo, et al., 2014).

Ec. 1	Deformación de corte por Cargas Verticales	$\gamma_c = \frac{P_u}{A_r G S} f_1$
Ec. 2	Deformación rotacional por Cargas Verticales	$\gamma_r = \frac{D_b^2 \theta}{t_r T_r} f_2$
Ec. 3	Deformación de corte por Cargas Sísmicas	$\gamma_s = \frac{u}{T_r}$

Tabla 1: Cálculo de las deformaciones de los aisladores.
(Aguiar, Vergara, et al., 2014)

	Combinación	Control
Ec. 1	1,2D+1,6L	$\gamma_c + \gamma_r + \gamma_s < 6$
Ec. 2	1,2D+0,5L+1Eq (DBE)	$\gamma_c + 0,5\gamma_r + \gamma_s < 7$
Ec. 3	1,2D+0,5L+1Eq (MCE _R)	$\gamma_c + 0,25\gamma_r + \gamma_s < 9$

Tabla 2: Control de las deformaciones de los aisladores.
(Aguiar, Vergara, et al., 2014)

En cuanto al pandeo, los aisladores sísmicos son susceptibles de fallar por este mecanismo, riesgo que se incrementa debido a su baja rigidez horizontal. Según el (FEMA & BSSC, 2016), para un dispositivo circular con orificio en su centro en su posición no deformada, la carga crítica de pandeo está dada por:

$$P_{crit} = 0,218 \frac{G D_b^4}{t_r T_r} \frac{\left(1 - \frac{D_i}{D_b}\right) \left(1 - \frac{D_i^2}{D_b^2}\right)}{1 + \frac{D_i^2}{D_b^2}}$$

Ecuación 16: Carga Crítica para pandeo aisladores con orificio
(FEMA & BSSC, 2016)

Pero bajo deformaciones por corte, dicha carga crítica se reduce a:

$$P'_{crit} = P_{crit} \frac{A_r}{A}, \quad \text{con el control } P'_{crit} > 0,15 P_{crit}$$

Ecuación 17: Carga Crítica para pandeo aisladores bajo deformaciones
(Aguiar, Vergara, et al., 2014)

Adicionalmente, (Aguiar, Castillo, et al., 2014) indica que se debe de satisfacer las siguientes 2 condiciones para que exista un margen de seguridad frente a este tipo de falla de los dispositivos de aislamiento:

- Para solicitaciones gravitacionales: $\frac{P_{crit}}{P_u} > 2$
- Para solicitaciones gravitacionales y de sismo (MCE_r): $\frac{P_{crit}}{P_u} > 1,1$

3.9 Ítems de costos de las estructuras con aislamiento sísmico

Dada la importancia de la infraestructura para la sociedad en términos de desarrollo económico y sostenibilidad, el avance del conocimiento y prácticas relacionadas con su conservación y mejoras en aspectos como funcionamiento, seguridad, etc., es estratégico en el sentido de que permiten formular políticas de desarrollo y sustentar la toma de decisiones relativas al diseño de estructuras más duraderas y a su intervención (mantenimiento, reemplazo, etc.). Por tal motivo, la ingeniería estructural está orientándose a una filosofía de diseño que considera el ciclo de vida del proyecto, su deterioro y sus costos asociados en lugar del punto temporal inicial (Biondini & Frangopol, 2016, 2017).

Por tanto, hay una tendencia en el diseño sismo resistente consistente en implementar la metodología de *Análisis de Costos del Ciclo de Vida (Life-cycle cost analysis-LCCA)* para diseñar edificaciones y evaluar su desempeño considerando tanto los daños y pérdidas asociadas a un sismo como el tiempo necesario para la recuperación de su operación después del evento (p. ej. Almufti & Willford, 2013). En este sentido, los costos de una edificación comprenden los siguientes ítems: **1)** la inversión inicial para su construcción (materiales, mano de obra y elementos no estructurales: redes eléctricas e instalaciones sanitarias, etc.) y **2)** los costos potenciales de los daños debidos a los movimientos telúricos que puedan suceder dentro de la vida útil de la construcción; dichos costos abarcan los “(...) *costos de reparación, costos de pérdidas de contenido, los costos de recuperación de los heridos o pérdidas de vida y otros pérdidas económicas directas o indirectas relacionados a pérdidas de contenidos, renta e ingresos, después de un sismo*” (Mitropoulou et al., 2011, p. 5).

En cuanto a los costos iniciales, los proyectos con aislamiento requieren de los siguientes ítems adicionales en comparación con los convencionales: **1)** dispositivos de aislamiento, **2)** instalaciones mecánicas, eléctricas y sanitarias flexibles que puedan acomodar los desplazamientos del sistema de aislamiento, **3)** losa estructural adicional que se dispone sobre el sistema de aislamiento con el fin de uniformizar desplazamientos de las unidades como los esfuerzos sobre las mismas, **4)** muros de contención alrededor del perímetro de la estructura, los cuales guardan el espacio libre que requieren los dispositivos de aislamiento (éste es opcional, sólo en el caso de que la interfaz de aislamiento se encuentre bajo el nivel del terreno), **5)** pérdida del área utilizable del lote donde se implanta el edificio debido al espacio libre perimetral que debe existir para los aisladores y **6)** mantenimiento e inspección de los apoyos elastoméricos para su correcto funcionamiento (Komodromos, 2000; Mayes, Jones, & Kelly, 1990). Por el contrario, la implementación de un sistema de aislamiento conlleva a los siguientes ahorros en la inversión inicial: **1)** reducción del costo de la superestructura debido a su mayor esbeltez como consecuencia de la disminución de las solicitaciones sísmicas (p. ej. no se requieren muros estructurales y las columnas son menos robustas); **2)** reducción de las dimensiones de la cimentación debido a la disminución del peso de la superestructura y el cortante sísmico. Así mismo, **3)** las menores intensidades de movimiento de la superestructura también implican ahorros en los elementos no estructurales y equipos, los cuales requieren especificaciones menores (Komodromos, 2000).

En cuanto a los costos a largo plazo, los daños de un sismo en una estructura con aislamiento se reducen significativamente, llegando a permitir la operación inmediata del negocio (si así

lo especifica el dueño del proyecto). Lo anterior como consecuencia del mejor desempeño de este tipo de construcciones. Al respecto, referencias tales como (Mayes, Jones, & Kelly, 1990) y (Terzic et al., 2012) encuentran que hay una reducción significativa (del orden del 4-7%) en este tipo de costos, por lo que la inversión inicial superior necesaria para la implementación del sistema de aislamiento se compensa con el tiempo debido a los menores costos a largo plazo en que incurre este tipo de construcciones. Consecuentemente, en zonas de amenaza sísmica alta, la selección de la solución estructural debería, por tanto, tomarse con base en los costos a lo largo del ciclo de vida del proyecto y no en los iniciales.

3.10 Efectos del suelo sobre la señal sísmica

El último trayecto del tren de ondas sísmicas antes de llegar a la superficie lo conforman los depósitos de suelo que reposan sobre el basamento rocoso. Dichos depósitos, dependiendo de su geometría y propiedades dinámicas, en particular su rigidez y período de vibración, afectan a la señal de una forma determinada. Para el caso particular de suelos blandos, se observa que la señal sufre modificaciones en 3 aspectos: **1)** Amplitud: el contenido ondulatorio cuya frecuencia coincide con la del suelo se amplifica, lo cual significa que el suelo presenta mayores intensidades de movimiento asociados a estos períodos. **2)** Contenido frecuencial: debido al incremento de la energía y participación dentro de la señal de las ondas que se amplifican, así como a la disminución de la importancia de las ondas de período corto como efecto de los procesos de atenuación con la distancia, el contenido frecuencial principal de la perturbación consiste ahora en las ondas amplificadas de período intermedio o largo. Esto significa que las construcciones con período similar al de las ondas predominantes de la señal se vuelven más susceptibles de ser excitadas de manera significativa por el sismo. Consecuentemente, la forma de los espectros de respuesta de aceleraciones (y por tanto la de los espectros de diseño) se modifica de manera tal que represente este hecho. **3)** Duración: la duración de la señal sísmica se prolonga, lo cual se traduce en que las estructuras son excitadas durante mayores lapsos, alcanzando respuestas de mayor intensidad en términos de movimiento. Así mismo, la señal presenta mayores inversiones en su sentido (interceptos del registro acelerográfico sobre el eje horizontal), lo cual indica que las construcciones sufren de una mayor cantidad de ciclos de carga reversibles (García, 1998).

Las modificaciones de la señal descritas son algunos de los aspectos que se asocian con una mayor capacidad destructiva de un sismo (Sarria, 2008). Por este motivo, se asocia una mayor cantidad de daños a los lugares sobre suelo blando cuando ocurre un sismo (Sauter, 1989).

Ahora bien, las variaciones que presentan los espectros de respuesta en función del tipo de suelo fueron estudiadas por (Seed et al., 1976), consultado en (Rosales, 2001), quienes encontraron las formas espectrales que se muestran en la Figura 2. Dicha gráfica muestra varias curvas normalizadas con respecto a la aceleración máxima, las cuales se obtuvieron de realizar un promedio estadístico de cada una de las ordenadas de diferentes espectros de respuesta obtenidos para cada tipo de suelo. Allí se reflejan las observaciones recién hechas.

Respecto a las razones teóricas por las cuales se produce la amplificación de algún contenido ondulatorio particular de la señal, Kramer indica que se debe a la conservación de la energía elástica de las ondas. De hecho, la respuesta de las partículas de suelo frente a la disminución de su densidad con respecto al basamento rocoso, ρ , y la disminución de la velocidad de

propagación de las ondas s , v_s , consiste en aumentar su velocidad, $\dot{u}^2$, de acuerdo con la expresión $\rho v_s \dot{u}^2$, la cual indica el flujo de energía asociada a las ondas; esta expresión debe permanecer constante si se desprecian los fenómenos de disipación de energía del suelo (Kramer, 1996).

3.11 Microzonificación sísmica de Santiago de Cali

La actividad sísmica para la ciudad de Santiago de Cali se debe principalmente a la convergencia de las placas tectónicas de Nazca (oceánica) y Sudamericana (continental) que tiene lugar frente al litoral colombo-ecuatoriano. De hecho, la placa de Nazca se mueve hacia el oriente subduciendo bajo la placa Sudamericana, la cual se desplaza hacia el occidente; la subducción conforma una falla que aflora a lo largo de 150-200 km de manera paralela a la costa Pacífica del país (Rosales, 2001). De esta manera, ambas placas presentan movimientos relativos entre sí que dan lugar a un ambiente propenso a la actividad sísmica debido a la energía elástica que se almacena principalmente en sus contornos como consecuencia de sus deformaciones. En cuanto a la magnitud de los sismos generados y su ocurrencia, esta zona de subducción conforma la principal fuente de sismos del país; los sismos que genera son superficiales (hasta 40 km) con magnitudes importantes por encima de 8 (Rosales, 2001).

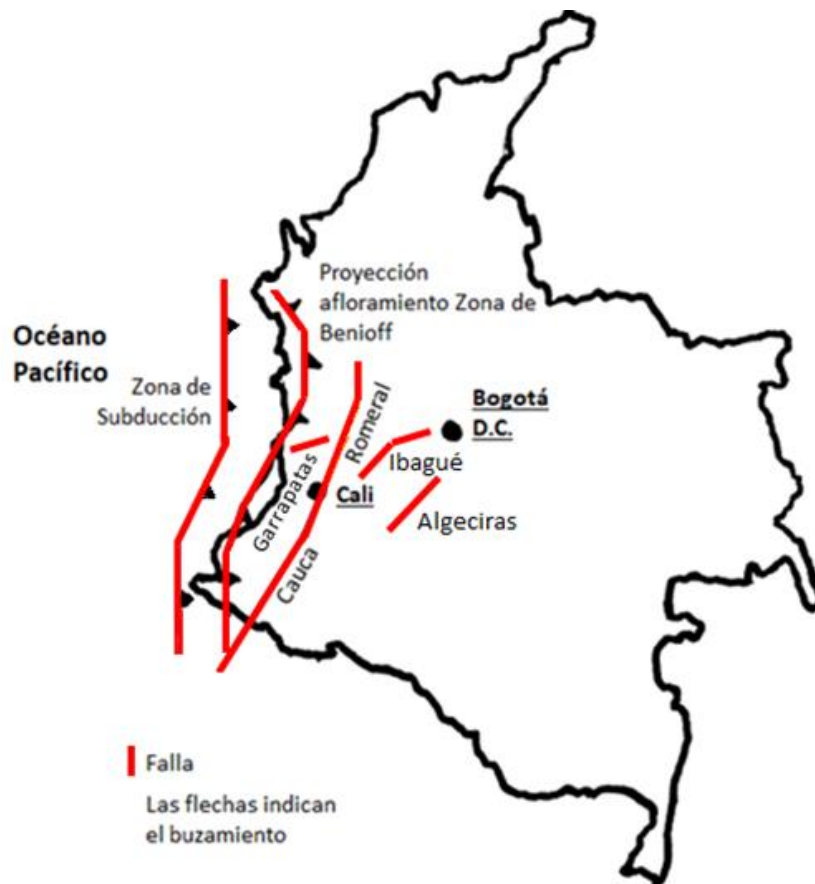


Figura 17: Fuentes sismogénicas de Santiago de Cali.
(García, 1998)

De manera complementaria al mecanismo anterior, existe una zona de Benioff que conforma otro ambiente de actividad sísmica en el occidente Colombiano. Esta zona se encuentra asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana ya que consiste en la parte profunda del contacto de las dos. Al respecto, en la referencia (Sarria, 2008) se señala que corresponde a la parte recta de una falla oceánica que se forma cuando ésta penetra bajo la placa continental con una inclinación. Los sismos que produce este ambiente tienen profundidades entre 40 km y 200 km (Rosales, 2001).

Otros ambientes de producción de movimientos telúricos lo conforman los sistemas de fallas activas de Cauca y Romeral, las cuales se encuentran en cercanías de la ciudad. Así mismo, los sistemas de fallas regionales de Algeciras-Altamira, Chusma, Garrapatas e Ibagué (DAGMA; INGEOMINAS, 2005). Algunas de las fuentes sismogénicas mencionadas se presentan en la Figura 17.

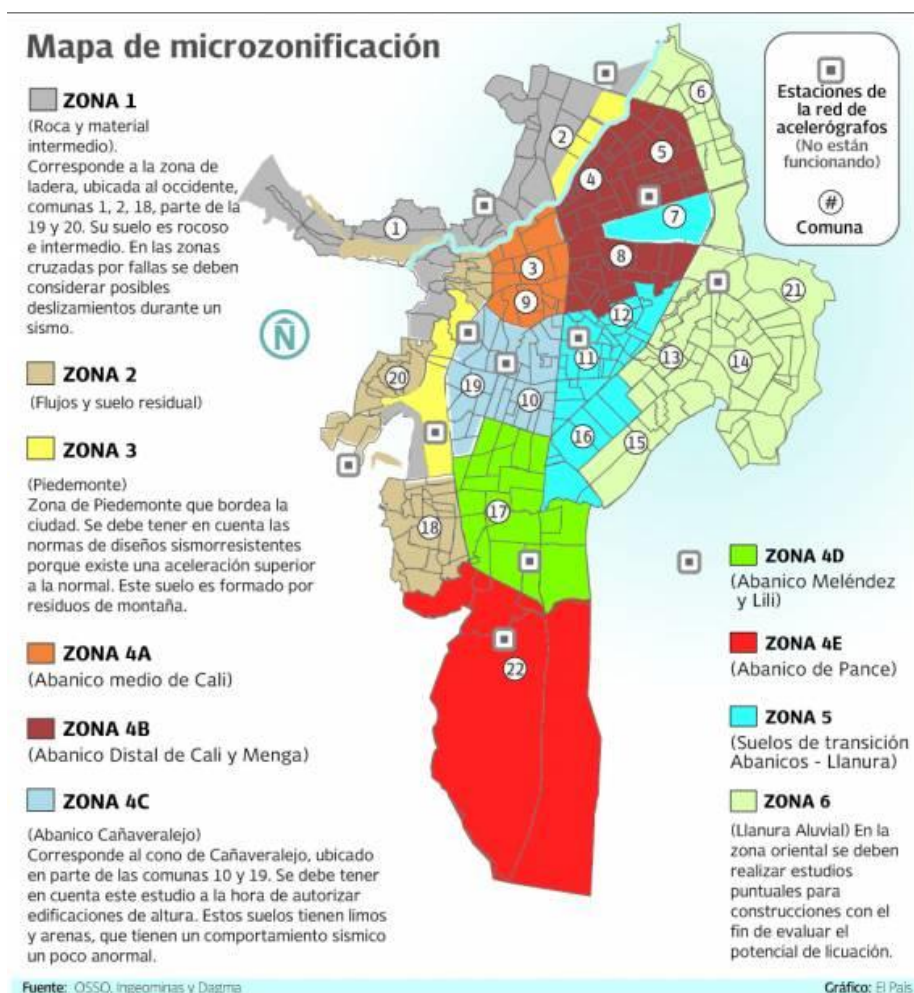


Figura 18: Microzonificación sísmica de Santiago de Cali.
(Redacción de EL País, 2017)

De otra parte, los estudios de microzonificación sísmica tienen como uno de sus propósitos dividir un área pequeña, como una ciudad, en zonas que tienen una respuesta del suelo particular frente a las excitaciones posibles del basamento rocoso, las cuales denomina microzonas. Además, a partir de la caracterización de dicha respuesta del suelo, estos estudios definen un espectro de aceleraciones de diseño para cada una de las microzonas identificadas. En este sentido, los estudios de microzonificación sísmica complementan los estudios de amenaza sísmica regional toda vez que los primeros determinan los movimientos sísmicos en superficie mientras que los últimos definen estos movimientos en el basamento rocoso (con este fin, las microzonificaciones tienen en cuenta los efectos de los estratos de suelo sobre la señal proveniente del basamento rocoso). Aunado a estos efectos de los suelos, las microzonificaciones también evalúan la influencia sobre la señal que tienen aspectos como la topografía y la presencia de cuencas, entre otros (Kramer, 1996).

Las microzonas establecidas a partir del estudio (DAGMA; INGEOMINAS, 2005) se muestran en la Figura 18.

Capítulo 4 METODOLOGÍA

Este trabajo de grado realiza una comparación del comportamiento estructural y de costos de los materiales de construcción que demanda una edificación de PRM, con aislamiento sísmico de base, de 8 niveles y de concreto reforzado frente a la edificación homóloga convencional para distintas condiciones de suelo. Con este propósito se diseña un total de 9 edificios, los cuales observan distintas condiciones de apoyo, de deriva y de tipo de suelo, como se indica a continuación:

Grupo	Condición de Apoyo	Tipo de sistema estructural	Deriva observada	Perfiles de suelo observados	Incluye Diseño Cimentación
1	Con Aislamiento Sísmico	PRM	0,30%	B, D y E	Sí
2	Con Aislamiento Sísmico	PRM	0,40%	B, D y E	No
3	Con Base Fija	PRM	1,00%	B, D y E	Sí

Tabla 3: Características de las edificaciones diseñadas.

En la tabla anterior, cada grupo está conformado por 3 edificios, cada uno de los cuales corresponde a cada tipo de suelo.

De otra parte, el desarrollo general de esta investigación comprende los siguientes pasos, cada uno de los cuales se desarrolla en el Capítulo 5

1. Selección de los tipos de suelo donde se implantan las construcciones a partir de su espectro de aceleraciones indicado en la microzonificación sísmica de Cali. Como se indicó en 3.10, la extensión de la meseta de aceleraciones dentro del espectro indica la rigidez del estrato de apoyo al señalar la parte del contenido ondulatorio de la señal sísmica que sufre amplificación.
2. Selección del proyecto estructural mediante consulta de proyectos estructurales reales en distintas fuentes. Este proyecto debe cumplir con las condiciones de presentar regularidad en planta y en altura y se ajusta en el marco de esta investigación a los requisitos de diseño indicados con anterioridad.
3. Análisis y Diseño estructural de cada una de las edificaciones observando la normativa pertinente. Para el caso de las edificaciones aisladas, su análisis se adelanta con base en el FEMA P-1050 de 2015 mientras que en su diseño se atiende a lo consignado en la NSR-10. Por el contrario, tanto el análisis y diseño de las estructuras con base fija se observa únicamente la NSR-10.
4. Diseño geotécnico y de la cimentación para 6 estructuras: para adelantar el diseño geotécnico se acude a un especialista quien se encarga de elaborar las

recomendaciones de cimentación y define los parámetros necesarios para su diseño estructural. Dicho estudio se adelanta a partir de las descripciones de los perfiles de suelo dadas en el Estudio de Microzonificación Sísmica de Cali, suponiendo valores teóricos para las propiedades de los suelos observados. Posteriormente, con base en estas recomendaciones anteriores y en los resultados de los diseños de las superestructuras, se adelanta el diseño de las cimentaciones.

5. Comparación del comportamiento estructural de las edificaciones. A partir de los resultados del análisis de cada edificación, se seleccionan parámetros de interés para su comparación. Las variables de interés consisten en solicitaciones, comportamiento estructural y de los aisladores. Dentro del comportamiento estructural se encuentran los períodos fundamentales de vibración, los desplazamientos de la base y de cada piso, sus derivas y el porcentaje de participación modal de cada modo de vibración. Dentro de las solicitaciones se encuentran los cortantes basales y los cortantes elásticos e inelásticos en cada uno de los pisos. Dentro del comportamiento del sistema de aislamiento se encuentran su desplazamiento máximo, su deformación por corte, su rigidez efectiva y la energía histerética que disipan.
6. Cálculo de las cantidades de obra a partir de las secciones y su refuerzo obtenidos en el paso de diseño.
7. Consulta de costos de los insumos de obra en distintas fuentes. Para el caso del concreto y acero, se consulta la fuente ConstruData mientras que para el caso de los aisladores sísmicos, distribuidores de estos dispositivos en el país.
8. Comparación de costos de cada edificación. A partir de los precios de los insumos y las cantidades de obra, se calcula el costo de cada estructura y se hacen las respectivas comparaciones.

En cuanto al diseño del sistema de aislamiento sísmico, en esta investigación se propone la siguiente metodología, la cual parte de dispositivos tomados de catálogos de fabricantes. Ésta se formula a partir de las referencias (Aguiar et al., 2016; Aguiar, Castillo, et al., 2014; AIS-180, 2013; Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020; Dynamic Isolation Systems Inc, 2007; FEMA & BSSC, 2015, 2016) y está orientada a análisis lineales que son los que conforman el alcance de esta investigación. A continuación se comenta brevemente esta metodología propuesta:

1. Construcción de las curvas de aceleraciones y desplazamientos para un $T_r=2.475$ años con $\xi=5\%$ (MCER).

2. Definición del período T_m , amortiguamiento β_m y desplazamiento D_m objetivos para el sistema de aislamiento a partir del espectro de desplazamientos y aceleraciones MCER: En este paso se deben de observar primero 3 condiciones: **1)** La elección de T_m debe de ser tal que el mismo esté comprendido en el rango de 2-3 s para que el aislamiento sea

satisfactorio en cuanto a la reducción de intensidad de movimiento inducido a la superestructura. Si este rango de períodos resulta muy elevado para la estructura, se debe observar que T_m sea como mínimo 3 veces el período de la estructura convencional. **2)** Así mismo, el establecimiento del factor de amortiguamiento debe ser tal que el amortiguamiento del sistema de aislamiento, β_m , no exceda el 30% con el propósito de poder emplear análisis lineales y que el amortiguamiento necesario pueda ser suplido en su totalidad por los aisladores sísmicos. Por este motivo, B_m debe ser inferior a 1,7. Igualmente, **3)** al establecer D_m se debe de observar que el mismo esté acotado por arriba por un valor de 40-45 cm para que éste no resulte excesivo respecto a los aisladores comerciales para edificaciones.

Ahora, con base en todo lo anterior, la manera de proceder en esta etapa consiste en tomar primero un valor de desplazamientos del espectro de desplazamientos MCEr que cumpla con las condiciones para el período T_m indicadas. Posteriormente, se divide este desplazamiento entre un factor de amortiguamiento B_m que observe el límite indicado para obtener así el D_m deseado. En este punto se debe de verificar que el D_m así obtenido sea adecuado según lo indicado anteriormente. Una vez definido B_m , se establece su correspondiente relación de amortiguamiento β_m a partir de la referencia FEMA P-1050 (tabla 17.5-1). En caso de que B_m sea superior a 1,7 para cumplir con el límite superior de D_m , se debe de evaluar el empleo de amortiguadores viscosos adicionales para cumplir con este requisito. Pues los dispositivos de aislamiento sísmico no ofrecen relaciones de amortiguamiento superiores a 30%. Otra alternativa consiste en disminuir T_m (para disminuir D_m) y volver a hacer el ejercicio propuesto.

3. Calcular D_{Tm} y proponer un primer sistema de aislamiento: Se calcula D_{Tm} según el FEMA P-1050 y se configura un primer sistema de aislamiento de manera tal que cada uno de los dispositivos empleados tenga una capacidad de desplazamiento como mínimo igual a D_{Tm} . Los dispositivos se seleccionan con base en catálogos de fabricantes y deben de combinar el uso de aisladores LRB, LDRB y Deslizadores con el fin de que el sistema sea lo suficientemente flexible (Deslizadores y LDRB) y, a la vez, cuente con algún grado de disipación de energía (LRB). Así mismo, disponga de la suficiente fuerza restauradora para recentrar la estructura (LRB, LDRB).

4. Verificación del sistema de aislamiento: Se establecen las propiedades del sistema de aislamiento (k_m) y las correspondientes de la estructura aislada (T_m y D_m) a partir de la configuración de dispositivos seleccionada. Se debe de verificar que los valores para T_m y D_m obtenidos sean lo más iguales posible a los escogidos en el paso 2 para continuar con el proceso. En caso contrario, se debe de proponer otra configuración del aislamiento sísmico.

5. Verificación de la fuerza restauradora del sistema de aislamiento sísmico: Se verifica que el sistema propuesto cumpla con los requisitos impuestos por el FEMA P-1050 en cuanto a la magnitud mínima de la fuerza restauradora, la cual depende básicamente de la rigidez post-fluencia k_2 del sistema.

6. Modelación de la estructura, ejecución del análisis sísmico y obtención de las fuerzas de diseño tanto para la superestructura como para la infraestructura (sistema de aislamiento y cimentación): Este paso se ejecuta de manera similar a como se haría el

diseño de una estructura convencional, pero se deben de observar las indicaciones del FEMA P-1050 en su capítulo 17 en cuanto a los factores de escalado, valores límites y coeficientes de reducción de fuerzas sísmicas.

7. Diseño de la superestructura, verificación de la deriva de piso máxima: Este paso se ejecuta de igual manera a como se haría cuando se adelanta el diseño de una estructura convencional.

8. Diseño de los aisladores y verificación de su estabilidad: Este paso se ejecuta según lo indicado en 3.8.1. Consiste en tomar las solicitaciones que establece el software para cada dispositivo de aislamiento (u y P_u) y verificar que **1)** las presiones sobre cada dispositivo no excedan las consignadas en el catálogo (tanto de compresión como de tensión), **2)** los controles de deformación, γ , y **3)** el pandeo tanto en la posición no deformada como deformada.

A continuación se esquematiza, por medio de un diagrama de flujo, la metodología descrita anteriormente (ver Figura 19). Adicionalmente, se incluye la Tabla 4 y la Tabla 5, las cuales contienen la nomenclatura y las ecuaciones con base a las que se desarrolla el proceso de diseño propuesto de los sistemas de aislamiento sísmico.

B_m	Factor de amortiguamiento. Es función de β_m	A_l	Área del núcleo de plomo
T_m	Período efectivo de la estructura bajo el desplazamiento D_m	D_b	Diámetro del aislador
D_m	Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento sísmico	G	Módulo de corte del caucho
β_m	Relación de amortiguamiento efectiva para el desplazamiento D_m	E_h	Energía histerética disipada por cada unidad de aislamiento en un ciclo
γ	Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y un aislador. y se mide de manera perpendicular a la dirección de aplicación del sismo	E_{el}	Energía elástica almacenada por cada unidad de aislamiento en un ciclo
P_T	Razón entre el período traslacional del sistema de aislamiento y su período rotacional (ver FEMA P-1050 17.5.3.3)	T_l	Período correspondiente al inicio de la zona de aceleraciones constantes en el rango de períodos largos

e	Excentricidad total (real + accidental) de la superestructura y el sistema de aislamiento	A_r	Área efectiva
b	Dimensión más corta de la planta de la estructura	U_{max}	Solicitación de desplazamiento del aislador para la combinación bajo análisis
d	Dimensión más larga de la planta de la estructura	P_{crít}	Resistencia al pandeo
τ_{y,l}	Esfuerzo de fluencia del núcleo de plomo. Se toma como 9-10 Mpa	P_u	Solicitación vertical sobre el aislador
D_l	Diámetro del núcleo de plomo: debe estar comprendido entre 1/3 y 1/6 el diámetro del aislador	σ_n	Resistencia a cargas verticales del aislador

Tabla 4: Nomenclatura para el procedimiento de diseño del sistema de aislamiento sísmico
(Aguar et al., 2016; Aguiar, Castillo, et al., 2014; AIS-180, 2013; Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020; Dynamic Isolation Systems Inc, 2007; FEMA & BSSC, 2015, 2016)

Ec. 1	Factor de Amortiguamiento	$B_m = \frac{D (\beta = 5\%)}{D_m}$	Ec. 11	Rigidez Efectiva del sistema de aislamiento	$k_m = \sum_{i=1}^n k_{m,i}$
Ec. 2	Desplazamiento Máximo Total	$D_{TM} = D_m \left[1 + \left(\frac{y}{p_r^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$	Ec. 12	Período Efectivo	$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_m}}$
Ec. 3	Rigidez Característica	$Q_d = A_l \tau_{y,l}; \tau_{y,l} = 9-10 \text{ MPa}$	Ec. 13	Fuerza restauradora	$k_2 D_m + 2,5\% W \geq k_2 0,5 D_m$
Ec. 4	Rigidez Post-fluencia	$k_2 = \frac{GA}{T_r} = G\pi \frac{(D_b^2 - D_l^2)}{4T_r}$	Ec. 14	Área Efectiva	$A_r = A \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\pi} \right), \theta = 2 \arccos \left(\frac{u_{max}}{D_b} \right)$
Ec. 5	Rigidez Inicial	$k_1 = 10 k_2$	Ec. 15	Carga Pandeo Crítica	$P_{crít} = 0,218 \frac{GD_b^4 \left(1 - \frac{D_l}{D_b} \right) \left(1 - \frac{D_l^2}{D_b^2} \right)}{t_r T_r \left(1 + \frac{D_l^2}{D_b^2} \right)}$
Ec. 6	Rigidez Efectiva	$k_m = \frac{Q_d}{D_m} + k_2$	Ec. 16	Carga Crítica Pandeo Reducida	$P'_{crít} = P_{crít} \frac{A_r}{A}$ donde $P'_{crít} > 0,15 P_{crít}$
Ec. 7	Desplazamiento de Fluencia	$D_y = \frac{Q_d}{(k_1 - k_2)}$	Ec. 17	Controles Carga Pandeo	$\frac{P_{crít}}{P_u} > 2$ (Carga Grav) y $\frac{P_{crít}}{P_u} > 1,1$ (Con Sismo)
Ec. 8	Energía Histerética	$E_h = 4Q_d (D_m - D_y)$	Ec. 18	Capacidad de Carga	$\frac{P_u}{A_r} \leq \sigma_n$
Ec. 9	Energía Elástica	$E_{el} = k_m D_m^2$	Ec. 19	Ausencia de Levantamientos	$\sigma_{Tracción} \leq 3G$
Ec. 10	Relación de amortiguamiento efectiva del sistema de aislamiento	$\beta_m = \frac{1}{2\pi} \sum \frac{E_{h,i}}{E_{el,i}}$			

Tabla 5: Ecuaciones del procedimiento para el diseño del sistema de aislamiento sísmico
(Aguar et al., 2016; Aguiar, Castillo, et al., 2014; AIS-180, 2013; Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020; Dynamic Isolation Systems Inc, 2007; FEMA & BSSC, 2015, 2016).

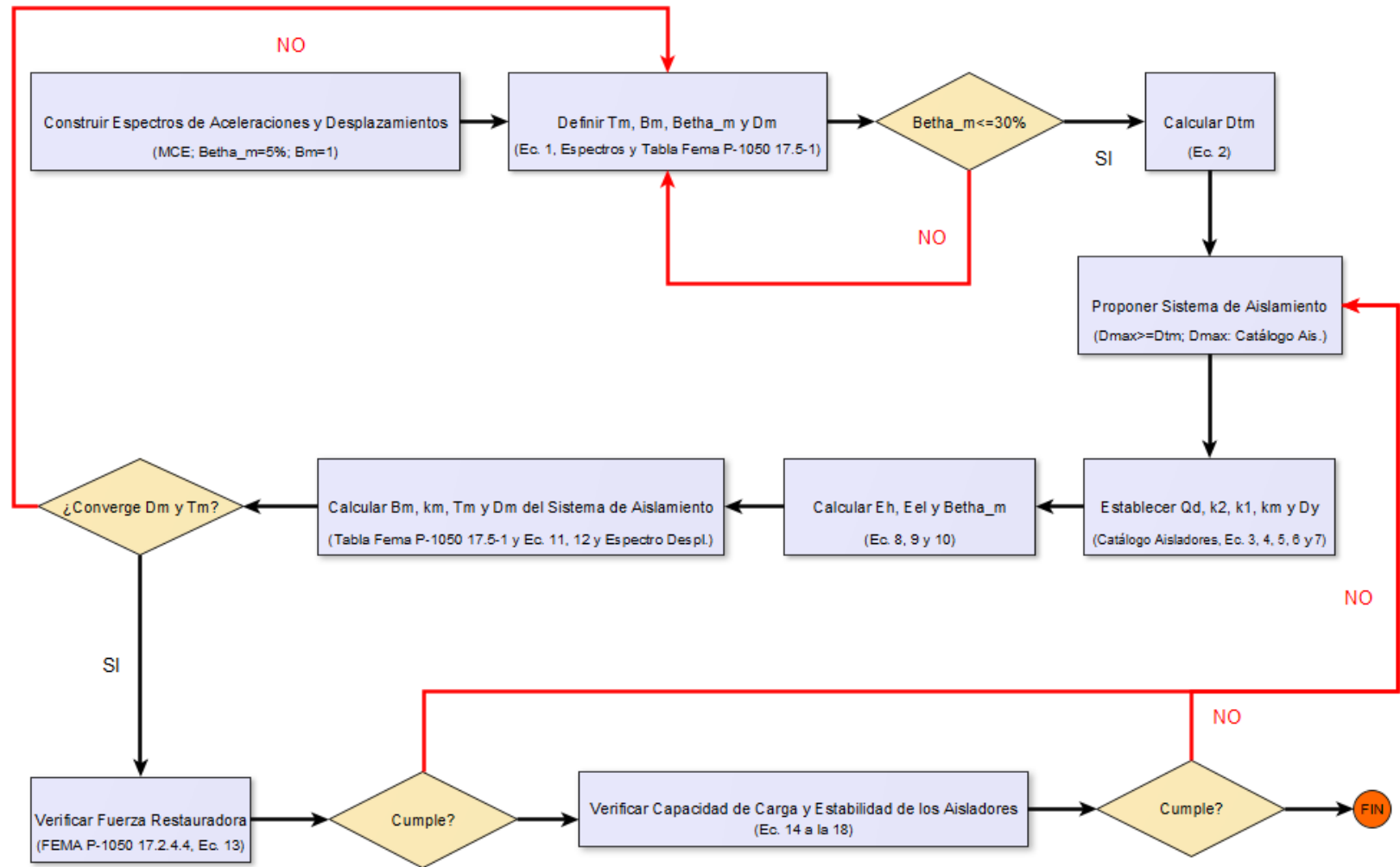


Figura 19: Diagrama de flujo del procedimiento para el diseño del sistema de aislamiento sísmico (Aguar et al., 2016; Aguiar, Castillo, et al., 2014; AIS-180, 2013; Comunidad para la Ingeniería Civil, 2020; Dynamic Isolation Systems Inc, 2007; FEMA & BSSC, 2015, 2016).

Capítulo 5 DESARROLLO

5.1 Proyecto de investigación

5.1.1 Generalidades

Para este estudio, la ubicación del proyecto fue supuesta en la ciudad de Cali porque la misma cuenta con un estudio de microzonificación sísmica y es clasificada como una zona de amenaza sísmica alta. De esta manera, es posible evaluar el desempeño de los SAS bajo efectos de sismos de gran intensidad y, a la vez, tener presente los efectos de sitio por medio de la observación de las respectivas curvas de aceleraciones de diseño. Por estas razones, se supuso la ubicación del edificio en Cali.

Respecto a las 3 microzonas seleccionadas para realizar esta investigación, las mismas se escogieron observando la forma de su espectro de aceleraciones de diseño porque, como se indicó en 3.10, la extensión de la meseta de aceleraciones dentro del espectro indica la rigidez del estrato de apoyo al señalar la parte del contenido ondulatorio de la señal sísmica que sufre amplificación. Consecuentemente, las 3 microzonas seleccionadas para realizar el estudio son las siguientes:

- Suelo Firme (Tipo B): Microzona Cerros.
- Suelo Intermedio (Tipo D): Microzona Abanico de Meléndez y Lili.
- Suelo Blando (Tipo E): Microzona Abanico Distal de Cali y Menga.

Los parámetros que definen los espectros de diseño de cada microzona se muestran en la Tabla 6. Adicionalmente, los espectros de aceleraciones se muestran en la Figura 20, para la situación convencional, y en la Figura 21, para la condición con aislamiento.

Amenaza Sísmica Alta		Aa=0,25	Av=0,25			
Microzona	Tipo de Suelo	Tc	Fa	TI	Fv	
Cerros	Firme (B)	0,55	0,86	3,0	0,99	
Abanico de Meléndez y Lili	Intermedio (D)	1,2	0,99	2,0	2,48	
Abanico Distal de Cali y Menga	Blando (E)	Tc	0,7	1,04	2,5	1,52
		TI	1,6	0,8	2,5	2,67

Tabla 6: Parámetros que definen los espectros de aceleraciones de las microzonas seleccionadas.
Adaptado de (DAGMA; INGEOMINAS, 2005)

Es pertinente resaltar que el estudio de microzonificación sísmica de Cali define 2 espectros de diseño para la microzona de Abanico Distal de Cali y Menga: una para períodos cortos y otra para períodos largos. De esta manera, el espectro de diseño que se debe considerar en la etapa de diseño consiste en la curva que envuelve cada uno de los espectros independientes señalados. Esta observación explica el motivo de que la curva de aceleraciones de la

microzona en mención presenta 2 mesetas (una pertenece a la curva de períodos cortos y la otra a la de períodos largos).

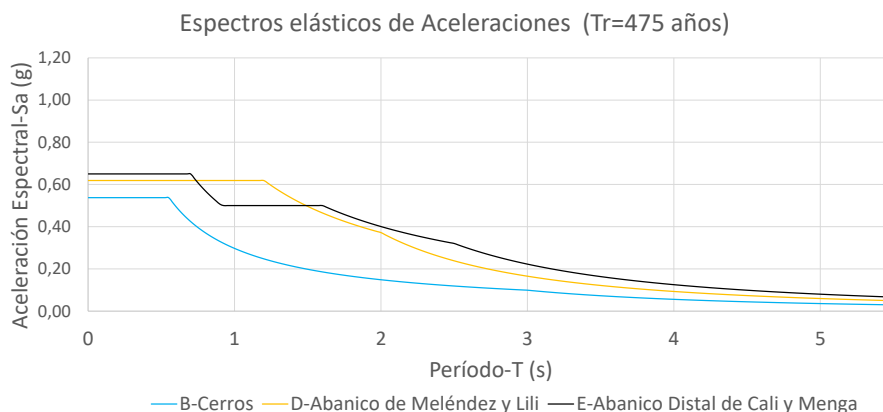


Figura 20: Espectros de derivas para las edificaciones convencionales.

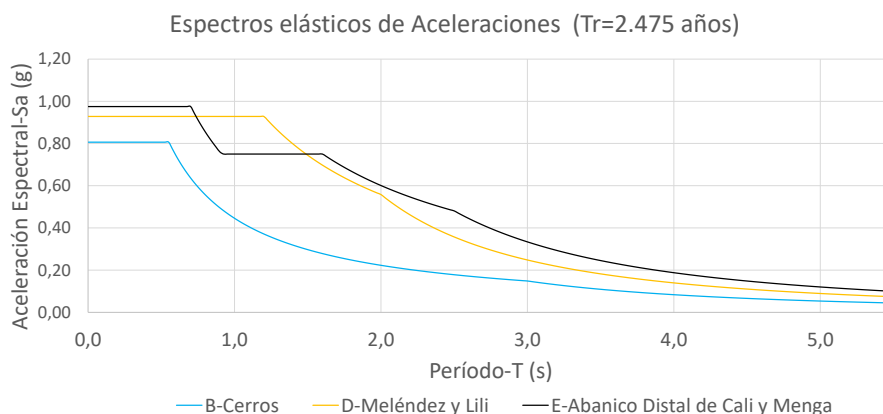


Figura 21: Espectros de aceleraciones para las edificaciones con aislamiento sísmico

La edificación está destinada a oficinas en lo que respecta a la definición de la carga viva y el factor de importancia para el análisis y diseño de los elementos estructurales.

5.1.2 Normativa

El análisis y diseño estructural de las 3 edificaciones convencionales se realiza de acuerdo con el reglamento de construcciones sismo resistentes NSR-10 mientras los 6 edificios con aislamiento sísmico de base se diseñan según el FEMA P-1050 de 2.015, haciendo las referencias pertinentes al reglamento NSR-10 cuando se requiere (p. ej. evaluación de cargas, irregularidades, definición del sistema estructural, factores de disipación de energía y diseño del sistema estructural).

5.1.3 Descripción general del proyecto estructural

Dado que el desarrollo de esta investigación requiere de un proyecto real, en su desarrollo se desarrolló una propuesta estructural que se formuló con base en el proyecto de la referencia (Chuman & Valladares, 2017) (ver Figura 22-a). Como resultado de este ejercicio, se estableció que las estructuras convencionales y aisladas tengan un sistema de resistencia sísmica como el mostrado en la figura Figura 22-b.

De conformidad con lo anterior, los ajustes realizados al proyecto de la referencia consisten en desproveer la planta estructural de los muros de cortante perimetrales y de los núcleos que albergan el foso del ascensor y las escaleras. De esta manera, el foso del ascensor es integrado al pórtico general, haciendo que el mismo se mueva de manera conjunta con la estructura en caso de sismo. Igual sucede con las escaleras, las cuales se integran a la estructura general, y se proyecta se moverán con la misma bajo la acción de un sismo.

Lo anterior es posible ya que la estructura no cuenta con niveles por debajo del nivel base, los cuales harían más compleja la integración del ascensor a la estructura general con aislamiento sísmico debido a los grandes desplazamientos de este nivel que afectarían el eje del ascensor, ocasionando posibles golpeteos del elevador con el pórtico general.

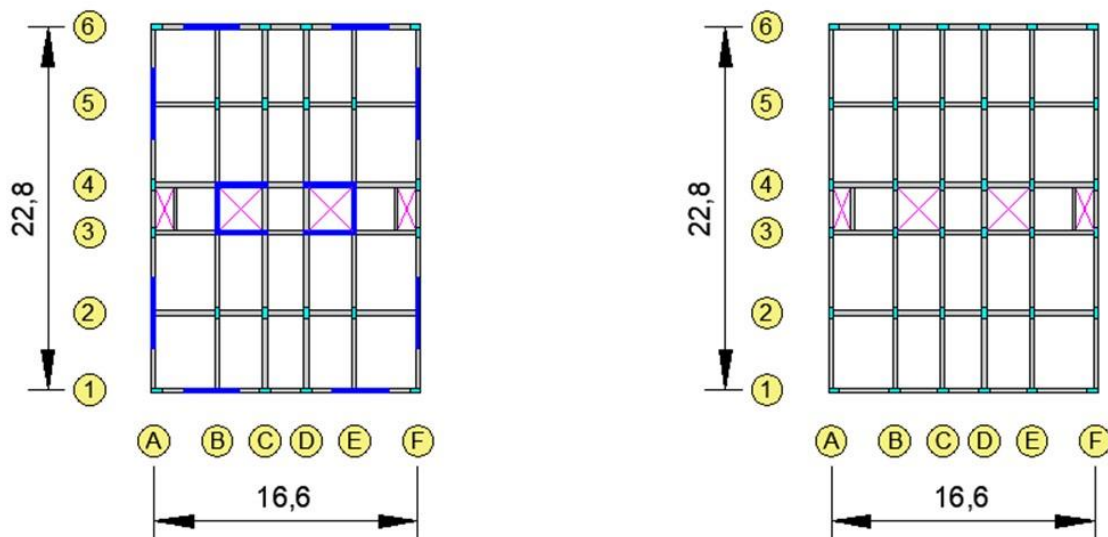


Figura 22: Planta estructural original de la investigación fuente (a) y propuesta desarrollada para la presente investigación (b).

Adaptado de (Chuman & Valladares, 2017)

En cuanto a su grado de disipación de energía, este Pórtico Resistente a Momentos en concreto reforzado es tipo DES, según los requisitos sísmicos de la NSR-10 para zonas de amenaza sísmica alta.

Para definir las cargas vivas mínimas, fue considerada una ocupación de oficinas con un factor de importancia igual a 1.

5.2 Edificaciones convencionales

5.2.1 Descripción estructural de las edificaciones

De acuerdo con la descripción general del sistema estructural para esta situación y los requisitos de la NSR-10 para zonas de amenaza sísmica alta, la estructura se clasifica como de tipo *PRM* con un grado de capacidad de disipación de energía *DES*. Sus dimensiones generales y especificaciones se indican a continuación.

Para todos los elementos estructurales de la superestructura, se considera un concreto de resistencia f'_c de 28 MPa y acero corrugado estructural de f_y de 420 MPa.

Las dimensiones de las secciones estructurales del proyecto convencional para los 3 distintos tipos de suelos que se analizan, son las siguientes (ver Figura 23):

Tipo Suelo		Suelo B	Suelo D	Suelo E	Identificador
Cubierta (Aligerada)		H=0,35 m			
Entrepiso (Aligerada)		H=0,40 m			
Vigas	Cubierta (X,Y)	0,25x0,35 m			
	P6-P7 (X)	0,25x0,40 m	0,25x0,40 m		
	P1-P5 (X)	0,25x0,50 m	0,30x0,50 m		
	P6-P7 (Y)	0,35x0,40 m	0,35x0,40 m		
	P1-P5 (Y)	0,35x0,50 m	0,35x0,50 m		
Columnas	P2-P8	0,40x0,55m	0,65x0,75 m	0,65x0,80 m	
	P1	0,45x0,60 m	0,75x0,80 m	0,75x0,85 m	

Tabla 7: Dimensiones de los elementos estructurales de los edificios convencionales

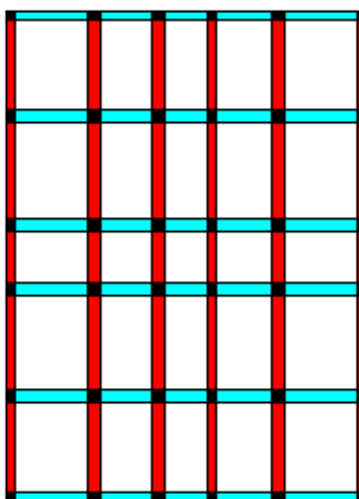


Figura 23: Disposición de las columnas y vigas en el sistema estructural de los edificios convencionales

La cimentación de esta edificación es de tipo profunda y está conformada por grupos de 4 pilotes que trabajan en grupo. Cada grupo de pilotes se ubica bajo cada una de las 36

columnas. El diámetro y la longitud de cada grupo de pilotes varían según el apoyo al cual le brindan soporte debido a la diferencia de solicitaciones. Un resumen general se indica a continuación:

Tipo Suelo	Suelo B	Suelo D	Suelo E
Diámetro de los pilotes	0,5 m	0,6 m	0,6 m y 0,8 m
Longitudes de los pilotes	4 - 5 - 6,5 m	4 - 5 - 6,5 m	4 - 5,5 - 6,5 m

Tabla 8: Dimensiones generales de los pilotes que conforman la cimentación de los edificios convencional con sistema de PRM y deriva máxima permisible de 1,0%.

5.2.2 Elaboración del modelo de elementos finitos de las edificaciones convencionales

Se realiza el modelo tridimensional de la estructura convencional mediante el software ETABS 2015 empleando elementos tipo frame para columnas y vigas, y shell para losas de entrepiso y cubierta. Éstos últimos son de tipo membrana trabajando en una dirección y se emplean solamente para distribuir su carga a las vigas. En total, el modelo incluye 840 elementos frame, y 234 elementos tipo shell.

Los apoyos de las columnas fueron restringidos totalmente, idealizados con un apoyo fijo (empotrado).

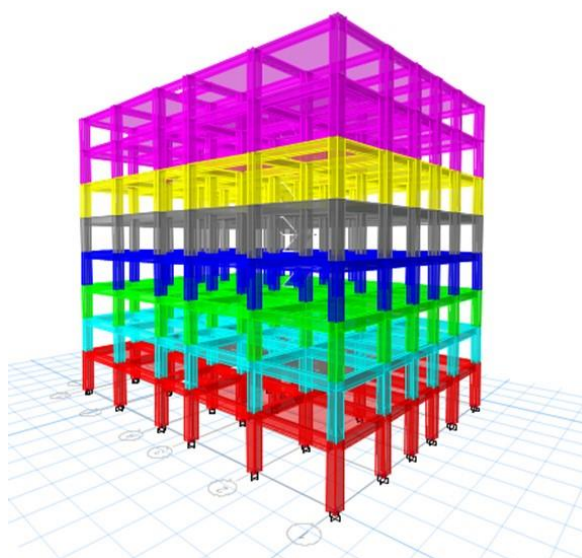


Figura 24: Vista del modelo de elementos finitos de la edificación de sistema estructural PRM convencional.

Las cargas que se consideran corresponden a las **cargas muertas** que comprenden las cargas del peso propio de los elementos estructurales de concreto reforzado (incluye escalera), para el cual se considera un peso específico de 24 kN/m³, y las de los elementos no estructurales. Éste último comprende los efectos del peso de elementos tales como entrepiso (4,42 kN/m²), cubierta (4,17 kN/m²), muros divisorios (1,98 kN/m²) y fachadas (7,25 kN/m). Adicionalmente, se consideran las **cargas vivas** con magnitudes de 2 kN/m² y 3 kN/m² para las oficinas y áreas comunes (incluye escaleras), respectivamente. Así mismo, para las vigas

no cargueras orientadas en la dirección X, se les asigna una carga muerta y viva correspondiente al doble de la carga que soporta un nervio del sistema de entepiso, como lo establece la norma cuando se emplean losas aligeradas en una dirección.

Igualmente, se observa la **carga sísmica**, cuya descripción se hace más adelante.

Las combinaciones consideradas para las estructuras convencionales corresponden a las indicadas en el título B del reglamento de construcciones sismo-resistentes NSR-10, tanto para las situaciones de *Verificación de la Deriva*, *Diseño de los elementos estructurales* y *Verificación de la capacidad portante de la cimentación*. Estas combinaciones se indican a continuación:

Combinación	CM		CV		Ex		Ey
1	1,4						
2	1,2	+	1,6				
3	1,2	+	1,0	+/-	1,0		
4	1,2	+	1,0			+/-	1,0
5	0,9			+/-	1,0		
6	0,9					+/-	1,0

Tabla 9: Combinaciones de carga para la verificación de la deriva (NSR-10, 2010)

Combinación	CM		CV		Ex		Ey
1	1,4						
2	1,2	+	1,6				
3	1,2	+	1,0	+/-	1,0/R	+/-	0,3/R
4	1,2	+	1,0	+/-	0,3/R	+/-	1,0/R
5	0,9			+/-	1,0/R	+/-	0,3/R
6	0,9			+/-	0,3/R	+/-	1,0/R

Tabla 10: Combinaciones de carga para el diseño de los elementos estructurales (NSR-10, 2010)

Combinación	CM		CV		Ex		Ey
1	1,0	+	1,0				
2	1,2	+	1,0	+/-	0,7/R		
3	1,2	+	1,0			+/-	0,7/R

Tabla 11: Combinaciones de carga para la verificación de la capacidad portante de la cimentación (NSR-10, 2010)

El coeficiente de capacidad de reducción de energía, R, considerado para la superestructura es 7 de acuerdo con los lineamientos del reglamento para sistemas de PRM-DES. Por su parte, el factor de importancia definido para la edificación es 1 toda vez que su grupo de uso es I (edificio de oficinas).

Para el diseño de los elementos estructurales tipo frame, se les asigna la propiedad *sway special*.

Las verificaciones de diseño de los elementos estructurales incluyen el criterio de viga débil-columna fuerte y las dimensiones de la unión viga-columna.

5.2.3 Análisis sísmico

En esta investigación se consideran los requisitos mínimos en el reglamento NSR-10. Consecuentemente, la modalidad de análisis sísmico seguida para los 3 casos corresponde a la del Método de la Fuerza Horizontal Equivalente. El factor R que se emplea es de 7 toda vez que no hay ningún tipo de irregularidades.

El análisis y diseño de las estructuras sin aislamiento observa el sismo de diseño cuyo período de retorno es de 475 (10%/50 años). Estos espectros para los 3 distintos tipos de suelo se esquematizan en la Figura 25.

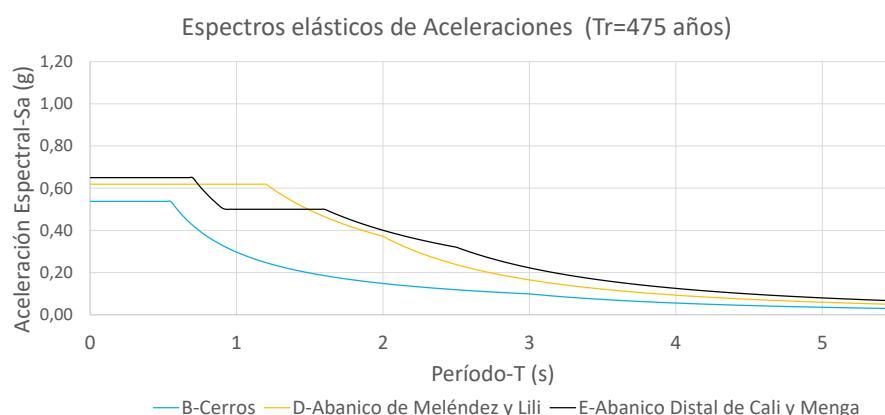


Figura 25: Espectros de derivas para las edificaciones convencionales.

5.2.4 Cimentación

La cimentación de la edificación convencional es de tipo profunda y está conformada por grupos de 4 pilotes que trabajan en grupo. Cada grupo de pilotes se ubica bajo cada una de las 36 columnas. El diámetro y la longitud de cada grupo de pilotes varían según el apoyo al cual le brindan soporte debido a la diferencia de solicitaciones. Un resumen general se indica a continuación:

Tipo Suelo	Suelo B	Suelo D	Suelo E
Diámetro de los pilotes	0,5 m	0,6 m	0,6 m y 0,8 m
Longitudes de los pilotes	4 - 5 - 6,5 m	4 - 5 - 6,5 m	4 - 5 - 6,5 m

Tabla 12: Dimensiones generales de los pilotes que conforman la cimentación de los edificios convencionales

5.3 Edificaciones con aislamiento sísmico de base

5.3.1 Descripción estructural de las edificaciones

De acuerdo con la descripción general del sistema estructural para esta situación y los requisitos de la NSR-10 para zonas de amenaza sísmica alta, la estructura se clasifica como de tipo PRM con un grado de capacidad de disipación de energía DES. Sus dimensiones generales y especificaciones se indican a continuación.

Para todos los elementos estructurales de la superestructura, se considera un concreto de resistencia f'_c de 28 MPa y acero corrugado estructural de f_y de 420 MPa.

Las dimensiones de las secciones estructurales del proyecto con aislamiento de deriva 0,3% para los 3 distintos tipos de suelos que se analizan, son las siguientes (ver Figura 26):

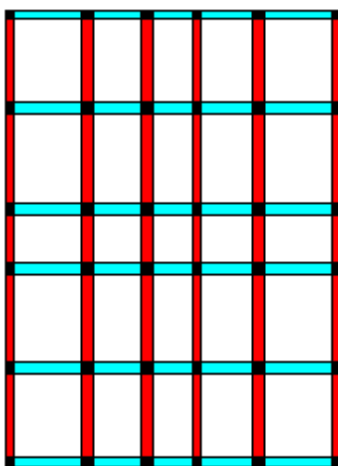


Figura 26: Disposición de las columnas y vigas en el sistema estructural de los edificios aislados de deriva 0,3%.

Tipo Suelo		Suelo B	Suelo D	Suelo E	Identificador
Cubierta (Aligerada)		H=0,35 m			
Entrepiso (Aligerada)		H=0,40 m			
Vigas	Cubierta (X,Y)	0,25x0,35 m			
	P6-P7 (X)	0,25x,40 m	0,30x0,45 m	0,30x0,40 m	
	P4-P5 (X)	0,25x,50 m	0,30x0,60 m	0,35x0,60 m	
	P1-P3 (X)			0,35x0,70 m	
	Nivel Base (X)	0,25x0,50 m	0,35x0,60 m	0,40x0,70 m	
	P6-P7 (Y)	0,35x,40 m	0,35x0,45 m	0,30x0,40 m	
	P4-P5 (Y)	0,35x,50 m	0,35x0,60 m	0,40x0,60 m	
	P1-P3 (Y)			0,40x0,70 m	
	Nivel Base (Y)	0,35x0,50 m	0,35x0,60 m	0,40x0,70 m	
Columnas	Demás Pisos	0,35x0,50 m	0,55x0,60 m	0,60x0,65 m	
	Primer Piso	0,40x0,55 m	0,60x0,65 m	0,70x0,75 m	

Tabla 13: Dimensiones de los elementos estructurales de los edificios con aislamiento sísmico y deriva máxima de 0,3%.

Las dimensiones de las secciones estructurales del proyecto con aislamiento de deriva 0,4% para los 3 distintos tipos de suelos que se analizan, son las siguientes (ver Figura 27):

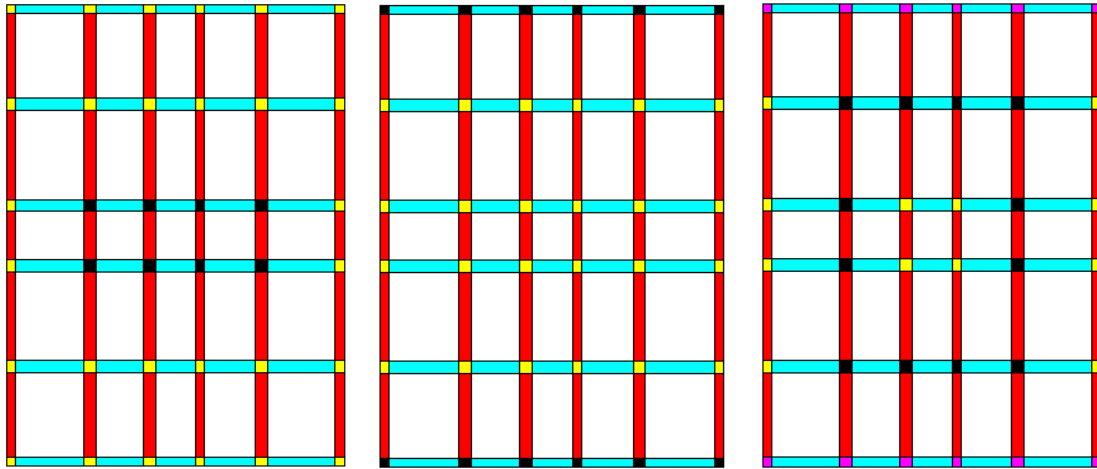


Figura 27: Disposición de las columnas y vigas en el sistema estructural de los edificios aislados de deriva 0,4%. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).

Tipo Suelo		Suelo B	Suelo D	Suelo E	Identificador
Cubierta (Aligerada)		H=0,35 m			
Entrepiso (Aligerada)		H=0,40 m			
Vigas	Cubierta (X,Y)	0,25x0,35 m			
	P6-P7 (X)	0,25x0,40 m	0,30x0,45 m	0,30x0,40 m	
	P4-P5 (X)	0,25x,50 m	0,30x0,60 m	0,35X0,60 m	
	P1-P3 (X)			0,35x0,70 m	
	Nivel Base (X)	0,25x0,50 m	0,35x0,60 m	0,40x0,70 m	
	P6-P7 (Y)	0,35x,40 m	0,35x0,45 m	0,30x0,40 m	
	P4-P5 (Y)	0,35x,50 m	0,35x0,60 m	0,40x0,60 m	
	P1-P3 (Y)			0,40x0,70 m	
	Nivel Base (Y)	0,35x0,50 m	0,35x0,60 m	0,40x0,70 m	
Columnas	Demás Pisos	0,30x0,40 m	0,45x0,50 m	0,50x0,55 m	
	Primer Piso	0,35x0,45 m	0,50x0,55 m	0,55x0,60 m	
Columnas	Demás Pisos	0,35x0,45 m	0,35x0,40 m	0,55x0,60 m	
	Primer Piso	0,40x0,50 m	0,40x0,45 m	0,60x0,65 m	
Columnas	Demás Pisos	N.A.	N.A.	0,45x0,50 m	
	Primer Piso	N.A.	N.A.	0,50x0,55 m	

Tabla 14: Dimensiones de los elementos estructurales de los edificios con aislamiento sísmico y deriva máxima de 0,4%.

5.3.2 Elaboración del modelo de elementos finitos de las edificaciones con aislamiento sísmico de base

Se realiza el modelo tridimensional de la estructura con aislamiento sísmico en la base mediante el software ETABS 2015 empleando elementos tipo frame para columnas y vigas, y Shell para losas de entrepiso y cubierta. Éstos últimos son de tipo membrana trabajando en

una dirección y se emplean solamente para distribuir su carga a las vigas. En total, el modelo incluye 895 elementos frame, y 259 elementos tipo shell.

A los apoyos de las columnas se les asignaron elementos tipo *resorte* con los cuales se modelan los aisladores. Cada uno de estos resortes cuenta con las propiedades *link* que describen el comportamiento lineal de los aisladores o deslizadores, según corresponda al apoyo. En total, el modelo cuenta con 36 elementos de este tipo.

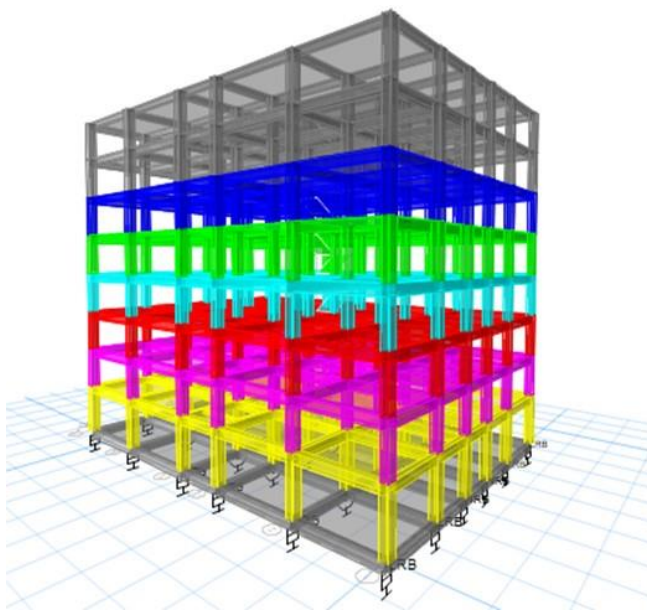


Figura 28: Vista del modelo de elementos finitos de la edificación de sistema estructural PRM y con aislamiento sísmico en la base.

La asignación de cargas en el modelo comprende la carga muerta, sobre-impuesta y viva cuyas magnitudes son idénticas a las indicadas en el numeral anterior para los edificios convencionales. Adicionalmente, el modelo de las estructuras aisladas incluye el nivel base requerido por este tipo de edificios, el cual se encarga de homogenizar los desplazamientos de cada uno de los aisladores (diafragma rígido). Este nivel base no está presente en los edificios convencionales.

Las cargas asignadas a este nivel agregado incluyen el peso de la losa ($4,42 \text{ kN/m}^2$), de los muros divisorios ($2,58 \text{ kN/m}^2$) y de la fachada correspondiente ($8,70 \text{ kN/m}$). Igualmente, este nivel incluye las cargas vivas con magnitudes de 2 kN/m^2 y 3 kN/m^2 para las oficinas y áreas comunes (incluye escaleras), respectivamente. Así mismo, para las vigas no cargueras orientadas en la dirección X, se les asigna una carga muerta y viva correspondiente al doble de la carga que soporta un nervio del sistema de entrepiso, como lo establece la norma cuando se emplean losas aligeradas en una dirección.

Igualmente, se observa la **carga sísmica**, cuya descripción se hace más adelante.

Las combinaciones consideradas para las estructuras con aislamiento sísmico corresponden a las indicadas en el título B del reglamento de construcciones sismo-resistentes NSR-10, tanto para las situaciones de *Verificación de la Deriva*, *Diseño de los elementos estructurales*

y *Verificación de la capacidad portante de la cimentación*. Estas combinaciones se indicaron en la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11 y son muy similares para esta situación con aislamiento sísmico (salvo una excepción que se trata a continuación). Por tanto no se transcriben nuevamente.

Existe una salvedad en las combinaciones anteriores en cuanto a la definición de los factores de mayoración de la carga muerta (de 1,2 y 0,9) en las combinaciones que incluyen sismo. El FEMA P-1050 establece que con el propósito de incluir la aceleración vertical del terreno durante un movimiento sísmico en el análisis estructural, es preciso incrementar/disminuir los valores anteriores por el factor de $0,2 S_{ms}$.

Para el diseño de los elementos estructurales tipo frame, se les asigna la propiedad *sway special*.

Las verificaciones de diseño de los elementos estructurales incluyen el criterio de viga débil-columna fuerte y las dimensiones de la unión viga-columna.

5.3.3 Análisis sísmico

En esta investigación se consideran los requisitos mínimos consignados en el FEMA P-1050. Consecuentemente, la modalidad de análisis sísmico seguida para los suelos tipo B y D corresponde a la del Método de la Fuerza Horizontal Equivalente. Por el contrario, para el tipo suelo E esta norma establece que se debe de adelantar un análisis cronológico no lineal. Sin embargo, dado el alcance que el alcance de esta investigación se circunscribe a métodos lineales, se opta por adelantarse un análisis dinámico modal espectral.

El factor R que se emplea es de 2 de acuerdo con el FEMA P-1050.

El análisis y diseño de las estructuras con aislamiento observa el sismo máximo considerado cuyo período de retorno es de 2.475 años (2%/50 años). Estos espectros para los 3 distintos tipos de suelo se esquematizan en la Figura 29. Adicionalmente, por ser de interés para las estructuras aisladas, se incluyen los espectros de desplazamientos en la Figura 30. Se precisa que todos estos espectros en mención corresponden a un amortiguamiento del 5% y no están afectados por el amortiguamiento adicional provisto por los aisladores.

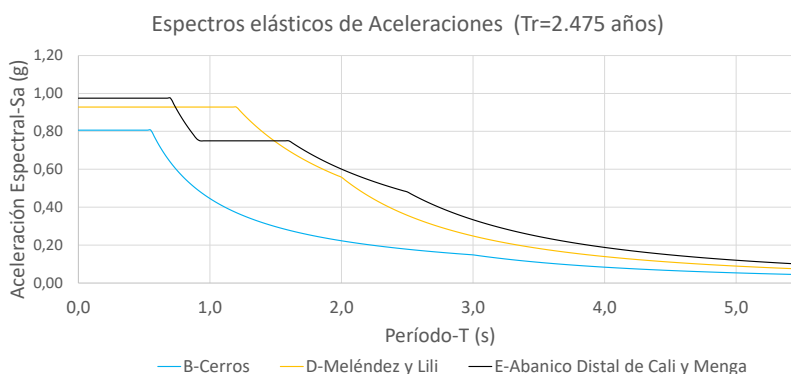


Figura 29: Espectros de aceleraciones para las edificaciones con aislamiento sísmico.

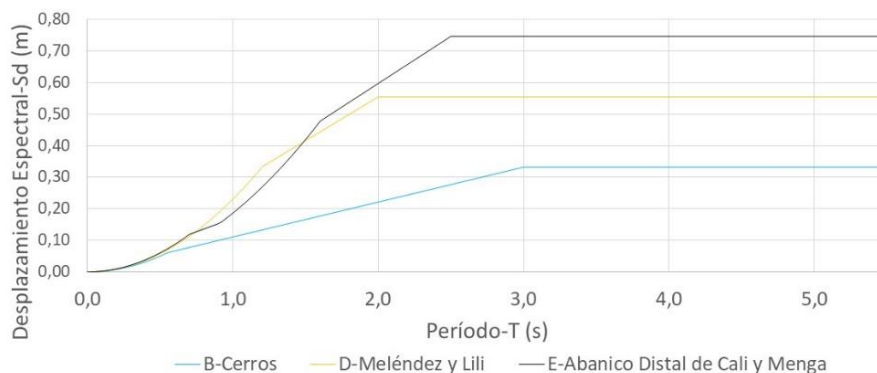


Figura 30: Espectros de desplazamientos para las edificaciones con aislamiento sísmico.

5.3.4 Cimentación

La cimentación de la edificación con aislamiento sísmico es de tipo profunda y está conformada por grupos de 4 pilotes que trabajan en grupo. Cada grupo de pilotes se ubica bajo cada una de las 36 columnas. El diámetro y la longitud de cada grupo de pilotes varían según el apoyo al cual le brindan soporte debido a la diferencia de solicitaciones. Un resumen general se indica a continuación:

Tipo Suelo	Suelo B	Suelo D	Suelo E
Diámetro de los pilotes	0,5 m	0,6 m	0,6 m y 0,8 m
Longitudes de los pilotes	4 - 5 - 7 m	5,5 - 6,5 - 7,5 m	6,5 - 7,5 - 9 m

Tabla 15: Dimensiones generales de los pilotes que conforman la cimentación de los edificios con aislamiento

Se precisa que dentro del alcance de este trabajo de grado no está incluido el cálculo de la cimentación del edificio aislado de deriva 0,4%.

5.3.5 Conformación de los sistemas de aislamiento para cada edificación según el tipo de suelo

La Figura 31 muestra la disposición de los diferentes tipos de dispositivos de aislamiento sísmico empleados para cada estructura en cada uno de los distintos tipos de suelo. Como se muestra, los sistemas de aislamiento sísmico utilizados son híbridos en el sentido de que se hace uso de más de un solo tipo de dispositivo en cada edificación. La razón de esta selección se relaciona con el tipo de efecto buscada en cada edificio según su tipo de suelo, como se explica a continuación:

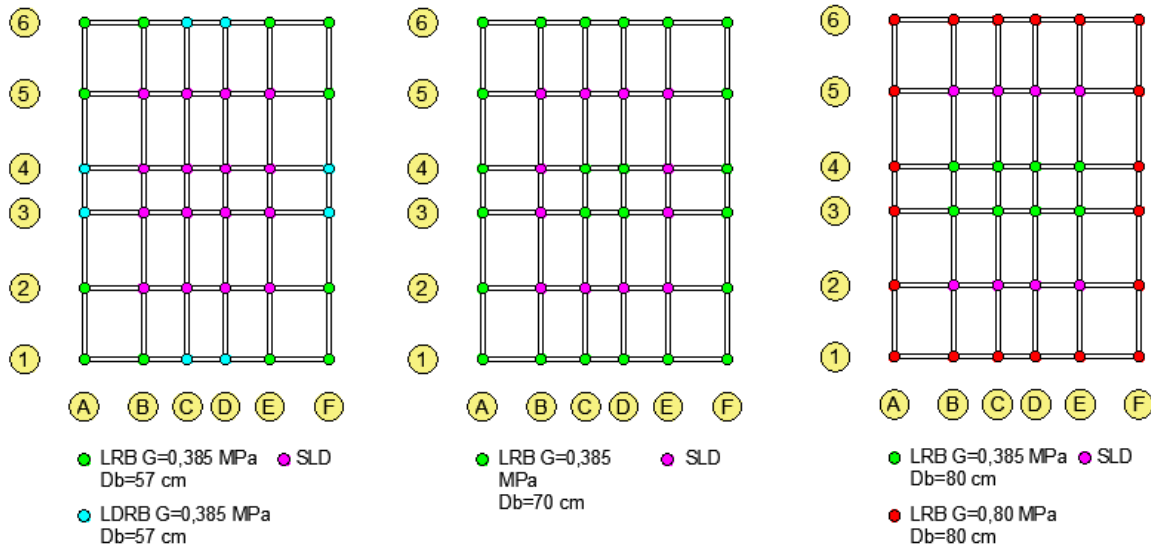


Figura 31: Plantas del sistema de aislamiento de las diferentes edificaciones en los distintos tipos de suelo. Suelo Firme (a). Suelo Intermedio (b). Suelo Blando (c)

- Suelo Firme (B):** Toda vez que los desplazamientos espectrales para este tipo de suelo no resultan excesivos desde el punto de vista de las capacidades de desplazamiento de los aisladores comerciales para edificios, en esta construcción se opta por flexibilizar lo más posible la superestructura sin imponer control a esta variable mediante el amortiguamiento. De esta manera, se opta por maximizar el uso de dispositivos SLD y LDRB a la vez que se minimiza el de los LRB. Por tanto, los apoyos LRB y LDRB se disponen en el perímetro con el fin de que haya una mayor rigidez que mitigue los efectos rotacionales, en tanto que los SLD se instalan en el centro del edificio por ser considerablemente más flexibles. Se precisa que en el perímetro se reemplazan algunos apoyos LRB por LDRB ya que los primeros al proveer amortiguamiento rigidizan más el sistema de aislamiento mientras que los últimos son más flexibles. Es importante mencionar que se debió acudir al uso de dispositivos LDRB en el perímetro también porque los mismos aportan a la fuerza restauradora de la construcción. Por el contrario, al emplear dispositivos SLD, no se cumple con este requerimiento del FEMA P-1050.

En cuanto a los apoyos SLD, los mismos son de bajo coeficiente de fricción, el cual se estima en $\mu=1,5\%$. De acuerdo con expertos en temas de aislamiento sísmico consultados, estos coeficientes de fricción bajos son posibles dando un buen acabado libre de rugosidades a las superficies deslizantes y proveyendo de grasa a las mismas en forma de bolsas dispuestas en estas superficies, las cuales liberan su contenido cuando el edificio se desplaza sobre las mismas bajo la acción de un sismo.

- Suelo Intermedio (D):** En esta situación los desplazamientos espectrales comienzan a tener valores que se deben de controlar mediante el amortiguamiento del sistema de aislamiento sísmico. Con este propósito, en este sistema se emplean únicamente dispositivos LRB y SLD. Por tanto, se ubican los primeros en la periferia del edificio y los segundos en su interior, por las razones expuestas anteriormente para el edificio

en suelo firme. Aunado a esta explicación, en la periferia del edificio se comenzaban a presentar problemas de tensión en los dispositivos, los cuales pudieron controlarse mediante la baja resistencia del caucho a la tensión -3G-. Igualmente, toda vez que en las columnas ubicadas en la periferia de los 2 fosos se comienzan a presentar problemas de tensión debido a que las solicitaciones sísmicas sobre el pórtico se hacen más grandes respecto a la situación de suelo firme, en estos 4 apoyos interiores se proveen dispositivos LRB.

- **Suelo Blando (E):** Al igual que en la situación anterior, se debe de proveer el suficiente amortiguamiento al sistema de aislamiento con el fin de mantener los desplazamientos dentro de un rango aceptable desde el punto de vista de los aisladores comerciales para edificios. Por tanto, se opta por emplear únicamente dispositivos LRB (periferia y apoyos internos con tracción) y SLD (apoyos internos sin problemas de tracción). No obstante, las fuerzas de tensión en la periferia debidas al aumento de las solicitaciones sísmicas para este tipo de suelo, comenzaban a ser problemáticas nuevamente. Así, se opta por incrementar el módulo de corte del caucho empleado en estos dispositivos de la periferia con el fin de que éstos ofrezcan una mayor resistencia a la tensión (3G). Ahora, debido a que el sistema de aislamiento resultaba bastante rígido según las indicaciones anteriores, se optó por incrementar la altura del caucho de los dispositivos aumentando el espesor de las capas de este material de 6 a 8 mm.

A continuación, la Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18, y Tabla 19 indican la cantidad y propiedades de cada uno de los aisladores empleados en los diferentes edificios.

Tipo de suelo/ Ítem	Suelo Firme (B)	Suelo Intermedio (D)	Suelo Blando (E)
Cantidad LRB (un)	12	24	28
Cantidad LDRB (un)	8	0	0
Cantidad SLD (un)	16	12	8
Capacidad de Desplazamiento (mm)	360	460	510
Desplazamiento total máximo (mm)	240/241*	376/376*	397/380*
*Los valores indicados a la izquierda corresponden al sistema de aislamiento para el edificio de deriva 0,3%. Los de la derecha, al de deriva 0,4%			

Tabla 16: Resumen de los tipos de aisladores empleados en los diferentes edificios.

Tipo de suelo/ Ítem	Suelo Firme (B)	Suelo Intermedio (D)	Suelo Blando (E)
Diám. Aislador (mm)	570	700	800
Diám. Núcleo (mm)	110	125	185
τ (MPa)	10	10	10
Qd (kN)	1.080	2.880	7.420
G (MPa)	0,385	0,385/0,5*	0,385 y 0,8
Espesor capa caucho (mm)	6	6/8*	8

Tipo de suelo/ Ítem	Suelo Firme (B)	Suelo Intermedio (D)	Suelo Blando (E)
Cantidad de capas	24	30/30*	33 y 36
Altura caucho (mm)	144	180/240*	288
*Los valores indicados a la izquierda corresponden al sistema de aislamiento para el edificio de deriva 0,3%. Los de la derecha, al de deriva 0,4%			

Tabla 17: Resumen de las características principales de los dispositivos LRB empleados en los diferentes edificios

Tipo de suelo/ Ítem	Suelo Firme (B)	Suelo Intermedio (D)	Suelo Blando (E)
Diám. Aislador (mm)	570	N.A.	N.A.
G (MPa)	0,385	N.A.	N.A.
Espesor capa caucho (mm)	6	N.A.	N.A.
Cantidad de capas	24	N.A.	N.A.
Altura caucho (mm)	144	N.A.	N.A.

Tabla 18: Resumen de las características principales de los dispositivos LDRB empleados en los diferentes edificios

Tipo de suelo/ Ítem	Suelo Firme (B)	Suelo Intermedio (D)	Suelo Blando (E)
Diám. Deslizador (mm)	600	700	800
Diám. Placa Acero (mm)	1.300	1.600	1.800
μ (%)	1,5	1,5	1,5

Tabla 19: Resumen de las características principales de los dispositivos SLD empleados en los diferentes edificios.

Se indica que las características generales de los dispositivos de aislamiento LRB y LDRB se toman del catálogo de la empresa DIS (Dynamic Isolation Systems Inc, 2007). No obstante, para los apoyos SLD, dicho catálogo no ofrece información, motivo por el cual se consulta el catálogo de la empresa Bridgestone (Bridgestone, 2017) y se toman las propiedades físicas relevantes para la el diseño de las estructuras aisladas.

De otra parte, estos dispositivos consultados en este catálogo tienen coeficientes de fricción altos (del orden del 15%), motivo por el cual en la definición de este parámetro se siguió la recomendación de expertos en temas de aislamiento sísmico consultados y se les asignó un coeficiente de fricción muy bajo del 1,5%.

Por último, se indican los períodos objetivos de diseño de las estructuras con aislamiento sísmico al igual que los amortiguamientos objetivo:

Suelo Firme (B)			
Período	Convencional	Aislado_0,3%	Aislado_0,4%
X	0,85	3,11	3,12
Y	0,88	3,12	3,14

Suelo Intermedio (D)			
Período	Convencional	Aislado_0,3%	Aislado_0,4%
X	0,71	2,74	2,71
Y	0,73	2,75	2,71

Suelo Blando (E)			
Período	Convencional	Aislado_0,3%	Aislado_0,4%
X	0,7	2,05	2
Y	0,72	2,06	1,99

Tabla 20:Períodos objetivo de las estructuras con aislamiento sísmico.

Suelo Firme (B)			
Período	Convencional	Aislado_0,3%	Aislado_0,4%
X	5%	16,70%	16,70%

Suelo Intermedio (D)			
Período	Convencional	Aislado_0,3%	Aislado_0,4%
X	5%	18%	18%

Suelo Blando (E)			
Período	Convencional	Aislado_0,3%	Aislado_0,4%
X	5%	23,10%	23,70%

Tabla 21:Amortiguamientos objetivo de las estructuras con aislamiento sísmico.

Capítulo 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran y comentan los resultados obtenidos en la presente investigación sobre el desempeño de los dispositivos de aislamiento sísmico en diferentes condiciones de suelo. Para este propósito, se emplean los resultados de las estructuras convencionales homólogas como referencia.

Este capítulo comprende 2 partes. La primera parte evalúa el desempeño propiamente dicho de la implementación de estos dispositivos en las estructuras. Para este fin se evalúan los diferentes aspectos en los cuales contribuye a mejorar el comportamiento de las edificaciones. Esta evaluación se presenta en los numerales 6.1, 6.2 y 6.3. Los aspectos analizados comprenden la concentración de los desplazamientos en el nivel base y el comportamiento de cuerpo rígido de la superestructura. Así mismo, la forma modal de cada estructura junto con el porcentaje de masa participativa en cada modo de vibración, la reducción de los cortantes basales y de piso tanto para la evaluación de las derivas como para el diseño de los elementos estructurales y los momentos de volcamiento debido a las fuerzas sísmicas. Igualmente, se evalúa el comportamiento de los dispositivos de aislamiento sísmico en términos del amortiguamiento y la energía disipada por medio de histéresis del sistema de aislamiento sísmico. También se analizan las demandas de desplazamiento de cada dispositivo y su correspondiente deformación por corte.

La segunda parte presenta las cantidades de obra y costos de los insumos de construcción de las estructuras con aislamiento sísmico. El costo de los insumos se establece a partir de las siguientes referencias: 1) el costo del acero de refuerzo y del concreto se establece a partir de (Legis, 2022) mientras que 2) el costo de los dispositivos de aislamiento sísmico, a partir de (Cano & Liberato, 2020). Este análisis de cantidades y costos se desarrolla en las secciones 6.4 y 6.5.

En todas las gráficas que se incluyen en este apartado se ha establecido una convención de colores y abreviaturas para facilitar su lectura. Esta convención consiste en:

Estructura	Denominación	Abreviatura	Color
Estructura sin aislamiento sísmico	Convencional 1%	Conv (1%)	
Estructura con aislamiento sísmico y deriva 0,3%	Aislada de Deriva 0,3%	Aislado (0,3%)	
Estructura con aislamiento sísmico y deriva 0,4%	Aislada de Deriva 0,4%	Aislado (0,4%)	

Tabla 22: Convención de abreviaturas y colores para todas las gráficas del capítulo 6.

Adicionalmente, con la abreviatura SAS se identifican a los Sistemas de Aislamiento Sísmico de base. Así mismo, la abreviatura PRM significa Pórticos Resistentes a Momento.

De otra parte, se resalta que la selección de las derivas de diseño para los edificios con aislamiento sísmico obedece al hecho de que la implementación de esta tecnología tiene como propósito principal mejorar el desempeño de las construcciones. Consecuentemente, se establecen estos límites tan estrictos de 0,3% y 0,4% con la intención de que los edificios tengan un nivel de desempeño correspondiente a la *operación inmediata*.

Por último, de acuerdo con el alcance de la investigación, la superestructura es analizada y calculada para cada uno de los casos señalados en la Tabla 22. No obstante, el análisis y diseño de la subestructura sólo se realiza para los edificios con aislamiento sísmico de deriva 0,3% y los edificios convencionales.

6.1 Comportamiento estructural

6.1.1 Flexibilización de la superestructura

La Figura 32, Figura 33 y Figura 34 indican brevemente y la manera cómo se extiende el período fundamental de vibración en X de las estructuras aisladas frente a las estructuras convencionales que sirven de referencia. Igualmente, indica los efectos que tienen esta extensión y la forma espectral propia de cada estrato sobre la aceleración y desplazamientos impartidos a las superestructuras. Lo indicado brevemente en este numeral se desarrolla más detenidamente en los siguientes numerales.

Como se muestra en la Figura 32, la implementación del SAS en el edificio sobre suelo firme consigue la mayor extensión del período fundamental dentro de todos los edificios analizados. Esto último es consecuencia del hecho de que la conformación del SAS es bastante flexible debido a la inclusión de los deslizadores. Esta extensión tan importante del período de vibración, junto con la forma espectral propia de este tipo de suelo, ocasionan que a estas superestructuras le sean impartidos las menores aceleraciones y desplazamientos de todas las superestructuras aisladas estudiadas. Estos valores no representan ningún inconveniente desde la perspectiva de las capacidades de desplazamiento de los aisladores comerciales para edificaciones (40 cm) (Mageba, 2022).

Por el contrario, la Figura 33 y Figura 34 indican cómo a medida que se flexibiliza el estrato, los desplazamientos espectrales aumentan de manera significativa frente a las capacidades de desplazamiento de los aisladores comerciales para edificaciones. De hecho, los desplazamientos espectrales para una relación de amortiguamiento del 5% para los suelos intermedio y blando ascienden a 55 cm y 61 cm, en el mismo orden. Por consiguiente, se requiere que el diseñador implemente la estrategia de incrementar el amortiguamiento de que dispone el SAS con la finalidad de reducir estos desplazamientos espectrales a magnitudes inferiores a los 40 cm. De esta manera, los desplazamientos de los aisladores se reducen a 372 mm y 397,6 mm para las estructuras con aislamiento y deriva 0,3% y a 362 mm y 380,5 mm para las estructuras con aislamiento y deriva 0,4%.

Respecto a la cantidad amortiguamiento suministrado por los SAS, éste asciende al 18% para el suelo intermedio y al 23,1% para el suelo blando.

Igualmente, la Figura 32, la Figura 33 y la Figura 34 también conducen a los siguientes análisis:

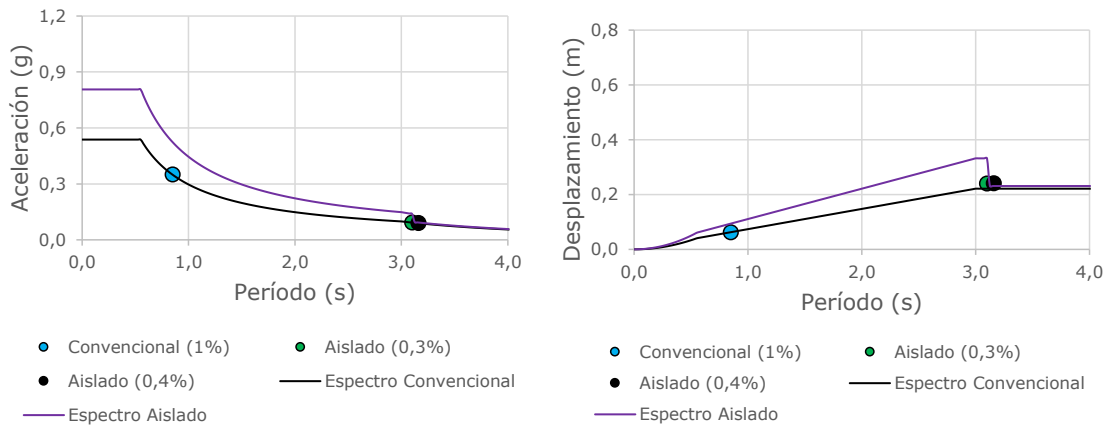


Figura 32: Aceleraciones (a) y desplazamientos (b) espectrales para las diferentes estructuras. Suelo firme.

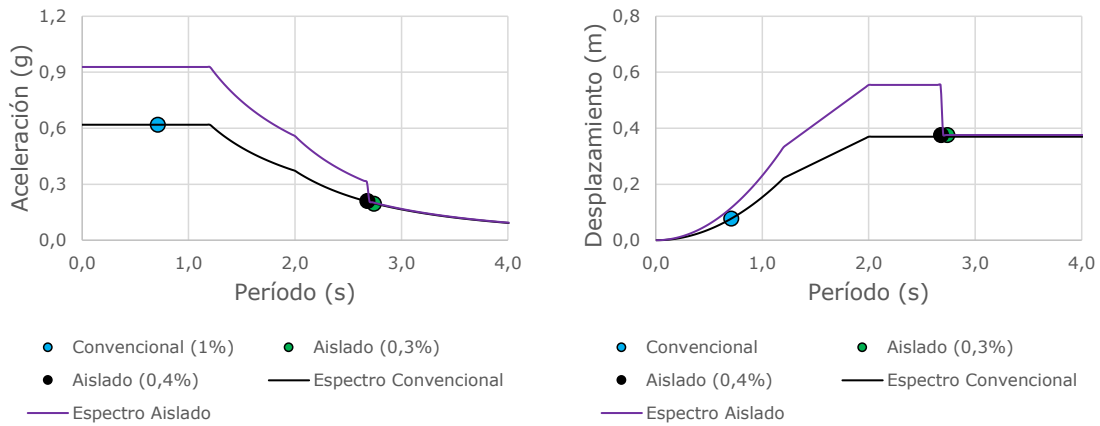


Figura 33: Aceleraciones (a) y desplazamientos (b) espectrales para las diferentes estructuras. Suelo intermedio.

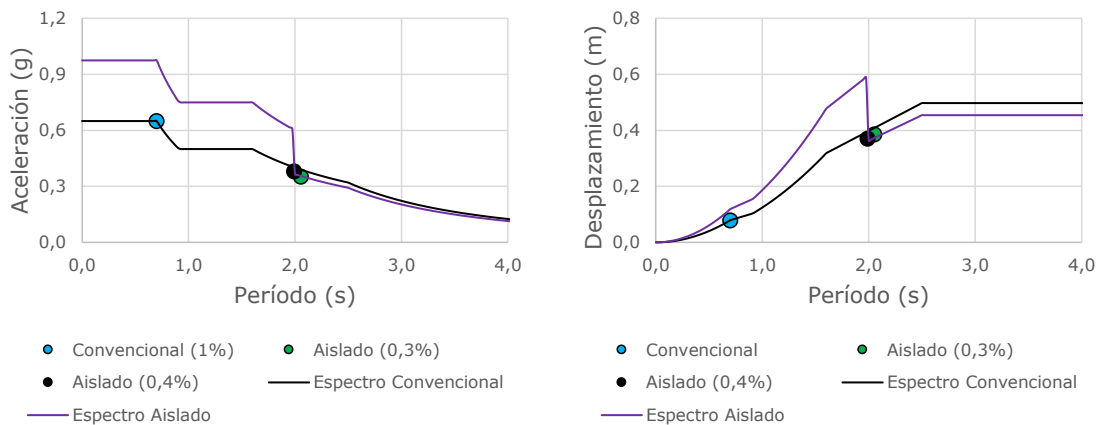


Figura 34: Aceleraciones (a) y desplazamientos (b) espectrales para las diferentes estructuras. Suelo blando.

• La extensión de los períodos fundamentales de vibración (flexibilización de la superestructura) para el suelo intermedio y blando es menor frente a la de suelo firme. Esto como consecuencia de la rigidización que sufre el SAS debido a la estrategia de incrementar

el amortiguamiento del sistema (mayor amortiguamiento del sistema implica menor flexibilidad de los aisladores debido al incremento de su núcleo de plomo).

- La magnitud de los espectros de aceleración y desplazamiento correspondientes al suelo intermedio y blando para el rango de períodos de las correspondientes estructuras aisladas son mayores que la magnitud de los espectros de suelo firme debido a la mayor cantidad de energía que presenta la señal sísmica de los primeros 2 tipos de suelo dentro de este rango de períodos. Aunado a lo anterior, la extensión de los períodos fundamentales de vibración de las estructuras aisladas apoyadas sobre los suelos intermedio y blando es menor frente a la de suelo firme. Estas 2 observaciones hacen que las ordenadas espectrales sean mayores para los suelos intermedio y blando frente a las de suelo firme.

- La parte inicial de los espectros de aceleraciones y desplazamientos para las edificaciones con aislamiento sísmico ($T < T_{ais}$) es considerablemente mayor frente a la de los espectros de los edificios convencionales. Este hecho se debe a la definición del sismo de diseño para las estructuras con aislamientos de acuerdo con el FEMA P-1050, según el cual se debe de considerar el sismo MCEr (2%/50 años). Por el contrario, el sismo de diseño de las estructuras convencionales corresponde al sismo de diseño DBE (10%/50 años), de acuerdo con la NSR-10.

- La implementación de los SAS ejerce un control sobre los espectros de aceleraciones y desplazamientos. Pues en todos los diferentes tipos de suelo analizados, los espectros de las estructuras aisladas se reducen significativamente para los modos aislados que corresponden a los primeros 3 modos fundamentales. De esta manera, resulta que la parte final de los espectros para las estructuras aisladas en suelo blando es menor que los espectros de las construcciones convencionales. Por su parte, los espectros de las estructuras aisladas en suelo firme e intermedio resultan ser levemente mayores que los de las correspondientes edificaciones convencionales (esto último a pesar de que la parte inicial del espectro es significativamente mayor).

- Los edificios aislados diseñados con deriva 0,3% tienen un período de vibración muy similar a los edificios aislados de deriva 0,4%. Esto conlleva a que sus aceleraciones y desplazamientos sean muy similares.

6.1.2 Desplazamiento de las estructuras y los aisladores

Las estructuras aisladas se encuentran sometidas a mayores desplazamientos frente a las convencionales debido a la flexibilización de su base. No obstante, dichos desplazamientos se concentran en los aisladores, sin afectar a la superestructura que se comporta como un cuerpo rígido. Esta es una característica primordial que presentan las estructuras con aislamiento sísmico de base. Por tanto, en este numeral se verifica que efectivamente los dispositivos de aislamiento en los distintos tipos de suelo concentren los desplazamientos sin que la superestructura presente grandes deformaciones relativas.

La Figura 35 y Figura 36 presentan los desplazamientos absolutos de las estructuras con aislamiento para los 3 tipos de suelo estudiados. Igualmente, muestra los desplazamientos de los aisladores que se ubican en el nivel base (nivel 0 en la Figura 35 y Figura 36). Se puede observar que los desplazamientos son significativos y tienen lugar en los aisladores mientras

que las superestructuras presentan únicamente pequeñas deformaciones relativas. Esto indica que los SAS en los distintos tipos de suelo tienen igual eficiencia en este aspecto.

En estas figuras también es preciso advertir cómo a medida que se flexibiliza el estrato, los desplazamientos de las correspondientes edificaciones aisladas son mayores. Esto último se explica por el hecho de que conforme se flexibiliza el estrato de fundación, los espectros de los suelos presentan más energía en el rango de períodos de las estructuras aisladas, ocasionando mayores aceleraciones y desplazamientos.

Consecuentemente, la estructura aislada sobre suelo firme no presenta ningún inconveniente en cuanto a que los desplazamientos de sus aisladores sean excesivos. Por el contrario, en los suelos intermedio y blando los desplazamientos de los aisladores sí resultaban excesivos desde el punto de vista de las capacidades de desplazamientos de los aisladores comerciales para edificaciones (40 cm). Consecuentemente, en el diseño de los respectivos SAS para estos tipos de suelo se adoptó la estrategia de incrementar el amortiguamiento con el propósito de que los desplazamientos de los aisladores no excedieran este límite de 40 cm.

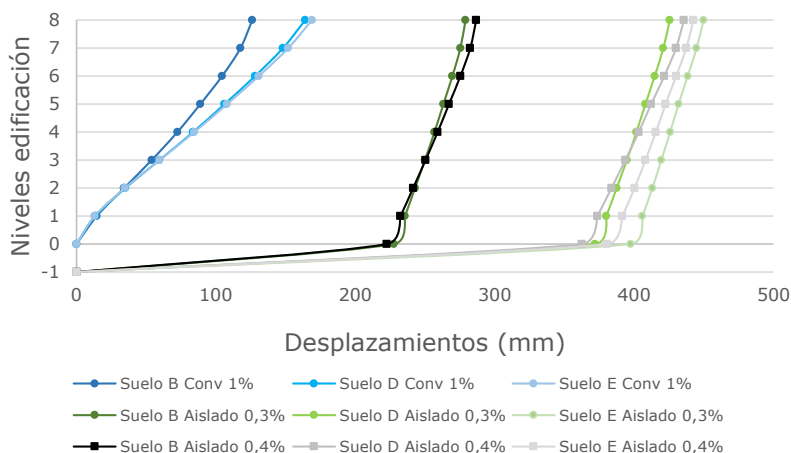


Figura 35: Desplazamiento máximo en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección X.

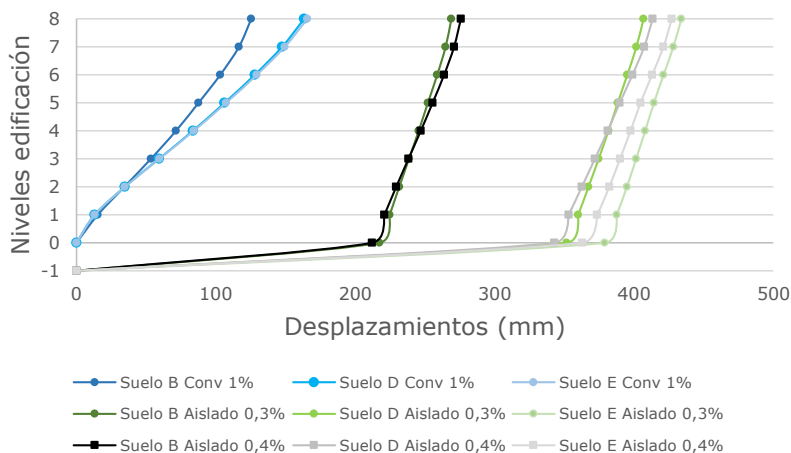


Figura 36: Desplazamiento máximo en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección Y.

De acuerdo con lo señalado anteriormente, el amortiguamiento suministrado a las distintas edificaciones fue del 16%, 18% y 23% para las estructuras en suelo firme, intermedio y blando, respectivamente. Por tanto, cuanto más blando el estrato de fundación, mayor es el amortiguamiento que se debe de disponer en el SAS.

La Tabla 23 muestra la magnitud de los desplazamientos de los aisladores en función de los distintos tipos de suelo considerados. Igualmente, la Tabla 23 indica la variación porcentual de estos desplazamientos de los aisladores en función del tipo de suelo respecto a los desplazamientos en suelo firme.

	Aislado 0,3%	Variación	Aislado 0,4%	Variación
	mm	%	mm	%
Suelo Firme (B)	227		222	
Suelo Intermedio (D)	372	164%	362	163%
Suelo Blando (E)	397,6	175%	380,5	171%

Tabla 23: Desplazamientos del nivel base de las estructuras con aislamiento en cada tipo de suelo

Es importante resaltar que en este caso de estudio, el amortiguamiento suministrado únicamente por los SAS a través de los aisladores LRB fue suficiente para controlar la magnitud de los desplazamientos de los aisladores para las situaciones de suelo intermedio y blando. De hecho, los desplazamientos espectrales para una relación de amortiguamiento del 5% para los suelos intermedio y blando ascienden a 55 cm y 61 cm, en el mismo orden. Sin embargo, una vez se incrementa el amortiguamiento de estos SAS al 18% y 23,1%, respectivamente, estos desplazamientos se reducen a 372 mm y 397,6 mm para las estructuras con aislamiento y deriva 0,3%, y a 362 mm y 380,5 mm para las estructuras con aislamiento y deriva 0,4%.

6.1.3 Derivas en cada nivel del edificio

Otro de los aspectos benéficos de la implementación de los SAS en las edificaciones consiste en el control que éste ejerce sobre las deformaciones de la superestructura. Lo anterior implica que la superestructura se comporta como un cuerpo rígido, concentrando las deformaciones en el aislador sin evidenciar excesivas deformaciones relativas. Este comportamiento impide que el sistema de resistencia sísmica trabaje en el rango inelástico, con lo cual se evita su daño.

Como se muestra en la Figura 37 y Figura 38, las derivas de cada nivel del edificio aislado son significativamente menores que las del correspondiente edificio convencional. Además, dichas derivas son inferiores al 0,3% y 0,4%, según el límite establecido para cada estructura con aislamiento sísmico. De esta manera, resulta que la implementación de los SAS en los 3 distintos tipos de suelo es satisfactoria en este aspecto, contribuyendo al mejor desempeño del edificio.



Figura 37: Derivas en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección X. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).



Figura 38: Derivas en cada nivel de las edificaciones analizadas. Dirección Y. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).

6.1.4 Análisis Modal: verificación del comportamiento de cuerpo rígido

El control de las deformaciones de las edificaciones aisladas es importante y constituye otra de las bondades de la implementación de los SAS. Ahora, el análisis de los modos de vibración junto con sus porcentajes de participación modal tiene como finalidad mostrar que

efectivamente **1)** los modos fundamentales consisten en un comportamiento de cuerpo rígido de la superestructura, en el que los aisladores concentran las deformaciones y **2)** estos modos constituyan la mayor parte de la respuesta de los edificios aislados en su respectiva dirección.

En la Figura 39 y Figura 40 se indican a modo de ejemplo las formas modales de la superestructura convencional y aislada en suelo firme para sus modos fundamentales. Como puede observarse, tanto para la estructura convencional como la aislada el primer modo fundamental corresponde a la dirección del eje Y, el segunda modo a la dirección X, y el tercero a la dirección Z. Esto se debe a que las vigas de piso están orientadas en la dirección Y y proveen al sistema estructural de PRM de mayor rigidez en esa dirección.

De otra parte, para el caso de las estructuras aisladas, se muestra cómo las formas modales en X y Y corresponden al desplazamiento de un cuerpo rígido, es decir: un bloque que se traslada sobre su base sin sufrir deformaciones relativas de piso significativas.

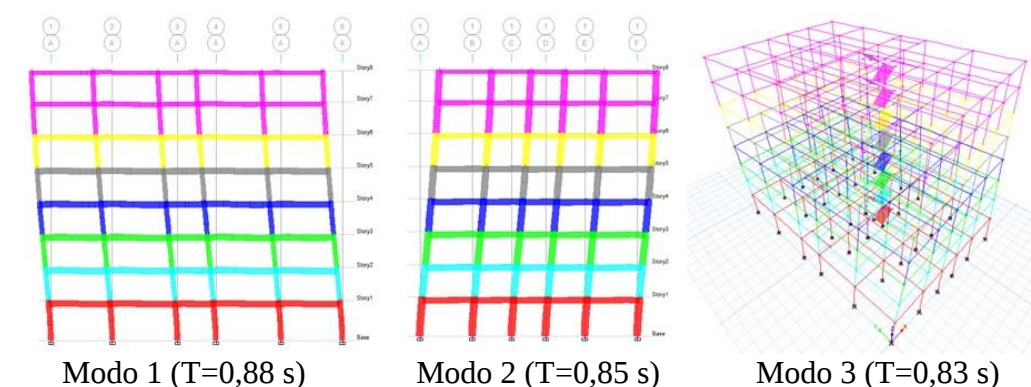


Figura 39: Primeros 3 modos de vibración de la edificación convencional. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).

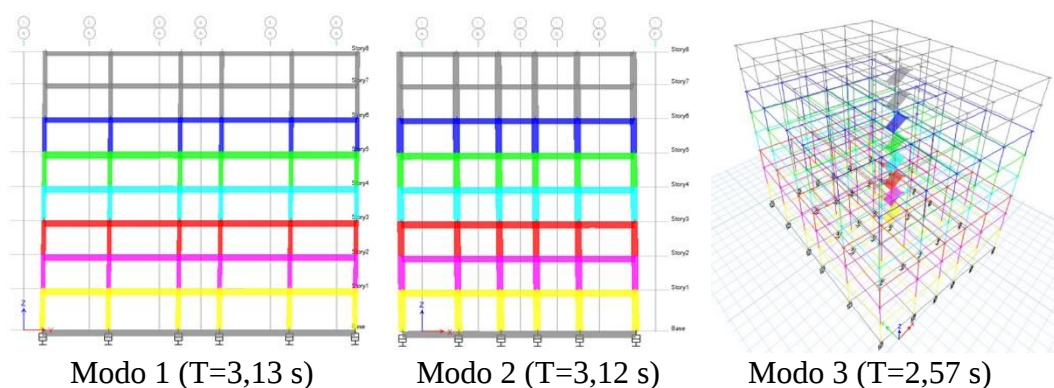


Figura 40: Primeros modos de vibración de la edificación con aislamiento sísmico. Uy (a), Ux (b) y Rz. (c).

Ahora, una vez identificadas las formas modales de los primeros 3 modos, es necesario establecer su contribución dentro de la respuesta total del edificio. Lo anterior con la finalidad de verificar que efectivamente, en el caso de las estructuras aisladas, la respuesta esté gobernada por los modos traslacionales de cuerpo rígido frente a los modos superiores que inducen otro tipo de deformaciones en el sistema estructural.

La Figura 41, Figura 42 y Figura 43 muestran el porcentaje de masa participativa para cada edificación según el tipo de suelo. Se indican los primeros 6 modos.

En general se aprecia cómo las estructuras aisladas excitan un porcentaje de su masa muy cercano al 100% en los 3 primeros modos mientras que las estructuras convencionales requieren de al menos 6 modos para excitar más del 90% de su masa.

De conformidad con todas las observaciones anteriores, se puede concluir que para los edificios aislados sobre los 3 tipos de suelo: **1)** efectivamente la respuesta traslacional predomina frente a la rotacional y **2)** esta respuesta traslacional de cuerpo rígido, que es característica de los primeros modos de las estructuras aisladas, constituye casi la totalidad de la respuesta de la edificación. En este sentido, el comportamiento de cuerpo rígido predomina sobre las formas modales correspondientes a los modos superiores. En conclusión, el aspecto de control de las deformaciones de la estructura por parte del SAS es igualmente eficiente en todos los tipos de suelo.

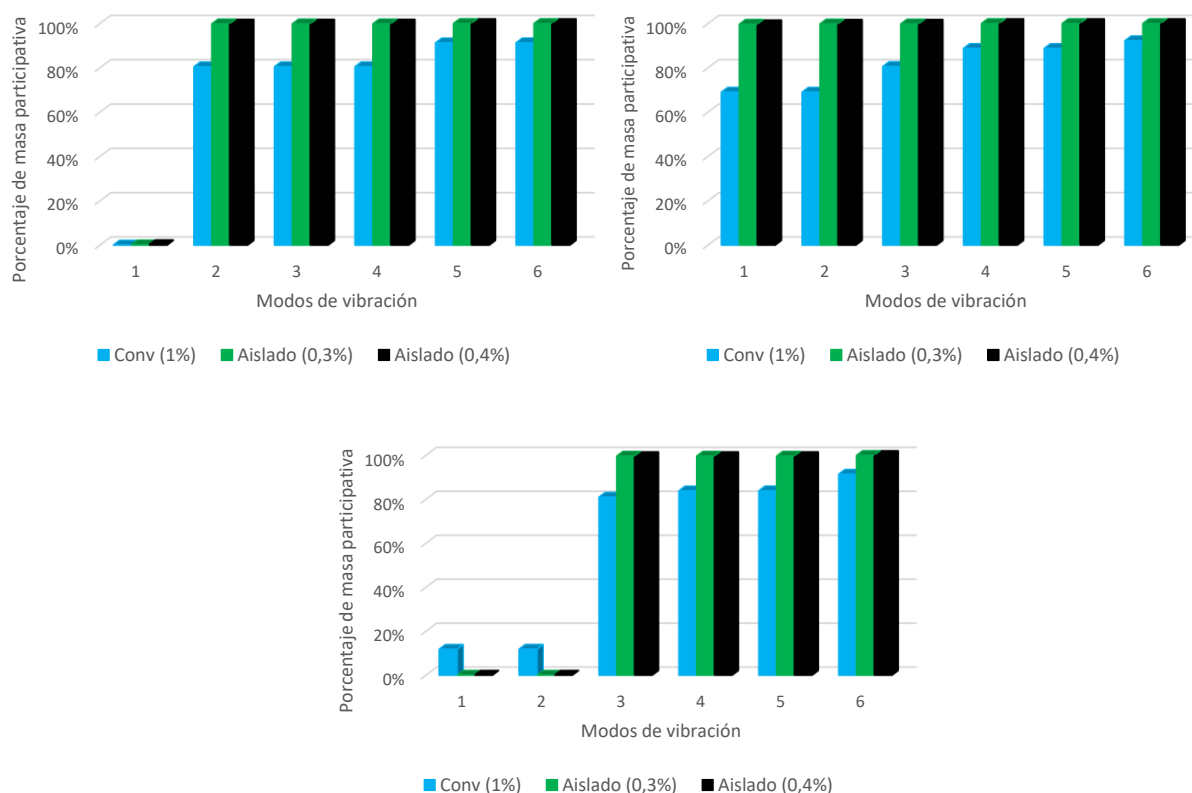


Figura 41: Porcentaje de masa participativa en cada modo para las estructuras en suelo firme. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).

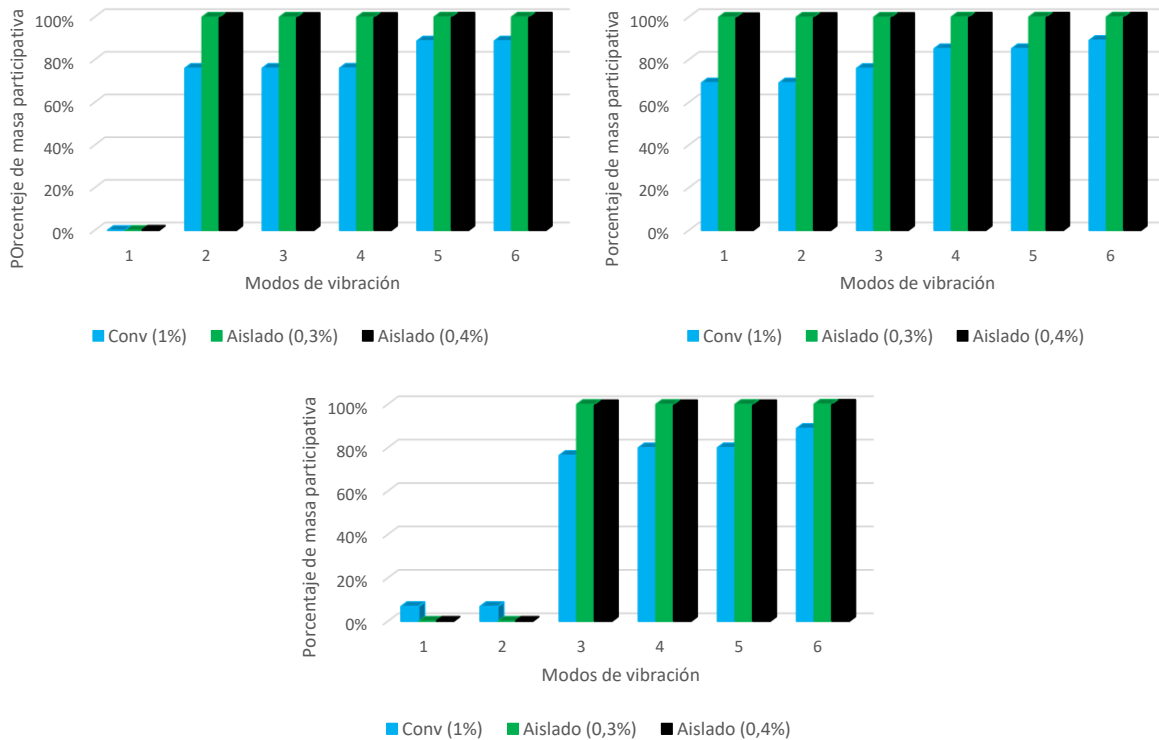


Figura 42: Porcentaje de masa participativa en cada modo para las estructuras en suelo intermedio. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).

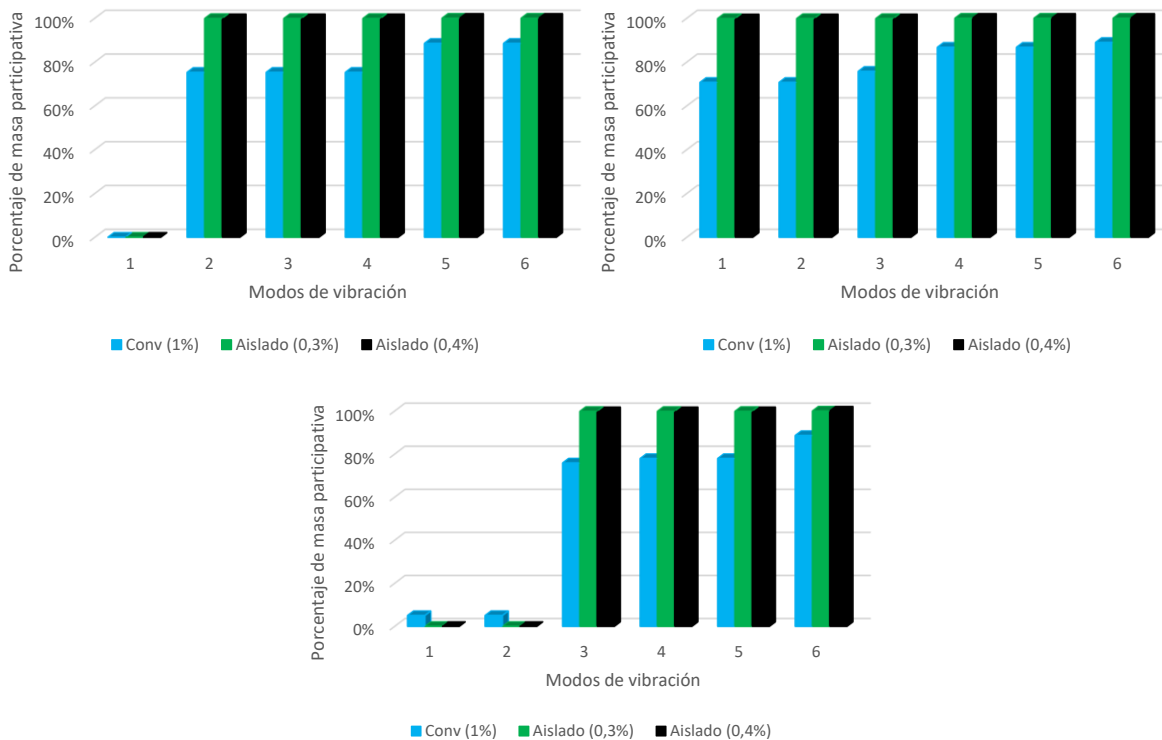


Figura 43: Porcentaje de masa participativa en cada modo para las estructuras en suelo blando. Uy (a), Ux (b) y Rz (c).

6.1.5 Excentricidad: verificación del comportamiento de cuerpo rígido

Como se señaló en el numeral anterior, para las estructuras con aislamiento sísmico las formas modales traslacionales (modos 1 y 2) priman frente a la rotacional (modo 3).

Este comportamiento descrito anteriormente no se explica por la incorporación del SAS sino que se debe a la simetría que existe en la configuración estructural en las 2 direcciones. Por tanto, con la finalidad de mostrar cómo la disposición regular en planta presenta valores reducidos de excentricidad, en la Figura 44 se ubican los centros de masa y rigidez de la estructura aislada y se calcula su excentricidad.

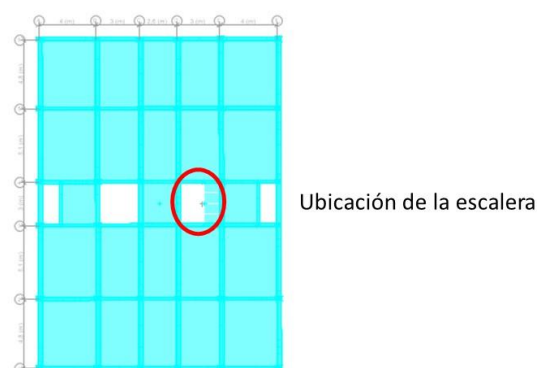


Figura 44: Planta estructural básica.

	XCCM	YCCM	XCR	YCR	e_X	e_Y
	m	m	m	m	m	m
8	8,30	11,40	8,42	11,40	0,12	0,00
7	8,30	11,40	8,41	11,40	0,11	0,00
6	8,30	11,40	8,40	11,40	0,10	0,00
5	8,30	11,40	8,39	11,40	0,09	0,00
4	8,30	11,40	8,38	11,40	0,08	0,00
3	8,30	11,40	8,37	11,40	0,06	0,00
2	8,30	11,40	8,35	11,40	0,04	0,00
1	8,30	11,40	8,32	11,40	0,02	0,00

Tabla 24: Excentricidades en planta de la configuración estructural de las edificaciones aisladas.

Como muestra la tabla anterior, las coordenadas en Y para el centro de masa y el centro de rigidez coinciden. De esta manera no hay excentricidad en esta dirección de la planta estructural. Por su parte, para la dirección X, existe una excentricidad reducida debido a la incorporación de la escalera, la cual se encuentra ubicada en el hemisferio derecho de la planta estructural. No obstante, esta excentricidad entre el centro de rigidez y el centro de masa es muy pequeña y no induce efectos rotacionales importantes, como se señaló en el numeral anterior.

Por último, la configuración del SAS para cada tipo de suelo consideró implementar los apoyos más rígidos en la periferia con la finalidad de controlar los posibles efectos torsionales que aparecieran.

6.2 Solicitaciones sísmicas

6.2.1 Cortantes basales y de piso: reducción de las fuerzas sísmicas

Para conseguir una reducción significativa de las solicitaciones sísmicas de la estructura aislada se deben de cumplir con 2 requisitos. Por una parte, se tiene la extensión del período fundamental debida a la implementación de los SAS. Al respecto, cuanto más se aparte el período la estructura aislada de la meseta del respectivo espectro, puede esperarse una mayor reducción de la ordenada espectral. Esta primera condición depende de la configuración de los SAS ya que ellos determinan qué tanto se flexibiliza la superestructura.

La otra condición consiste en que efectivamente esta extensión del período esté asociada a una reducción significativa de la ordenada espectral. Pues sólo así se justifica el hecho de que la intensidad de movimiento que afecta a la superestructura se reduce respecto a la convencional. Por tanto, esta última condición se asocia a la forma espectral, la cual depende del tipo de suelo.

Como se indicó en la revisión bibliográfica, la velocidad con que el espectro decrece en función del tiempo depende del tipo de suelo. En las situaciones de suelo firme e intermedio, la señal presenta una energía importante en el intervalo de frecuencias alta, motivo por el cual la meseta del correspondiente espectro es pequeña, ocasionando que el espectro decrezca rápidamente. Por el contrario, la señal sísmica en suelos blandos presenta un contenido frecuencial importante en el rango de frecuencias bajas. Consecuentemente, la meseta de su espectro es más prolongada y las ordenadas decrecen de manera más lenta.

De otra parte, los espectros que se consideran en el diseño de las estructuras aisladas corresponden a un nivel de amenaza con una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años. Por su parte, las estructuras convencionales observan uno con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. Por tanto, resulta que en el análisis de la estructura con aislamiento sísmico debe haber una reducción significativa de la ordenada espectral con el fin de que las correspondientes fuerzas inerciales sean menores.

Para analizar los requisitos mencionados, la Tabla 25 muestra las ordenadas espectrales y los cortantes basales, tanto para las estructuras aisladas como para las convencionales. Así mismo, compara los valores de estos parámetros para las estructuras con aislamiento respecto a las convencionales. Como se muestra, el resultado principal consiste en que las ordenadas espectrales y los cortantes basales de las estructuras aisladas son menores frente a las edificaciones convencionales para todos los tipos de suelo.

No obstante, la efectividad de los SAS en la reducción del cortante no es la misma para todos los tipos de suelo. Pues para los suelos firme e intermedio, los cortantes basales presentan una reducción importante del orden del 65% comparada con del 45% del suelo firme.

En conclusión, la efectividad de los SAS en el control de las fuerzas sísmicas se reduce conforme el suelo se flexibiliza.

Parámetro	Sa	Variación	W	Vs	Variación
Estructura/Unidad	(g)	%	(kN)	(kN)	%
Convencional (1%)	0,35		39.337	13.768	
Aislado (0,3%)	0,10	28,40	44.359	4.409	32,03
Aislado (0,4%)	0,10	28,39	43.554	4.328	31,44

Parámetro	Sa	Variación	W	Vs	Variación
Estructura/Unidad	(g)	%	(kN)	(kN)	%
Convencional (1%)	0,62		43.643	27.015	
Aislado (0,3%)	0,20	32,49	48.477	9.749	36,09
Aislado (0,4%)	0,21	33,36	46.343	9.569	35,42

Parámetro	Sa	Variación	W	Vs	Variación
Estructura/Unidad	(g)	%	(kN)	(kN)	%
Convencional (1%)	0,65		44.142	28.692	
Aislado (0,3%)	0,36	56,08	50.974	18.580	64,76
Aislado (0,4%)	0,38	57,78	49.003	18.402	64,14

Tabla 25: Variación de las ordenadas espectrales y del cortante basal de las edificaciones en dirección X. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c).

Los resultados anteriores se pueden ver gráficamente en la Figura 45 y Figura 46.

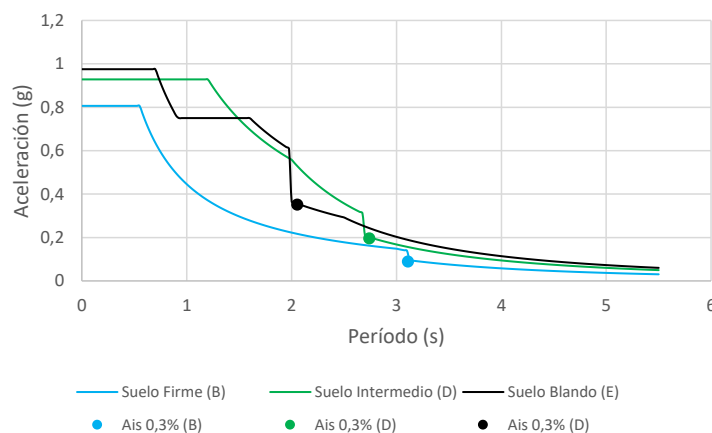


Figura 45: Ordenada espectral para cada estructura según el tipo de suelo. Dirección X.

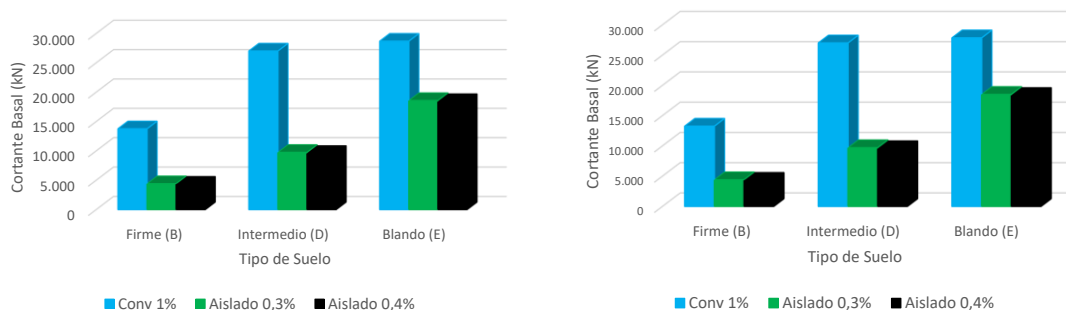


Figura 46: Cortante basal para cada estructura según el tipo de suelo. Dirección X (a). Dirección Y (b).

En esta figura se muestra la manera en que la extensión del período fundamental se asocia o no a una reducción de la ordenada, dependiendo tanto de la flexibilización de la superestructura como de la forma del espectro.

Ahora, la Figura 47 y Figura 48 presenta los cortantes elásticos de piso. En la Figura 47 y Figura 48 se puede apreciar cómo los edificios con aislamiento sísmico con deriva límite de 0,4% tienen menores solicitaciones que los edificios aislados de deriva de 0,3%.

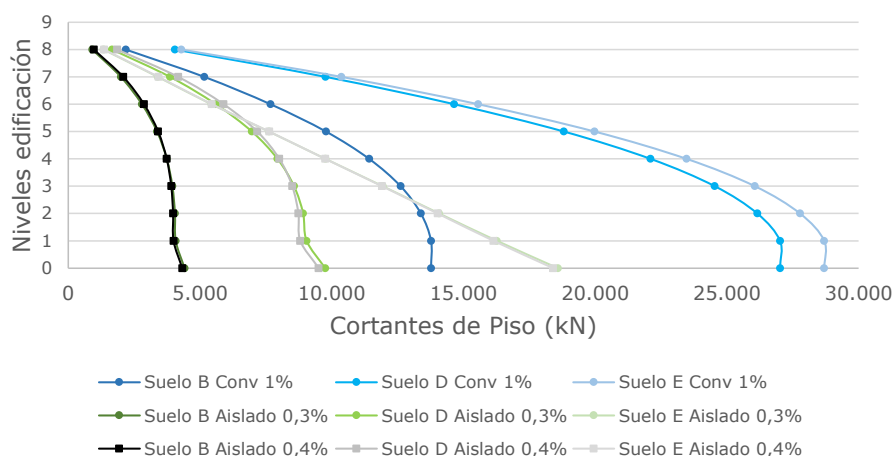


Figura 47: Cortantes sísmicos elásticos de diseño. Dirección X.

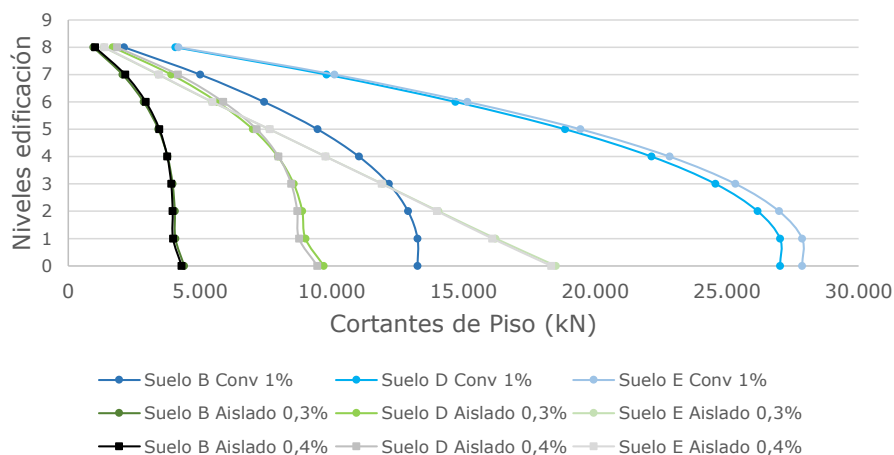


Figura 48: Cortantes sísmicos elásticos de diseño. Dirección Y.

6.2.2 Momentos de volcamiento: tensiones sobre los aisladores

Este numeral se propone mostrar cómo a medida que se flexibiliza el estrato de fundación, las solicitaciones inerciales aumentan y generan mayores momentos de volcamiento sobre la estructura. Este incremento de este tipo de solicitaciones genera uno de los problemas observados al diseñar el SAS de los edificios en suelos intermedio y blando, el cual consiste en la aparición de fuerzas de tensión sobre los dispositivos de aislamiento sísmico.

Para ilustrar lo indicado, se remite al lector a la Figura 49 y Figura 50.

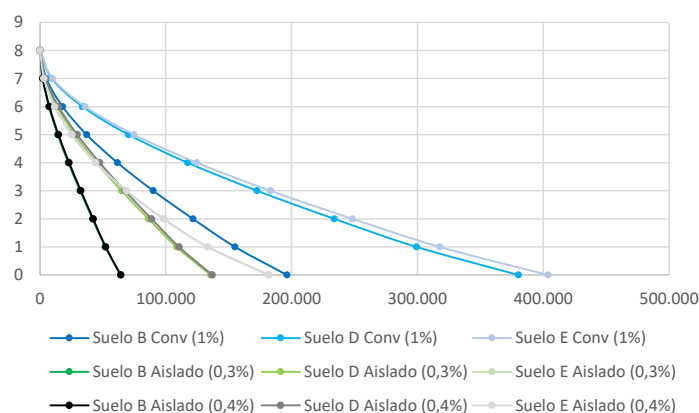


Figura 49: Momentos de volteo. Dirección X (M_y)

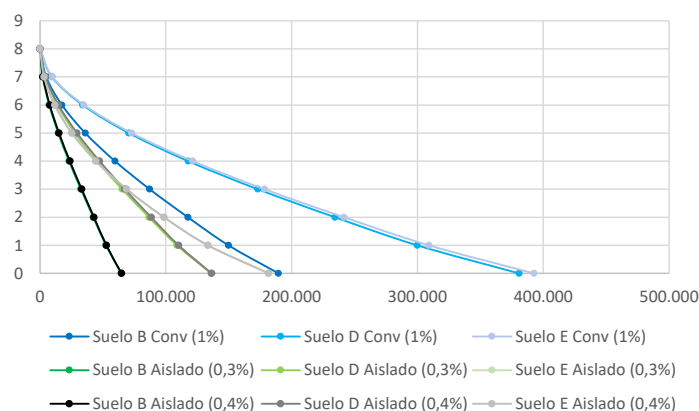


Figura 50: Momentos de volteo. Dirección Y (M_x)

En estas figuras se muestra cómo los momentos de volcamiento sobre la base se incrementan conforme se flexibiliza el estrato de apoyo, lo cual genera la aparición de fuerzas de tensión en los apoyos que son cada vez mayores. De hecho, en el desarrollo de estos diseños, se observó que para el suelo intermedio (D) los apoyos que presentaban tensiones se limitaban a los de la periferia. Mientras que los apoyos que presentaban estas solicitaciones en el suelo blando (E) comprendían tanto los de la periferia como algunos del interior. Igualmente, la magnitud de las tensiones era significativamente más elevada en la estructura con aislamiento sísmico en este último tipo de suelo.

Las consideraciones anteriores influyeron en la configuración de SAS, como se explica en 5.3.5. Al respecto, brevemente se comenta que en los suelos intermedio (D) y blando (E) se debió sustituir algunos deslizadores interiores por apoyos LRB con el fin proveer algún grado de resistencia frente las fuerzas de tensión. Esta sustitución comprendió mayor cantidad de deslizadores en el suelo E. Igualmente, conforme se flexibilizaba el estrato, se debió incrementar la rigidez del caucho con el propósito de proveer mayor resistencia frente a las tensiones. De esta manera, en el suelo D se trabajó con un $G=0,5$ MPa mientras en el suelo

E, $G=0,8$ MPa. Esto último como consecuencia del hecho de que las tensiones en el suelo E eran mayores que las del suelo D.

6.2.3 Cortantes inelásticos de diseño por piso: disminución del daño de la superestructura

Las fuerzas cortantes inelásticas de diseño se muestran en la Figura 51 y Figura 52. Se precisa que éstas resultan de dividir las fuerzas elásticas entre el coeficiente de disipación de energía R.

Se resalta cómo a las estructuras convencionales les corresponden menores solicitaciones que a las estructuras aisladas homólogas, contrario a lo que sucede con las fuerzas cortantes elásticas. Lo anterior se debe a que el reglamento de construcciones sismo resistentes NSR-10 les asigna a estas edificaciones sin aislamiento un elevado coeficiente de disipación de energía, $R=7$, el cual reduce significativamente estas solicitaciones elásticas. Por el contrario, el FEMA P-1050 les asigna a las estructuras con aislamiento solamente un factor R de 2, motivo por el cual estas fuerzas se reducen de manera menos acentuada. De esta manera, las solicitaciones inelásticas del edificio convencional son menores que las del edificio con aislamiento sísmico de base.

De acuerdo con la filosofía de diseño prescrito por el FEMA P-1050 de 2015 para las construcciones con aislamiento, se espera un nivel de desempeño para estas construcciones correspondiente a la operación inmediata bajo un sismo con probabilidad de excedencia del 2% en 50 años. Por tanto, este valor reducido del coeficiente de capacidad de disipación de energía tiene el propósito de evitar que el sistema de resistencia sísmica trabaje en el rango inelástico. La prescripción anterior protege a la estructura de padecer daños significativos.

Por el contrario, el reglamento de construcciones sismo-resistentes NSR-10 designa un nivel de desempeño para el edificio convencional comprendido entre los niveles de seguridad a la vida y prevención del colapso. Consecuentemente, la NSR-10 acepta la ocurrencia de daños significativos en la estructura. Lo anterior se enmarca dentro de la filosofía tradicional de diseño sismo-resistente, según la cual la estructura debe disipar energía por medio de su daño con la finalidad de que las construcciones tengan secciones de dimensiones esbeltas. Esto último con el propósito de que la construcción sea viable económicamente.

De acuerdo con lo anterior, es totalmente coherente con las prescripciones de los códigos mencionadas que las estructuras aisladas tengan solicitaciones inelásticas mayores que las de las edificaciones convencionales.

De otra parte, es preciso resaltar una diferencia observada en el desarrollo de esta investigación entre el diseño de los edificios aislados y los convencionales. La diferencia en mención tiene su origen en la diferencia de magnitudes de los cortantes inelásticos de cada estructura.

El diseño de las estructuras convencionales está gobernado por las fuerzas elásticas de diseño y el criterio de deriva. Es decir, se establecen las dimensiones de las secciones de los

elementos del sistema estructural de manera tal que éste cumpla con el requisito de deriva del 1%. Posteriormente, se realiza el diseño del refuerzo de cada elemento, dando como resultado cuantías muy bajas toda vez que las fuerzas inelásticas son significativamente menores que las elásticas.

Otra cosa muy distinta sucede con los edificios aislados. Toda vez que las fuerzas elásticas de los edificios aislados son reducidas frente a las de los edificios convencionales, se obtienen sistemas estructurales muy esbeltos bajo las solicitaciones elásticas y la verificación del criterio de deriva. Posteriormente, cuando se realiza el diseño del refuerzo de cada elemento con base en las fuerzas inelásticas, se deben de asignar cuantías de refuerzo muy elevadas, en el mejor de los casos, o aumentar las secciones de algunos elementos para que el refuerzo asignado cumpla con la cuantía máxima.

El procedimiento anterior y sus resultados ocurren para todas las estructuras aisladas, pero es un comportamiento muy significativo en el momento de diseñar las estructuras aisladas en suelo blando (E). Pues como muestra la Figura 51 y Figura 52, las fuerzas inelásticas son sustancialmente mayores conforme se flexibiliza el estrato de fundación.

Esta última observación es importante más adelante cuando se explique la diferencia de cantidades de materiales demandados por las construcciones con aislamientos sísmico.

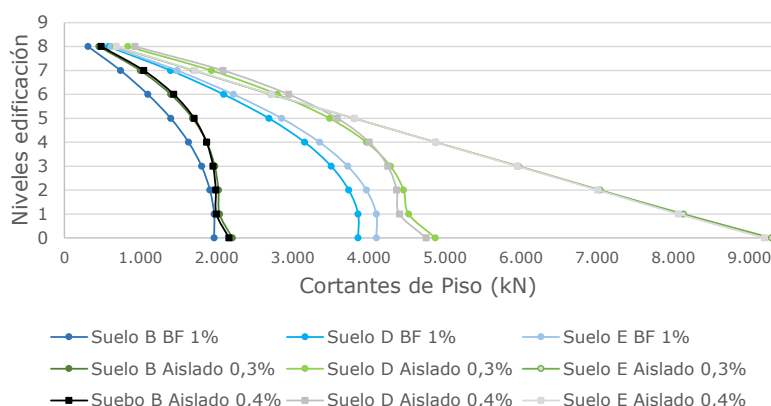


Figura 51: Cortantes sísmicos inelásticos de diseño. Dirección X.

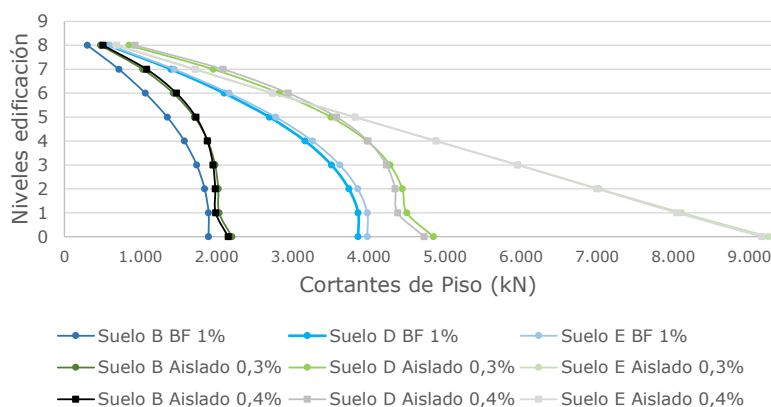


Figura 52: Cortantes sísmicos inelásticos de diseño. Dirección Y.

6.3 Comportamiento de los sistemas de aislamiento sísmico: control de los desplazamientos

Como se ha señalado, la configuración de los SAS para cada estructura en cada tipo de suelo debe controlar los desplazamientos de los dispositivos de aislamiento con el fin de que éstos no resulten excesivos desde la perspectiva de las capacidades de desplazamiento de los aisladores comerciales para edificaciones (40,0 cm). Consecuentemente, cada SAS dispone de una relación de amortiguamiento suficiente para que los desplazamientos de los aisladores no excedan el límite indicado.

La Tabla 26 y Tabla 27 indican los principales parámetros del comportamiento de estos sistemas según el tipo de suelo.

Ítem	Amortiguamiento	Energía Histerética	Desplazamiento del aislador	Incremento	Deformación corte	Rigidez efectiva
Unidad	%	kJ	mm	%	%	kN/mm
Suelo Firme (B)						
X	16,70	1.092	240		166,67	18,34
Suelo Intermedio (D)						
X	18,00	4.360	376	156	208,89	25,95
Suelo Blando (E)						
X	23,10	9.978	397	165	150,38	48,62

Tabla 26: Parámetros principales del comportamiento de los aisladores para los edificios con deriva 0,3%.

Ítem	Amortiguamiento	Energía Histerética	Desplazamiento del aislador	Incremento	Deformación corte	Rigidez efectiva
Unidad	%	kJ	mm		%	kN/mm
Suelo Firme (B)						
X	16,70	1.093	241		167,36	17,99
Suelo Intermedio (D)						
X	18,00	4.350	376	156	208,89	25,47
Suelo Blando (E)						
X	23,70	9.448	380	157	143,94	49,65

Tabla 27: Parámetros principales del comportamiento de los aisladores para los edificios con deriva 0,4%.

La Tabla 26 y Tabla 27 muestran cómo a medida que se flexibiliza el tipo de suelo, las demandas de desplazamientos de los SAS se incrementan respecto al desplazamiento del suelo firme (ver columna *Desplazamiento del Aislador e Incremento*). Consecuentemente, se debe de incrementar el amortiguamiento del SAS, lo cual implica una mayor cantidad de energía histerética disipada por parte de este sistema y una mayor rigidez efectiva del mismo.

Esta estrategia que se sigue tiene como propósito controlar la magnitud de las demandas de desplazamientos de los SAS, en particular los del suelo blando (E).

Como muestran la Tabla 26 y Tabla 27, en este trabajo se consiguió controlar efectivamente la magnitud de las demandas de desplazamientos por medio del amortiguamiento de los SAS para todos los tipos de suelo.

Por su parte, las deformaciones por cortante de los SAS aumentan a medida que se incrementan las demandas de desplazamiento con los suelos menos rígidos. Esta observación es válida para los suelos tipo B y D. No obstante, para el suelo tipo E, se incrementa la altura de los aisladores con la finalidad de que los mismos se flexibilicen un poco. Por tanto, la deformación de corte de los aisladores para este tipo de suelo se reduce ($\gamma = D_m/H_r$).

Acerca de esta última observación sobre el incremento de la altura del caucho de los aisladores, se señala primero que el caucho de los dispositivos en suelo E se rigidiza con el propósito de que resistan las fuerzas de tensión, como se describió en el numeral anterior y en 5.3.5. De esta manera, para que el SAS no resultase excesivamente rígido, se incrementa la altura del caucho. Así resulta que la altura H_r empleada para la estimación de la deformación por corte del suelo E es mayor frente a la del suelo D, dando como resultado una deformación por corte menor.

Por último, se resalta el hecho de que la variación de los desplazamientos entre suelos tipo D y E no fue muy acentuada debido a la diferencia de análisis sísmico desarrollado. Para el suelo D se realizó un análisis Estático de la Fuerza Horizontal Equivalente mientras que para el suelo E, uno Dinámico Modal Espectral. Y éste último establece los desplazamientos del SAS de manera más precisa, permitiendo que se reduzcan con respecto al primer análisis.

6.4 Cantidades de materiales de construcción

6.4.1 Superestructura

La efectividad de los distintos SAS para reducir las solicitaciones sísmicas en función del tipo de suelo tiene impactos en la cantidad de materiales de construcción. Pues cuanto mayor sean las solicitaciones, más robusta debe ser la construcción. Lo opuesto también es válido.

La Figura 53, Figura 54 y Figura 55 comparan las cantidades de materiales de obra (acero y concreto) para los edificios en los 3 distintos tipos de suelo estudiados.

- Edificios en suelo firme

Como se muestra en la Figura 53 (a), la estructura aislada de deriva 0,4% requiere menor cantidad de concreto que las convencionales. Lo anterior se debe al aligeramiento que presenta este tipo de superestructuras representado en las menores dimensiones de sus columnas necesarias para controlar la deriva. Pues la implementación del aislamiento causa que la superestructura se comporte como un cuerpo rígido debido a la diferencia de rigidez que existe entre la superestructura y el SAS.

Ahora, en el caso del edificio aislado de deriva 0,3%, el mismo requiere una cantidad total de concreto ligeramente mayor a la del edificio convencional. Esta observación se debe a que los ahorros generados en las columnas no alcanzan a compensar la inversión extra requerida por el nivel base adicional que requieren este tipo de construcciones.

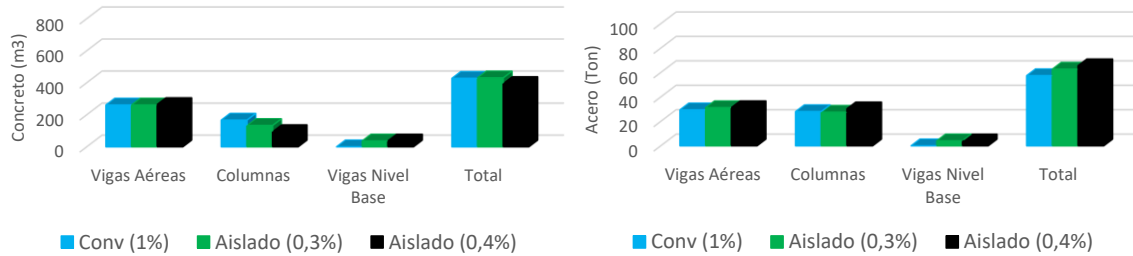


Figura 53: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para los diferentes elementos estructurales de cada edificio analizado en suelo firme (B).

Respecto al acero, la Figura 53 (b) indica que las estructuras aisladas requieren mayor cantidad de acero que las convencionales. Lo anterior obedece al hecho de que las columnas de las estructuras aisladas, al ser tan esbeltas, requieren de mayor cantidad de refuerzo con la finalidad de cumplir con el requisito de columna fuerte-viga débil. Aunado a lo anterior, el acero adicional requerido por la implementación del nivel base adicional necesario para las construcciones aisladas también incrementa la demanda de acero. Consecuentemente, las estructuras aisladas presentan mayores demandas de acero.

- Edificios en suelo intermedio

Como se muestra en la Figura 54 (a), las 2 estructuras con aislamiento presentan menor demanda de concreto que las estructuras convencionales. Lo anterior debido a la reducción de las dimensiones de sus columnas, principalmente.

La Figura 54 (b) muestra que la cantidad de acero requerido por estas columnas más esbeltas es menor que el requerido por las columnas más robustas de las edificaciones sin aislamiento. Lo anterior a pesar de que estas columnas más esbeltas presentan mayores cuantías de refuerzo para cumplir con el requisito de columna fuerte-viga débil. Esta observación se explica por el hecho de que las columnas de mayores dimensiones son tan robustas que demandan mayor cantidad de acero (aun cuando dispongan de la cuantía mínima de refuerzo del 1%).

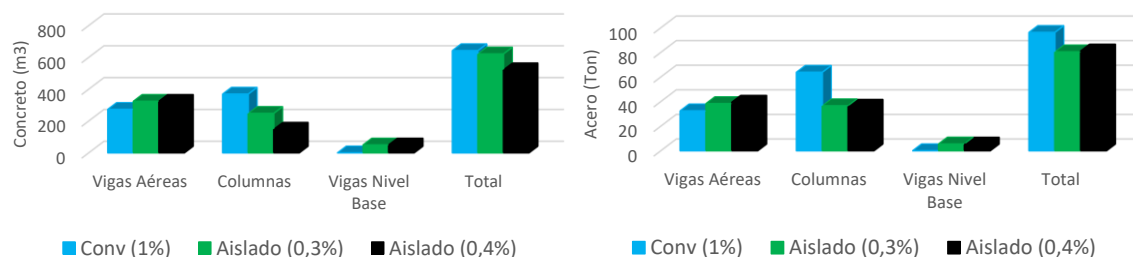


Figura 54: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para los diferentes elementos estructurales de cada edificio analizado en suelo intermedio.

- Edificios en suelo blando

Como se muestra en la Figura 55 (a), y contrario a las 2 situaciones anteriores, las 2 estructuras aisladas presentan una cantidad similar o mayor de concreto frente a las convencionales. Lo anterior se debe al hecho de que el ahorro significativo de concreto

conseguido en las columnas no logra compensar la mayor demanda de concreto que tiene lugar tanto en las vigas aéreas como en el nivel base.

Como se indica en 6.2.3, las estructuras aisladas sobre suelo blando presentan significativamente cortantes mayores inelásticos de diseño que las construcciones homólogas de referencia. Esto genera que las vigas en mención deban ser robustas y tener dimensiones mayores frente a las de la referencia para cumplir con el requisito de resistencia en su diseño.

Ahora, de acuerdo con la Figura 55 (b), las estructuras aisladas demandan mayor cantidad de acero. Lo anterior a pesar de que las columnas presentan un ahorro significativo con relación a la estructura de referencia. Esta observación se explica también por la robustez requerida por las vigas tanto aéreas como del nivel base. Pues su robustez demanda grandes cuantías de refuerzo, generando que la demanda total de acero se incremente.

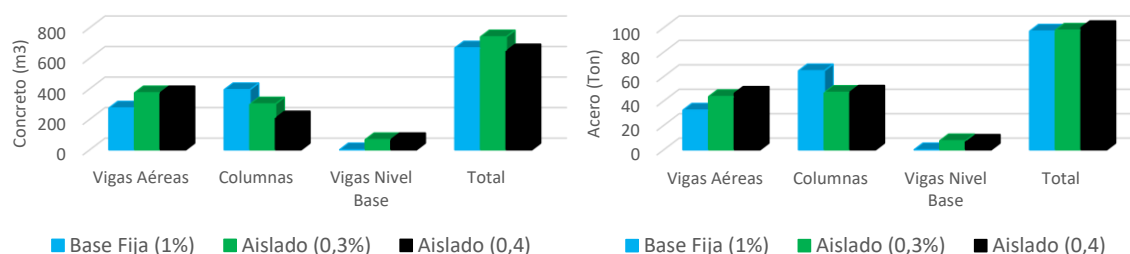


Figura 55: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para los diferentes elementos estructurales de cada edificio analizado en suelo blando.

6.4.2 Resumen de las variaciones porcentuales de materiales

A continuación se indican las variaciones porcentuales de los materiales de las estructuras aisladas frente a sus correspondientes edificaciones homólogas convencionales.

	Convencional (1%)	Aislado (0,3%)		Aislado (0,4%)	
	Cant. (m3)	Cant. (m3)	Variación	Cant. (m3)	Variación
Suelo firme (B)	427	430	100,67%	396	92,53%
Suelo Intermedio (D)	643	622	96,77%	523	81,34%
Suelo blando (E)	667	740	110,88%	648	97,14%

	Convencional (1%)	Aislado (0,3%)		Aislado (0,4%)	
	Cant. (ton)	Cant. (ton)	Variación	Cant. (ton)	Variación
Suelo firme (B)	57	63	109,19%	66	114,16%
Suelo Intermedio (D)	96	80	83,56%	81	84,30%
Suelo blando (E)	97	98	100,76%	100	103,36%

Tabla 28: Variación porcentual de las cantidades de materiales de las superestructuras de los edificios con aislamiento frente a los convencionales. Concreto (a), Acero (b)

La Tabla 28 muestra que solamente las edificaciones aisladas en suelo intermedio D demandan menores cantidades de materiales que sus correspondientes estructuras homólogas

convencionales. Para las demás edificaciones se requiere establecer su costo antes de poder concluir al respecto.

6.4.3 Subestructura

En esta sección se presentan las cantidades de insumos requeridas por la subestructura de cada uno de los dos edificios (el alcance de este trabajo comprende únicamente calcular la subestructura del edificio convencional y el aislado de deriva 0,3%).

La subestructura comprende el cálculo de los pedestales donde se apoyan los aisladores y la cimentación (dados y pilotaje). Este cálculo se desarrolla a partir de modelos de elementos finitos independientes para cada apoyo, a los cuales se les asignan las solicitaciones provenientes de la superestructura. Para este fin, se emplea un coeficiente de capacidad de disipación de energía, $R=1$, tanto para la estructura convencional como la aislada.

Adicionalmente, en el modelo se incluyen los módulos de balasto definidos por el geotecnista, cuyo estudio resumido se encuentra en el ANEXO 1.

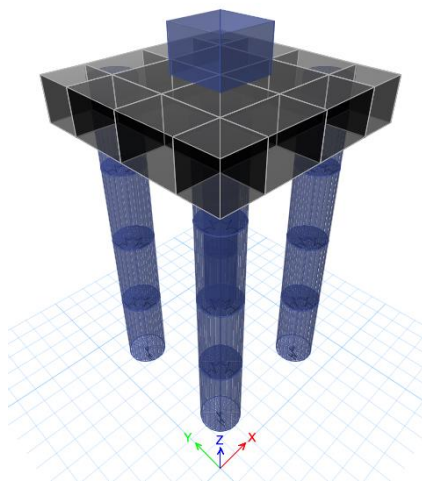


Figura 56: Modelo de elementos finitos de la cimentación. Incluye pedestal, dado y pilotes.

Como muestra la Figura 57(a), la cantidad de concreto de la subestructura del edificio con aislamiento es levemente inferior a la del edificio convencional debido a las menores dimensiones de los cabezales de los pilotes. Lo anterior se debe a que los momentos provenientes de la superestructura con aislamiento son significativamente inferiores frente a los de los edificios convencionales, cuyos apoyos están empotrados. De esta manera, el diseño de los cabezales puede ser más esbelto.

Por su parte, las subestructuras de los edificios con aislamiento sobre suelo intermedio y blando demandan levemente mayor cantidad de concreto que la de los edificios convencionales. Lo anterior como consecuencia de las mayores dimensiones del pilotaje de las primeras. Estas mayores dimensiones del pilotaje tienen su explicación en el hecho de que las superestructuras de los edificios aislados son más pesadas que las de los edificios convencionales debido a la inclusión del nivel base adicional (lo cual incorpora adición de

peso propio, carga sobre impuesta y viva). De esta manera, la cimentación de los edificios con aislamiento debe de ser más grande que la de los edificios homólogos convencionales con el fin de cumplir con la capacidad portante del terreno. En conclusión, las estructuras aisladas analizadas requieren en general de pilotes cada vez más grandes que los de las construcciones homólogas convencionales conforme se flexibiliza el estrato de fundación.

Como muestran las Figura 57 (b), Figura 58 (b) y Figura 59 (b) la subestructura de los edificios con aislamiento sísmico demanda significativamente menor cantidad de acero frente a la subestructura de los edificios convencionales. Esta observación se explica por el hecho de que las superestructuras de los edificios convencionales transmiten a la cimentación momentos muy grandes que deben de ser compensados por grandes cuantías de acero de refuerzo en los elementos de la cimentación. Por el contrario, las reacciones de los edificios con aislamiento presentan momentos significativamente inferiores, trabajando principalmente ante cargas axiales. De esta manera, la cimentación de los edificios aislados no posee cuantías significativas de refuerzo.

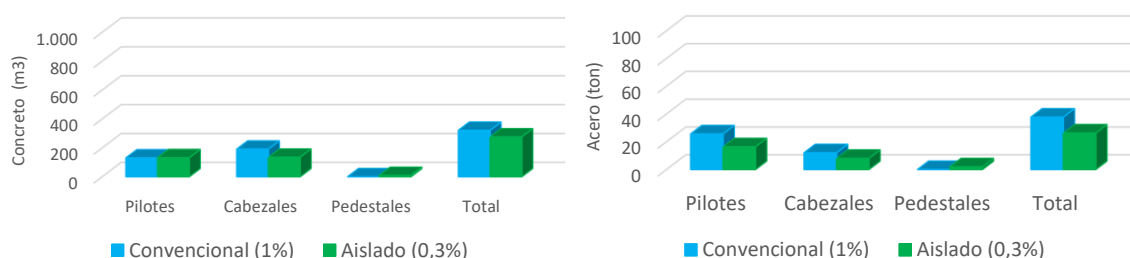


Figura 57: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para la cimentación de los edificios en suelo firme (B)

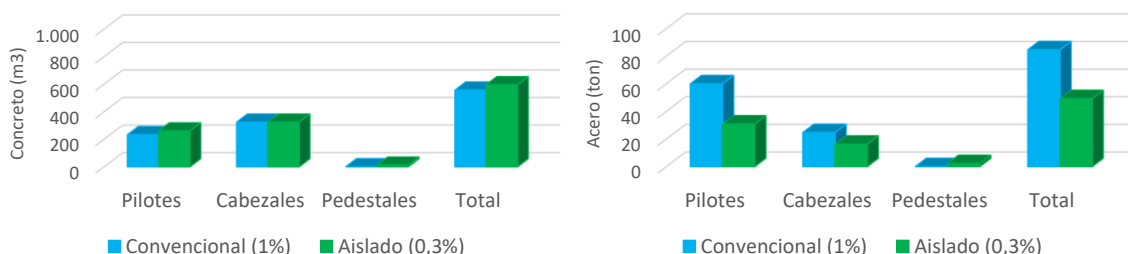


Figura 58: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para la cimentación de los edificios en suelo intermedio (D)

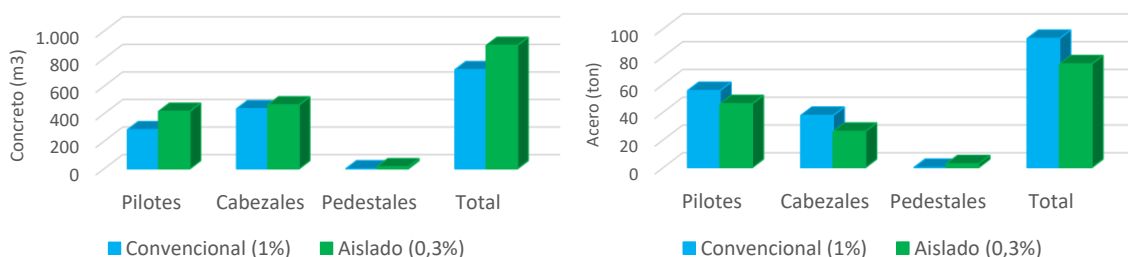


Figura 59: Comparación de las cantidades de concreto (a) y acero (b) para la cimentación de los edificios en suelo blando (E)

	Convencional (1%)	Aislado (0,3%)	
	Cant. (m3)	Cant. (m3)	Variación
Suelo firme (B)	322	276	85,74%
Suelo Intermedio (D)	557	596	106,94%
Suelo blando (E)	720	896	124,46%

	Convencional (1%)	Aislado (0,3%)	
	Cant. (ton)	Cant. (ton)	Variación
Suelo firme (B)	38	26	69,73%
Suelo Intermedio (D)	85	49	58,20%
Suelo blando (E)	93	75	80,30%

Tabla 29: Variación porcentual de las cantidades de materiales de los edificios aislados frente a los convencionales. Subestructura.

La Tabla 29 muestra que solamente las edificaciones aisladas en suelo firme B demandan menores cantidades de materiales que sus correspondientes estructuras homólogas convencionales. Para las demás edificaciones se requiere establecer su costo antes de poder concluir al respecto.

6.4.4 Sistema de aislamiento sísmico

A continuación se indican las características generales de los sistemas de aislamiento sísmico. Una descripción más detallada puede consultarse en 5.3.5.

Suelo/ Dispositivo	Firme (B)		Intermedio (D)		Blando (E)	
	Diámetro	Cantidad	Diámetro	Cantidad	Diámetro	Cantidad
LRB	570	12	700	24	800	24
LDRB	570	8	0	0	0	0
SLD	600	16	700	12	800	12

Tabla 30: Características generales de los sistemas de aislamiento sísmico para cada tipo de suelo

6.5 Costos de los materiales de construcción

Los precios de los insumos de obra (concreto y acero) son consultados en el portal de ConstruData (Legis, 2022) para la ciudad de Cali con fecha de corte de junio de 2.022. En esta consulta se establece los siguientes costos de estos insumos:

Concreto corriente grava común, 4000 PSI	m3	400.928,79	COP
--	----	------------	-----

Para el caso del acero, se calcula el valor de cada kg de material con base en los precios de las barras corrugadas reportadas en la publicación indicada. Posteriormente, se establece el promedio. De esta manera resulta:

Acero corrugado de refuerzo. Grado 60	kg	4.772,70	COP
---------------------------------------	----	----------	-----

6.5.1 Superestructura

Una vez establecidos los valores de los insumos, se establece el precio de las cantidades de obra y sus variaciones respecto a los edificios de referencia.

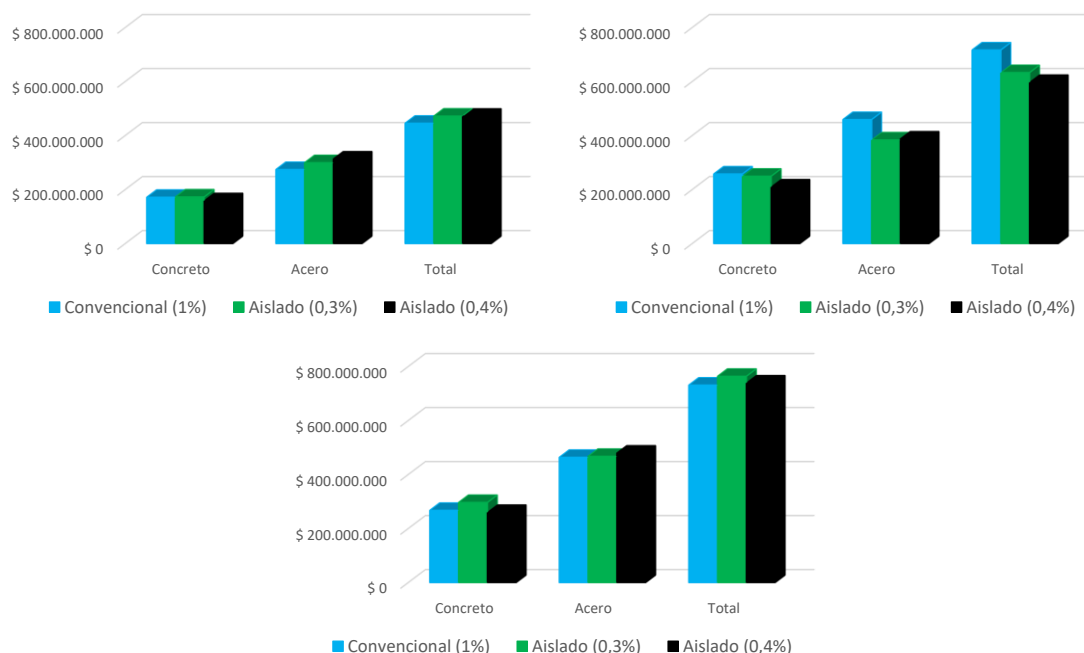


Figura 60: Costos de los insumos de obra para cada superestructura analizada. Suelo Firme (a), Suelo Intermedio (b) y Suelo Blando (c).

	Convencional	Aislado (0,3%)		Aislado (0,4%)	
	Costo	Costo	Variación	Costo	Variación
Suelo firme (B)	445.524.656	471.868.332	105,91%	471.533.608	105,84%
Suelo Intermedio (D)	716.820.180	633.000.353	88,31%	596.649.403	83,24%
Suelo blando (E)	731.962.476	763.693.802	104,34%	738.998.182	100,96%

Tabla 31: Variación porcentual del costo de las superestructuras de los edificios aislados frente a los convencionales según el tipo de suelo.

De acuerdo con la Figura 60 y la Tabla 31, no se puede generalizar que la implementación de los SAS implique una reducción o aumento de los costos de la superestructura aislada frente a la homóloga de base fija. Como muestran en estas referencias, para los suelos tipo B y E se presenta un leve incremento en el valor de la cantidad de los materiales de las superestructuras aisladas, los cuales se explican por:

- Suelo tipo B: la mayor demanda de acero por la implementación del nivel base y las grandes cuantías de las columnas de la estructura. Como se explicó anteriormente, el diseño de las secciones de las columnas frente a la verificación de la deriva permite secciones muy esbeltas que, una vez se les implemente el acero, requieren de cuantías muy elevadas para cumplir con el requisito de columna fuerte-viga débil. Este incremento de la demanda de acero hace que la superestructura aislada sea levemente más costos que la convencional.

- Suelo tipo E: el incremento de las demandas de concreto y acero por parte de las vigas aéreas y el nivel base como consecuencia del aumento significativo de los cortantes inelásticos de piso, los cuales ocasionaron que su diseño tuviera que ser bastante robusto para cumplir con el requisito de resistencia. Estas mayores demandas de concreto y acero hacen que la superestructura aislada sea levemente más costosa que la convencional.

Por el contrario, para la situación de suelo intermedio D, sí se presenta un ahorro significativo de los costos de los insumos de obra de la superestructura con aislamiento frente a la convencional. Esta última observación se explica a partir del hecho de que las demandas de concreto y acero por parte del sistema estructural, en particular de las columnas, pudo ser reducida significativamente como consecuencia de la reducción tan significativa de los cortantes elásticos de piso.

Podría contra argumentarse por qué la estructura en suelo firme B no presenta reducción del costo si se supone que en este estrato el aislamiento sísmico es altamente eficiente. Así mismo, por qué la superestructura en suelo firme D no presenta un ahorro comparable con el que tiene la superestructura aislada en suelo intermedio D si la reducción de las fuerzas sísmicas en ambos casos es equiparable del orden del 65%.

Al respecto, se destacan 2 ideas. De una parte, el sistema estructural del edificio con aislamiento en suelo firme B **sí** es más esbelto que el homólogo convencional. Lo anterior está representado en la reducción del concreto que requieren las columnas, como muestra la Figura 53. No obstante, esta reducción hace que las columnas tengan secciones tan pequeñas que deban de tener cuantías de acero muy elevadas, lo cual incrementa el costo general de la superestructura aislada frente a la convencional. Así mismo, la inclusión del nivel base adicional redundante en incrementar estos costos. En resumen, la estructura con aislamiento apoyada sobre suelo firme sí presenta una reducción de las dimensiones del sistema de resistencia sísmica.

De otra parte, la estructura convencional en suelo firme es muy esbelta y flexible, como lo muestra el hecho de que su diseño esté controlado por el índice de estabilidad en lugar de la deriva del 1%. Por tanto, dada esta flexibilidad, esta edificación convencional se ubica en la parte descendiente del espectro comprendida entre T_c y T_1 y no en la meseta del correspondiente espectro. De esta manera resulta que **1)** el diseño de la estructura convencional ya es de por sí mismo esbelto dado que no se diseñó con las máximas solicitaciones del espectro de suelo firme B y **2)** la reducción de la magnitud de las fuerzas inerciales por parte del edificio con aislamiento no fue tan acentuada como se suponía que debería de haberlo sido para este estrato (ver Figura 1). Es decir, la estructura está sujeta a los efectos de los edificios de altura elevada, en los cuales la eficiencia de los aisladores para reducir las fuerzas sísmicas se ve reducida dado que el correspondiente edificio convencional no se encuentra en la meseta del espectro.

Por el contrario, el edificio con aislamiento en suelo intermedio D sí experimentó una sensible reducción de las fuerzas sísmicas dado que su correspondiente estructura homóloga convencional sí está localizada en la meseta del espectro.

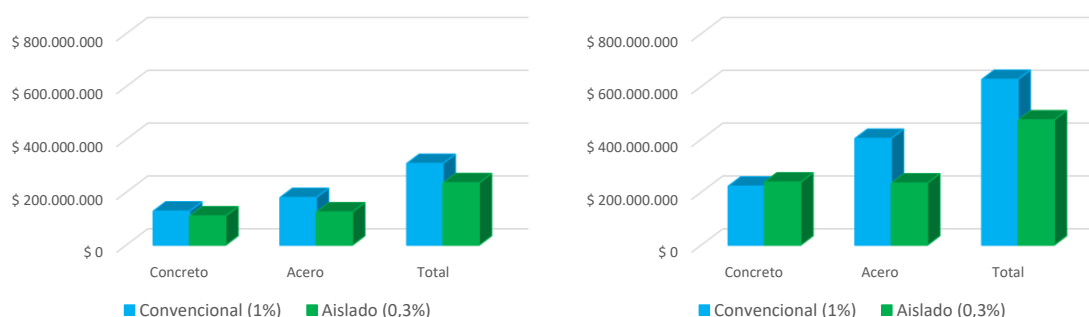
La Tabla 25 muestra la magnitud de las reducciones que experimentan las estructuras con aislamiento sísmico frente a las convencionales según el tipo de suelo.

6.5.2 Subestructura

De acuerdo con la Figura 61, sí se puede afirmar que la implementación de los SAS genera un ahorro significativo en la cimentación frente a la situación convencional. Básicamente, el ahorro se debe al impacto tan drástico que tiene la reducción de la demanda de acero en los costos de los insumos. Como se explicó anteriormente, las solicitaciones del edificio convencional se encuentran sometidas a momentos muy grandes provenientes de los apoyos que se encuentran empotrados. Estos momentos tan elevados requieren de cuantías de refuerzo elevadas en la cimentación. Por el contrario, las estructuras con aislamiento transmiten a su cimentación fuerzas axiales, principalmente. Así, su cimentación requiere de cuantías de refuerzo inferiores, resultando más económica que la del edificio convencional.

El sustento de este razonamiento obedece al hecho de que la cimentación de los 2 tipos de construcciones (aislada y convencional) se diseñan bajo el mismo coeficiente de capacidad de disipación de energía, $R=1$. De esta manera, las solicitaciones de la cimentación provenientes de la estructura convencional no están sujetas a efectos de reducción. Por tanto, su magnitud es considerablemente superior a las de las estructuras aisladas, según la Figura 46. Además, la restricción del grado de libertad de giros de las columnas hace que transmitan solicitaciones de este tipo muy grandes a la cimentación, lo cual genera grandes demandas de acero que incrementan el costo global de la cimentación convencional frente a la aislada.

Por el contrario, además de presentar fuerzas sísmicas de diseño inferiores, la estructura aislada transmite momentos de pequeña magnitud a la cimentación toda vez que su unión no es rígida sino que están desacopladas. Lo anterior hace que las demandas de acero por parte de la cimentación de la estructura con aislamiento sean inferiores, resultando en diseños más económicos, como muestra la Figura 61.



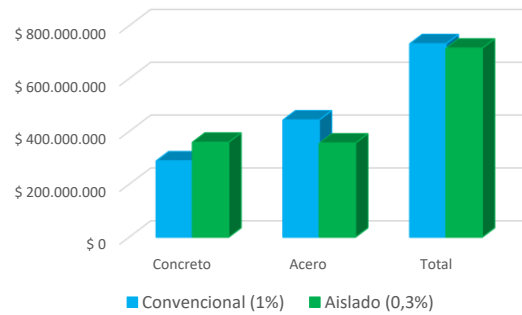


Figura 61: Comparación del costo del pilotaje de los distintos edificios analizados. Suelo firme (a), suelo intermedio (b) y suelo blando (c)

La cimentación de la estructura aislada en suelo E constituye un caso particular. Dado el incremento de cargas de la superestructura debido a la inclusión del nivel base, así como la baja competencia de las propiedades del suelo, su cimentación requería de dimensiones mayores para cumplir con el requisito de capacidad portante del terreno. De esta manera, el incremento de la demanda de concreto y el correspondiente acero de refuerzo hacen que el costo de la cimentación del edificio aislado sea similar al del edificio convencional.

6.5.3 Sistema de aislamiento sísmico

En la Tabla 30 se presenta un resumen de los dispositivos que conforman los SAS para cada edificación según el tipo de suelo.

Con relación a los costos de cada dispositivo, no fue posible su definición con los proveedores locales. En su lugar, se consulta diferentes trabajos de grado que incluyen precios de dispositivos de aislamiento con características similares a las de este proyecto. En este proceso se selecciona la investigación (Cano & Liberato, 2020) como fuente para el precio de los aisladores LRB y los deslizadores SLD. Por su parte, el precio de los dispositivos LDRB $\phi 570$ mm se toma igual al del LRB homólogo.

Los precios de dicho trabajo de investigación corresponden a apoyos con dimensiones mayores de 750 mm. De esta manera, se le asigna el costo consignado en esta investigación al aislador más grande del presente trabajo que corresponde a un aislador de diámetro de 800 mm. Por su parte, el costo de los demás apoyos de dimensiones menores, se establece suponiendo una variación del 5% con respecto al costo de referencia, así:

Tipo Aislador	Diámetro (mm)	Precio dispositivo (COP)
LRB	800	23.013.809,50
	700	21.863.119,03
	570	20.712.428,55
LDRB	570	20.712.428,55
SLD	800	14.645.151,50
	700	13.912.893,93
	600	13.180.636,35

Tabla 32: Costo de los dispositivos de aislamiento sísmico. Adaptado de (Cano & Liberato, 2020)

De conformidad con todo lo anterior, se define el precio de los sistemas de aislamiento para cada tipo de suelo, dando como resultado lo siguiente:

	Diámetro (mm)	Precio Unit. (COP)	Cantidad	Total (COP)
LRB	570	20.712.428,55	12	248.549.142,60
LDRB (Un.)	570	20.712.428,55	8	165.699.428,40
SLD (Un.)	600	13.180.636,35	16	210.890.181,60
Total				625.138.752,60

*Tabla 33: Costos implementación SAS en suelo firme (B).
Elaboración propia con información proveniente de (Cano & Liberato, 2020)*

	Diámetro (mm)	Precio Unit. (COP)	Cantidad	Total (COP)
LRB	700	21.863.119,03	24	524.714.856,60
SLD (Un.)	700	13.180.636,35	12	158.167.636,20
Total				682.882.492,80

*Tabla 34: Costos implementación SAS en suelo intermedio (D).
Elaboración propia con información proveniente de (Cano & Liberato, 2020)*

	Diámetro (mm)	Precio Unit. (COP)	Cantidad	Total (COP)
LRB	800	23.013.809,50	24	552.331.428,00
SLD (Un.)	800	14.645.151,50	12	175.741.818,00
Total				728.073.246,00

*Tabla 35: Costos implementación SAS en suelo blando (E).
Elaboración propia con información proveniente de (Cano & Liberato, 2020)*

La siguiente figura muestra una comparación entre los costos de los diferentes SAS según el tipo de suelo.

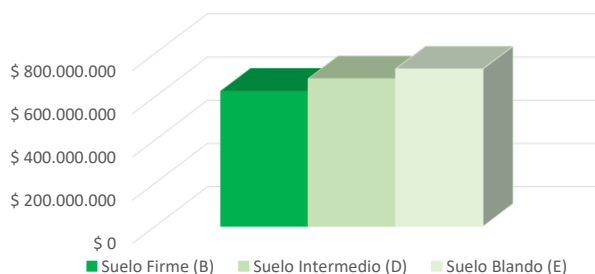


Figura 62: Comparación del costo de los diferentes SAS según el tipo de suelo

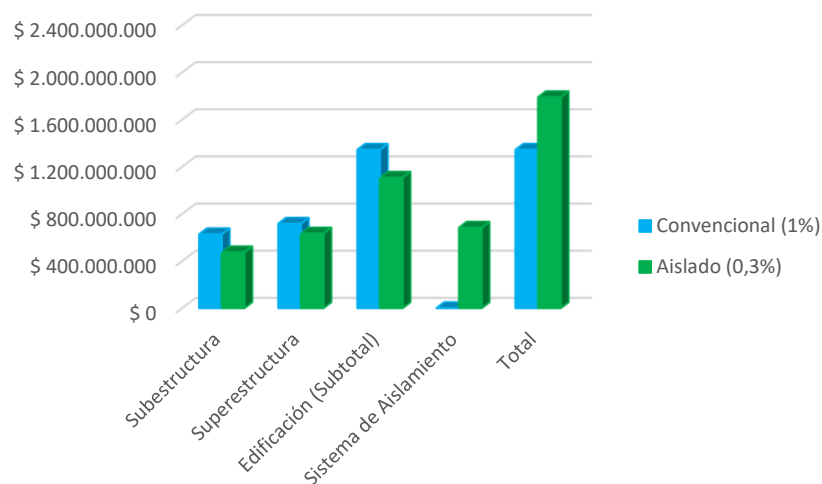
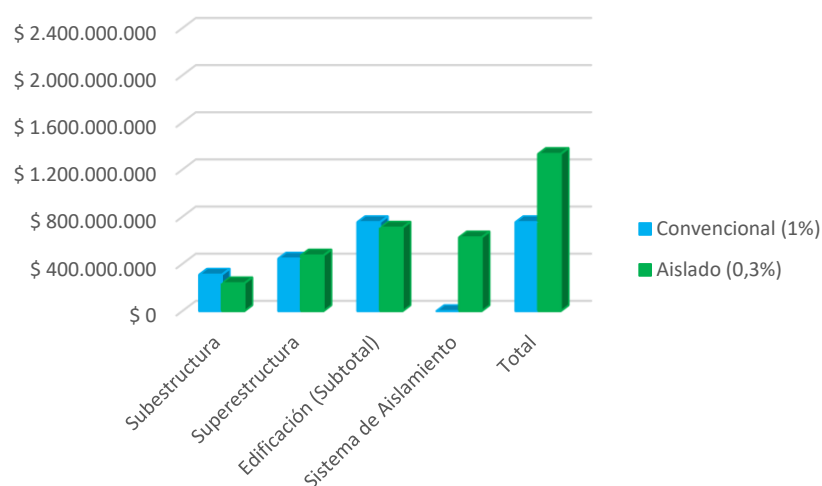
Con respecto al costo del SAS para el suelo firme, los costos de estos dispositivos para las situaciones de suelo intermedio y suelo blando se incrementan un 9% y un 16,5%, respectivamente.

6.5.4 Síntesis de los costos de cada edificación

La Figura 63 desagrega los costos de cada proyecto en las diferentes componentes analizadas en este trabajo de grado. Como se muestra, solamente para las situaciones con aislamiento de suelo firme e intermedio resulta que la estructura es más económica que la convencional. En el suelo blando, la estructura con aislamiento es ligeramente más costosa que la convencional.

Una comparación de las variaciones porcentuales de cada componente de la edificación aislada frente a la convencional según el tipo de suelo, se muestra en la Tabla 36.

De otra parte, el costo total del proyecto con aislamiento sísmico es superior al convencional dado lo costoso que resulta este sistema de aislamiento. De esta manera, el peso del SAS en la conformación del costo total del proyecto con aislamiento corresponde a un porcentaje importante del total, así: 46,89% para el suelo firme, 38,15% para el suelo intermedio y 33% para el suelo blando.



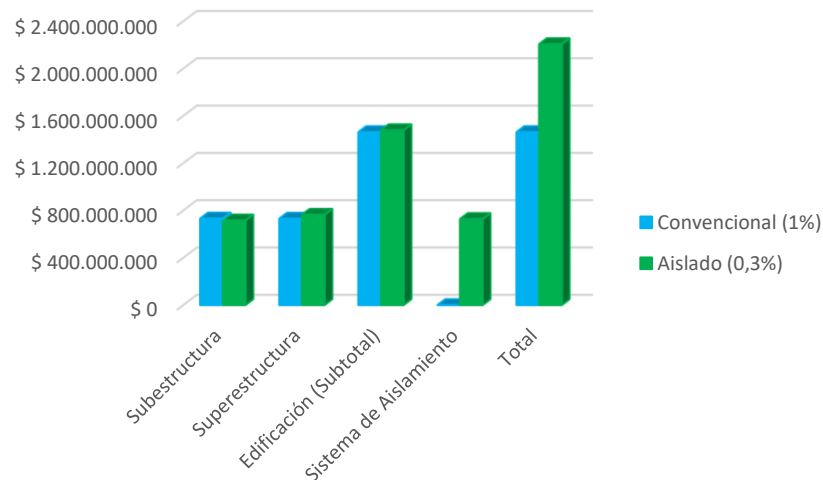


Figura 63: Desagregación de los costos de cada proyecto. Suelo firme (a), suelo intermedio (d) y suelo blando (c).

		Convencional	Aislado (0,3)	Variación	Aislado (0,4)	Variación
Suelo Firme (B)	Subestructura	309.169.995	236.223.595	76,41%	N.A.	
	Superestructura	445.524.656	471.868.332	105,91%	471.533.608	105,84%
	Subtotal	754.694.650	708.091.926	93,82%	N.A.	
	Sistema de Aislamiento	0	625.138.753		625.138.753	
	Total	754.694.650	1.333.230.679	176,66%		
Suelo Intermedio (D)	Subestructura	627.307.950	473.939.525	75,55%	N.A.	
	Superestructura	716.820.180	633.000.353	88,31%	596.649.403	83,24%
	Subtotal	1.344.128.130	1.106.939.878	82,35%	N.A.	
	Sistema de Aislamiento	0	682.882.493		682.882.493	
	Total	1.344.128.130	1.789.822.371	133,16%		
Suelo Blando (E)	Subestructura	731.962.476	715.211.227	97,71%	N.A.	
	Superestructura	731.059.500	763.693.802	104,46%	738.998.182	101,09%
	Subtotal	1.463.021.976	1.478.905.029	101,09%	N.A.	
	Sistema de Aislamiento	0	728.073.246		728.073.246	
	Total	1.463.021.976	2.206.978.275	150,85%		

Tabla 36: Comparación de los costos de cada parte de la estructura con aislamiento sísmico frente a la convencional, según el tipo de suelo.

Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación tiene 2 propósitos. Por una parte, analiza el comportamiento de la estructura con aislamiento sísmico en diferentes tipos de suelo para establecer cómo varía la eficiencia de los sistemas de aislamiento según las condiciones del estrato. Por otra parte, analiza los impactos en los costos predominantes del proyecto estructural (acero, concreto y dispositivos de aislamiento) que tiene la implementación de la solución con aislamiento frente a la solución convencional.

De conformidad con lo anterior, esta investigación realiza los análisis y diseños estructurales de edificios con aislamiento sísmico y sus soluciones homólogas convencionales (de base fija); estas últimas sirven para establecer valores de referencia para evaluar el desempeño de las soluciones con aislamiento sísmico, tanto en lo técnico como en lo económico.

El edificio objeto de análisis tiene un sistema estructural consistente de un pórtico resistente a momentos con capacidad especial de disipación de energía. La edificación tiene 8 niveles y presenta regularidad en planta y altura.

Conclusiones acerca del desempeño de los aisladores sísmicos en las distintas condiciones de suelo:

A continuación, se indican las conclusiones relacionadas con la evaluación del desempeño de los sistemas de aislamiento sísmico en los diferentes tipos de suelo.

1. Los sistemas de aislamiento sísmico presentaron un desempeño adecuado para las situaciones de suelo firme e intermedio en todos los aspectos evaluados en este trabajo frente a las estructuras convencionales: concentración de los desplazamientos en el nivel base, control de las deformaciones de la superestructura, reducción de las solicitaciones sísmicas de evaluación de la deriva junto con los correspondientes momentos de volcamiento. No obstante, presentaron un incremento leve de las solicitaciones de diseño de los elementos estructurales.

Respecto a este incremento, se destaca el hecho de que la normativa de referencia empleada en este proyecto para las estructuras con aislamiento sísmico, FEMA P-1050, requiere que se emplee el sismo MCEr ($T_r=2.475$ años) en lugar del sismo DBE ($T_r=475$ años) en el análisis y diseño de la estructura. Aunado a lo anterior, para el caso de las edificaciones convencionales, la norma de referencia adoptada en este trabajo, NSR-10, designa un factor $R=7$. Por todo lo anterior, las solicitaciones de diseño de los elementos estructurales presentaron un incremento para la situación con aislamiento sísmico dentro de esta investigación.

En conclusión, los SAS en suelos firmes e intermedios reducen satisfactoriamente las solicitaciones sísmicas elásticas y controlar las deformaciones de la estructura, aspectos que dotan a la construcción de un desempeño superior y la hacen más resiliente.

2. El primer inconveniente que presenta la implementación de sistemas de aislamiento sísmico en suelos blandos, para los períodos y amortiguamientos asumidos en este trabajo, se relaciona con la magnitud de los desplazamientos del sistema. De hecho, estos desplazamientos deben de controlarse para que no excedan las capacidades de desplazamiento de los aisladores comerciales para edificios. Y aun cuando los desplazamientos en mención pudieron controlarse satisfactoriamente en este trabajo por medio del incremento del amortiguamiento del sistema, dicho incremento del amortiguamiento implica una pérdida de eficiencia del sistema de aislamiento. Esta pérdida de eficiencia consiste en que el sistema se rigidiza y no extiende de manera tan significativa el período de la construcción como lo hacía en las situaciones de suelo firme e intermedio.

Aunado a esta rigidización del sistema de aislamiento sísmico, la forma espectral propia de los estratos blandos ocasiona que la reducción de las aceleraciones de la superestructura no sea tan drástica como en los otros tipos de suelo.

3. El hecho de que las fuerzas sísmicas se reduzcan de una manera menos eficiente en la situación de suelo blando, para los períodos y amortiguamientos asumidos en este trabajo, implica que la edificación está sujeta a momentos de volcamiento importantes que generan tensiones en los aisladores. Dichos momentos de volcamiento se deben de evaluar con el propósito de que no representen inconvenientes para la estabilidad de los aisladores. Igualmente, las mayores solicitaciones elásticas implicaron mayores solicitaciones de diseño de los elementos estructurales que no permitieron una reducción satisfactoria de sus secciones como sí sucedió en los suelos firme e intermedio.

4. No obstante, los aisladores en suelo blando continúan ofreciendo un control de las deformaciones de la superestructura tan eficiente como el control ejercido en las situaciones de suelo firme e intermedio. De hecho, los desplazamientos se continúan concentrando en el nivel base y la superestructura se comporta como un cuerpo rígido que se desplaza horizontal y lentamente sobre la interfaz de aislamiento.

5. De conformidad con lo anterior, la viabilidad técnica de la implementación de los sistemas de aislamiento sísmico en un suelo blando particular dentro de una zona de amenaza sísmica alta depende de un estudio de factibilidad en el cual se evalúen los aspectos mencionados, en particular los desplazamientos del nivel base ya que podrían conducir a un desaprovechamiento considerable del área construible. Así mismo, se deben de evaluar las fuerzas de diseño de los elementos estructurales (ya que podrían obtenerse diseños demasiado robustos y costosos) y las tensiones que aparecen en los dispositivos de aislamiento.

6. En este caso de estudio particular, para los períodos y amortiguamientos asumidos, los sistemas de aislamiento sísmico controlaron eficientemente los desplazamientos de los aisladores en suelo blando. Sin embargo, las solicitaciones elásticas se reducen en menor medida frente a las estructuras con aislamiento sísmico en suelo firme e intermedio. Consecuentemente, las solicitaciones de diseño de los elementos estructurales tienen una magnitud considerable y mayor que las de la estructura convencional de referencia. Esto último ocasiona que las secciones de los elementos estructurales sean robustas y demanden grandes cuantías de refuerzo y volúmenes de concreto, en particular, las vigas. De esta manera, el diseño resultante (concreto y acero) es más costoso frente al de la solución convencional.

Ahora bien, la pérdida de eficiencia de los aisladores en suelos blandos se relaciona con la estrategia que se implementó en este trabajo de incrementar el amortiguamiento suministrado por los sistemas de aislamiento con el fin controlar los desplazamientos de los aisladores. De hecho, el incremento del amortiguamiento rigidiza los sistemas de aislamiento, ocasionando que la estructura no se distancie significativamente de la meseta del espectro de aceleraciones. De esta manera, a la estructura le son transmitidos grandes solicitaciones inerciales.

Conclusiones acerca de la variación de las cantidades de materiales

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, y considerando los resultados comparativos con la estructura convencionales se puede concluir:

7. Los aisladores sísmicos son dispositivos que hoy en día todavía son costosos y que por tanto hacen que el costo a corto plazo de la solución con aislamiento resulte significativamente más elevado que el de la solución convencional. Con relación a la variación del costo total del proyecto con aislamiento frente al costo de la solución homóloga convencional, la situación más favorable corresponde a la del suelo intermedio D. Para esta situación, el proyecto incrementó su precio en un 33,16%. En segundo lugar, se encuentra la situación de suelo blando, el cual incrementó su valor en un 50,85%. Por último, se encuentra el proyecto sobre suelo firme, el cual incrementó su valor en un 76,66%.

La situación más favorable correspondió a la de suelo intermedio debido a que en ella el período del edificio convencional se ubicó dentro de la meseta del espectro. Por el contrario, en la situación de suelo firme, el período del edificio convencional se ubicó dentro de la parte descendente del espectro debido a que su período corto (T_c) es bajo, lo cual se asocia a una meseta corta. Por todo lo anterior, la reducción de fuerzas sísmicas y demanda de materiales (concreto y acero) resultó ser más satisfactoria en el estrato intermedio que en el firme.

8. El impacto que tiene la implementación del aislamiento en los costos de los insumos de obra de la superestructura es modesto frente al impacto de la subestructura (ver nota que acompaña a la conclusión 1). Para las superestructuras en suelo firme y blando se estableció un incremento del 5,91% y de 4,46%, respectivamente. Por el contrario, para el suelo intermedio se presentó una reducción del 11,69% en el costo de la superestructura.

9. De acuerdo con este trabajo, la implementación del aislamiento sísmico conlleva reducciones significativas en los costos de los insumos de obra de la subestructura que hacen que la estructura aislada resulte más económica que la estructura convencional o, en el peor de los casos, presente un leve incremento en su costo, como se comenta en 6. Para las situaciones más favorables correspondientes a los suelos firme B e intermedio D, se encontró que se presenta una reducción del 23,59% y 24,45% en el costo de la subestructura, respectivamente. Para la situación de suelo blando E, esta reducción fue menos significativa y sólo ascendió al 2,69%.

10. Para los períodos y amortiguamientos asumidos, el costo de la estructura y cimentación (acero y concreto) de la situación con aislamiento es menor frente a la solución convencional para los tipos de suelo firme e intermedio. Por el contrario, en el suelo tipo E, se presenta un leve incremento de la solución con aislamiento frente a la convencional.

11. Con respecto al sistema de aislamiento sísmico diseñado para el suelo firme B, el sistema de aislamiento del suelo D y E presentan incrementos del 9% y 16% en su precio, respectivamente.

Nota: Es importante resaltar que las conclusiones señaladas se circunscriben al presente trabajo debido a las normas de referencia empleadas en su desarrollo y a los períodos asumidos para las estructuras aisladas. Por tanto, se debe de tener especial precaución en generalizar estas conclusiones.

Al respecto, se hace hincapié en 2 aspectos. Por una parte, las normas de referencia son muy severas para las construcciones con aislamiento sísmico, como se explicó en la conclusión 1. De otra parte, en este trabajo se asumió la estrategia de restringir el desplazamiento de las construcciones en suelo blando a 40 cm, de acuerdo con los catálogos de aisladores comerciales para edificios disponibles. No obstante, este último punto puede ser controversial.

Recomendaciones para futuras investigaciones:

De conformidad con todo lo anterior, resultaría interesante investigar otros sistemas de protección sísmica que asistan a la estructura con aislamiento sísmico en el control de los desplazamientos en suelos blandos. En este sentido, se propondría investigar el trabajo conjunto de los aisladores sísmicos con amortiguadores de fluido viscoso ya que los mismos no incrementan la rigidez de la estructura como un todo sino que suministran únicamente amortiguamiento. De esta manera, la estructura como un todo sería lo suficientemente flexible para alejarse de la meseta del espectro de los suelos blandos y contaría con un medio para controlar los desplazamientos.

Así mismo, resultaría interesante investigar la solución con aislamiento sísmico sin imponer límites a la demanda de desplazamientos de los aisladores en suelos blandos. Lo anterior, permitiría flexibilizar más la estructura y observar la eficiencia de estos dispositivos sin esta restricción de desplazamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R., Almazán, J. L., Dechnet, P., & Suárez, V. (2016). *Aisladores de base elastoméricos y FPS* (D. Andrade (ed.); 1st ed.). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11675?show=full>
- Aguiar, R., Castillo, J., & Pazmiño, M. (2014). Diseño detallado de un aislador elastomérico con núcleo de plomo. *Revista CIENCIA*, 16(1), 107–138. [https://ia601502.us.archive.org/34/items/Articulo6Microbiologga/Articulo 7 Aisladores.pdf](https://ia601502.us.archive.org/34/items/Articulo6Microbiologga/Articulo%207%20Aisladores.pdf)
- Aguiar, R., Vergara, F., Guaygua, B., & Mongue, J. P. (2014). Análisis sísmico de una estructura con aisladores FPS de primera y segunda generación y elastomericos con núcleo de plomo. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19(1), 35–89. https://www.researchgate.net/publication/277813054_ANALISIS_SISMICO_DE_UNA_ESTRUCTURA_CON_AISLADORES_FPS_DE_PRIMERA_Y_SEGUNDA_GENERACION_Y_ELASTOMERICOS_CON_NUCLEO_DE_PLOMO
- Decreto No. 411.0.20.0158 de 2014 “Por el cual se adopta la microzonificación sísmica de Santiago de Cali y se definen sus respectivas curvas y parámetros de diseño estructural sismo resistente,” Pub. L. No. 411.0.20.0158 de 2014, 1 (2014).
- Almansa, F., Weng, D., Li, T., & Alfarah, B. (2020). Suitability of Seismic Isolation for Buildings Founded on Soft Soil. Case Study of a RC Building in Shanghai. *Buildings*, 10 (12), 241. <https://doi.org/10.3390/buildings10120241>
- Almufti, I., & Willford, M. (2013). *REDi™ Rating System Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings*. ARUP. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/redi-rating-system>
- American Society of Civil Engineers (ASCE), & Structural Engineering Institute (SEI). (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), (2010).
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica Comité AIS-180. (2013). *Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones*.
- Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2016). Life-Cycle Performance of Deteriorating Structural Systems under Uncertainty: Review. *Ascelibrary.Org*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001544](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001544)
- Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2017). Life-Cycle Performance of Civil Structure and Infrastructure Systems: Survey. *Ascelibrary.Org*, 144(1), 06017008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001923](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001923)
- Bozzo, L., & Barbat, A. (2000). *Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas*. Editorial Reverté, S.A.
- Bridgestone. (2017). *Seismic Isolation Product Line-up* (p. 75). Bridgestone. https://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/product.html
- Bueno, R. (2005). *Estudio de los criterios para el uso de aisladores elastómeros en la base en estructuras de concreto* [Universidad de Los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/10763>
- Cano, L., & Liberato, J. (2020). *Comparación Técnica y Económica de un Edificio para Aulas de Cinco Pisos con y sin Aislador Sísmico*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Carrillo, J. (2018). *Apuntes del curso Dinámica Estructural*. Universidad Militar Nueva Granada.

- Chopra, A. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Prentice Hall.
- Chuman, A., & Valladares, C. (2017). *Análisis y Diseño Estructural Comparativo de una Edificación de Quince Niveles, con y sin Aisladores Sísmicos Elastoméricos con Núcleo de Plomo, Ubicada en el Distrito de Pimentel* [San Martín de Porres]. <https://hdl.handle.net/20.500.12727/3440>
- Comunidad para la Ingeniería Civil. (2020). *Diplomado: Cálculo y diseño de edificios con sistemas avanzados de protección sísmica, aisladores sísmicos en la base y sistemas de amortiguamiento y disipadores sísmicos, según el ASCE/SEI 7*. Comunidad para la ingeniería civil.
- Departamento administrativo de gestión del medio ambiente (DAGMA); Instituto Colombiano de geología y minería (INGEOMINAS). (2005). *Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali*. Instituto Colombiano de geología y minería (INGEOMINAS). <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=BusquedaPredefinida=DGAMicrZonSismSantiagoCali>
- Dusi, A., Mezzi, M., & Fuller, K. (2008). The Largest Base-Isolation Project in the World. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 1–8.
- Dynamic Isolation Systems Inc. (2007). *Seismic isolation for buildings and bridges* (pp. 1–24). Dynamic Isolation Systems Inc.
- Federal Emergency Management Agency, & Building Seismic Safety Council. (2007). *NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA 451B): Training and Instructional Materials*. Federal Emergency Management Agency.
- Federal Emergency Management Agency, & Building Seismic Safety Council. (2015). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-1050)*. Federal Emergency Management Agency.
- Federal Emergency Management Agency, & Building Seismic Safety Council. (2016). *Seismically Isolated Structures*. In *2015 NEHRP. Recommended seismic provisions: Training and Instructional Materials (FEMA P-1052)*. Federal Emergency Management Agency.
- García, L. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Universidad de Los Andes.
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Corporación Andina de Fomento (CAF)-Banco de Desarrollo de América Latina. scioteca.caf.com
- Girish, M., & Pranesh, M. (2013). Sliding Isolation Systems: State-of-the-Art Review. *IOSR Journal of Civil Engineering*, 6, 30–35. https://www.researchgate.net/publication/260481189_Sliding_Isolation_Systems_State-of-the-Art_Review/citation/download
- González, S. (2020). *Análisis del comportamiento estructural y viabilidad económica del aislamiento sísmico de base en dos edificios de concreto reforzado ubicados en zona de actividad sísmica alta en Colombia. Estudios de caso: Clínica “Villa Clemencia” y edificio residencia* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78641>
- González, K., & Pérez, E. (2014). *Estudio Económico a Corto y Largo Plazo de una Edificación Aislada Sísmicamente en su Base Mediante Aisladores Elastoméricos* [Escuela de Ingeniería de Antioquia]. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2035>

- González, R., & Noguez, F. (1994). Respuesta teórica de un edificio con aisladores de base. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 46, 23–52. <https://doi.org/10.18867/RIS.46.279>
- Karabork, T., Deneme, I. O., & Bilgehan, R. P. (2014). A comparison of the effect of SSI on base isolation systems and fixed-base structures for soft soil. *Geomechanics and Engineering*, 7(1), 87–103. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.1.087>
- Komodromos, P. (2000). *Seismic isolation for earthquake-resistant structures*. WIT Press.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall, Inc.
- Legis. (2022). ConstrData. In *ConstrData*. <https://constrdata.com/>
- Mageba. (2022). *Aislador con Núcleo de Plomo LASTO®LRB* (p. 4). Mageba.
- Mayes, R. L., Jones, L. R., & Buckle, I. G. (1990). Impediments to the Implementation of Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6(2), 283–296. <https://doi.org/10.1193/1.1585570>
- Mayes, R. L., Jones, L. R., & Kelly, T. E. (1990). The Economics of Seismic Isolation in Buildings. *Earthquake Spectra*, 6(2), 245–263. <https://doi.org/10.1193/1.1585567>
- Mazza, F., & Labernarda, R. (2021). Internal Pounding between Structural Parts of Seismically Isolated Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 30. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1866122>
- Mcallister, T. (2013). *Developing guidelines and standards for disaster resilience of the built environment: A research needs assessment*. National Institute of Standards and Technology. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1795>
- Mitropoulou, C., Lagaros, N., & Papadrakakis, M. (2011). Life-cycle cost assessment of optimally designed reinforced concrete buildings under seismic actions. *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 1311–1331. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.04.002>
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: From theory to practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2006). Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones. *Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 6, 105–120. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010&lng=en&nrm=iso
- Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2009). Situación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica en Colombia. *Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 12, 113–124. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372009000200009&lng=en&nrm=iso
- Redacción de EL País. (2017, September 20). ¿Está Cali preparada para afrontar un gran terremoto como el que golpeó a México? *El País*. <https://www.elpais.com.co/cali/esta-preparada-para-afrontar-un-gran-terremoto-como-el-que-golpeo-a-mexico.html>
- Rochel, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios* (2nd ed.). Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Rosales, C. (2001). *Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia* [Universidad del Valle]. <https://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/Tesis-Cris-DocumentoFinal-13septiembre2001.pdf>
- Ruiz, J., & Gutiérrez, J. (2020). *Evaluación del costo directo de implementar aislamiento de base en edificaciones de uso normal en Colombia* [Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/892
- Sarria, A. (2008). *Terremotos e infraestructura* (2nd ed.). Universidad de Los Andes.

- Sauter, F. (1989). *Fundamentos de ingeniería sísmica I: Introducción a la sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Seed, H., Ugas, C., & Lysmer, J. (1976). Site-dependent spectra for earthquake-resistant design. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(1), 221–243. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article/66/1/221/117541>
- Taranath, B. (2005). *Wind and earthquake resistant buildings* (1st ed.). Marcel Dekker.
- Tena, A. (1996). Some retrofit options for the seismic upgrading of old low-rise school buildings in Mexico. *Earthquake Spectra*, 12(4), 883–902. <https://doi.org/10.1193/1.1585915>
- Terzic, V., Merrifield, S. K., & Mahin, S. (2012). Lifecycle Cost Comparisons of Different Structural Systems. *SEAOC 2012*, 1–15.

ANEXO 1

Resumen de las recomendaciones del estudio de suelos empleado en el presente trabajo
para la definición de la cimentación del edificio convencional y con aislamiento
sísmico de deriva 0,3%

Para la evaluación de los parámetros geotécnicos, se consideraron tres perfiles de suelo según la microzonificación sísmica de Cali; estos parámetros se presentan en la Tabla 1. Con estos datos y tomando como referencia la metodología alfa y la metodología de Reese y O'Neill 1988 se desarrollaron los cálculos de capacidad portante; posteriormente se calcularon asentamientos y coeficientes de balasto con uso de teoría elástica para deformaciones inmediatas.

<i>Suelo B</i>							
<i>z_i</i>	<i>z_f</i>	Y [kN/m ³]	N	Su [kPa]	c [kPa]	ϕ [°]	E [kPa]
0	10	21	50	120	15	32	45 000
10	50	23	60		18	35	50 000
<i>Suelo D</i>							
<i>z_i</i>	<i>z_f</i>	Y [kN/m ³]	N	Su [kPa]	c [kPa]	ϕ [°]	E [kPa]
0	10	19	30	80	14	25	29 000
10	50	20	37		17	30	33 000
<i>Suelo E</i>							
<i>z_i</i>	<i>z_f</i>	Y [kN/m ³]	N	Su [kPa]	c [kPa]	ϕ [°]	E [kPa]
0	10	17	20	70	27	21	20 000
10	50	18	26		32	25	27 000