



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Aplicación de sistemas de aislamiento sísmico en
edificaciones**

AUTOR:

Game Doylet, Daniel Eduardo

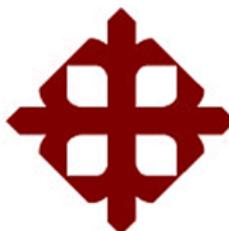
**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Argudo Rodríguez, Jaime Fernando Ph. D.

Guayaquil, Ecuador

2013



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Daniel Eduardo Game Doylet**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Jaime Fernando Argudo Rodríguez, Ph. D.

REVISORES

Mgs. Xavier Casal

Mgs. Sonia Baño

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Mario Dueñas Rossi

Guayaquil, a los 12 días del mes de Agosto del año 2013



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Daniel Eduardo Game Doylet**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Aplicación de sistemas de aislamiento sísmico en edificaciones** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 12 días del mes de Agosto del año 2013

EL AUTOR

Daniel Eduardo Game Doylet



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Daniel Eduardo Game Doylet**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Aplicación de sistemas de aislamiento sísmico en edificaciones**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 12 días del mes de Agosto del año 2013

EL AUTOR:

Daniel Eduardo Game Doylet

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, por darme la oportunidad de estar donde estoy hoy en día y por darme las fuerzas y la sabiduría para culminar mi carrera. A mis padres por estar ahí para apoyarme en todo momento, y por ayudarme a levantar cada vez que me topé con un obstáculo. A mi Director de Tesis el Ing. Jaime Fernando Argudo Rodríguez Ph. D., por guiarme sabiamente a lo largo de todo el trabajo. Al Ing. José Luis Larrea por haberme ayudado extraoficialmente con el trabajo y a todas aquellas personas que han aportado de cierta forma y me han ayudado a alcanzar esta meta.

Daniel Eduardo Game Doylet

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres, por siempre creer en mi e incitarme continuamente a buscar el crecimiento profesional y personal.

Daniel Eduardo Game Doylet

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Jaime Fernando Argudo Rodríguez, Ph. D.
TUTOR

Mgs. Xavier Casal
PROFESOR DELEGADO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

Ing. Jaime Fernando Argudo Rodríguez, Ph. D.

TUTOR

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	3
ALCANCE DEL ESTUDIO	3
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS	4
1.1.Principios fundamentales de los sistemas de aislamiento sísmico	4
1.2.Funciones principales	5
1.3.Tipos de dispositivos de aislamiento de base	6
1.4.Desventajas de los sistemas de aislamiento sísmico.....	8
CAPÍTULO II: PROPIEDADES MECÁNICAS	9
2.1.Descripción de las propiedades mecánicas de un sistema de aislamiento.	9
2.1.1.Comportamiento histerético y comportamiento viscoso.....	9
2.1.2.Comportamiento de fricción	10
2.2.Apoyos de aislamiento elastómero	11
2.2.1.Apoyos de caucho natural	12
2.2.2.Apoyos de caucho de gran amortiguamiento.....	13
2.2.3.Apoyos de caucho con núcleo de plomo	14
2.2.4.Limitaciones de los apoyos de aislamiento elastómero	16
2.3.Apoyos de deslizamiento	17
2.3.1.Apoyos de Aislamiento tipo Fricción de Superficie Plana	18
2.3.2.Péndulo de Fricción	18
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA GENERAL	23

3.1. Metodología de análisis y diseño de las estructuras sin aislamiento sísmico.....	24
3.1.1. Caracterización estructural del edificio “A”	24
3.1.1.1. Definición de la geometría	25
3.1.2. Caracterización estructural del edificio “B”	27
3.1.2.1. Definición de la geometría	29
3.1.3. Tipos de análisis	31
3.1.3.1. Análisis estático	31
3.1.3.2. Análisis Modal	32
3.1.3.3. Análisis dinámico espectral	32
3.1.3.4. Análisis dinámico lineal historia-tiempo	32
3.2. Metodología de análisis y diseño de las estructuras con aislamiento sísmico.....	33
3.2.1. Análisis estático	33
3.2.2. Análisis modal.....	33
3.2.3. Análisis dinámico espectral.....	33
3.2.4. Análisis dinámico no lineal historia-tiempo	34
 CAPÍTULO IV: DISEÑO DE LA SUPERESTRUCTURA.....	 35
4.1. Documentos de Referencia y Normas	35
4.2. Materiales Utilizados.....	35
4.3. Cargas de diseño	35
4.3.1. Cargas gravitacionales	35
4.3.1.1. Carga Muerta (D).....	35
4.3.1.2. Carga Viva (L)	36
4.3.2. Cargas de Diseño Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11).....	36
4.3.2.1. Método de las Fuerzas Laterales (Análisis Estático)	37
4.3.2.2. Espectro de Diseño (Análisis Espectral Dinámico).....	38
4.4. Combinaciones de carga	39
4.4.1. Combinaciones de carga de diseño del ACI 318-08.....	39

4.4.2. Combinaciones de carga de servicio	39
4.5. Diseño de edificio A	40
4.5.1. Chequeo de derivas.....	40
4.5.2. Cuantías y cantidades	41
4.5.3. Cantidades y costos en estructura edificio A	43
4.6. Diseño de edificio B	44
4.6.1. Chequeo de derivas.....	44
4.6.2. Cuantías y cantidades	45
4.6.3. Cantidades y costos en estructura edificio B	47
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO.....	49
5.1. Características del aislador sísmico.....	49
5.1.1. Parámetros del aislador sísmico.....	49
5.2. Características mecánicas de los aisladores empleados.....	52
5.3. Análisis Historia-Tiempo	53
5.3.1. Sismo Sintético 1	54
5.3.2. Sismo Sintético 2	54
5.3.3. Sismo Sintético 3	55
5.3.4. Sismo Sintético 4	55
5.3.5. Sismo Sintético 5	56
5.3.6. Sismo Sintético 6	56
5.3.7. Sismo “El Centro 1940”	57
5.3.8. Sismo de México 1986	57
5.3.9. Sismo de Guayaquil.....	58
CAPÍTULO VI: RESULTADOS OBTENIDOS	59
6.1. Resultados para el edificio “A” sin aisladores	59
6.1.1. Análisis Modal.....	59
6.1.2. Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo)	62

6.2.Resultados para el edificio “A” aislado	63
6.2.1.Análisis Modal.....	63
6.2.2.Análisis dinámico no lineal (Historia-Tiempo)	65
6.3.Resultados para el edificio “B” sin aisladores	68
6.3.1.Análisis Modal.....	68
6.3.2.Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo)	72
6.4.Resultados para el edificio “B” aislado	73
6.4.1.Análisis Modal.....	73
6.4.2.Análisis dinámico no lineal (Historia-Tiempo)	75
 CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS	 79
7.1.Análisis de resultados edificio “A”	79
7.1.1.Cortantes en la base empleando diferentes aisladores	79
7.1.2.Gráficas de cortante en la base vs. Tiempo	80
7.1.3.Gráficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs. Tiempo	84
7.2.Análisis de resultados edificio “B”	88
7.2.1.Cortantes en la base empleando diferentes aisladores	88
7.2.2.Gráficas de cortante en la base vs. Tiempo	89
7.2.3.Gráficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs. Tiempo	93
7.3.Historia-tiempo de los parámetros de interés.....	97
7.3.1.Discusión de requerimiento de FEMA 450 y NEC-11	97
7.3.1.1.Criterio FEMA 450 (ASCE 7-10).....	98
7.3.1.2.Criterio NEC-11	100
7.3.1.3.Criterios adoptados	101
7.3.2.Historia-tiempo del corte de diseño para el edificio A	105
7.3.3. Historia-tiempo del corte de diseño para el edificio B	106
7.3.4.Historia-tiempo desplazamiento de control edificio A	107
7.3.5.Historia-tiempo desplazamiento de control edificio B	107

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE COSTOS.....	108
8.1.Análisis contable	108
8.2.Análisis financiero	108
8.2.1.Estimación de daños usando funciones de vulnerabilidad	109
8.2.1.1.Estimación de daños edificio A.....	109
8.2.1.2.Estimación de daños edificio B.....	110
8.2.2.Cálculo de valor actual neto (VAN) de daños e inversión	111
8.2.2.1.VAN de daños e inversión edificio A.....	112
8.2.2.2.VAN de daños e inversión edificio B.....	113
CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
9.1.Conclusiones	114
9.2.Recomendaciones	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones de las columnas del edificio A	25
Tabla 2: Dimensiones de las vigas del edificio A sin aislamiento.....	25
Tabla 3: Dimensiones de las columnas del edificio B sin aislamiento.....	29
Tabla 4: Dimensiones de las vigas del edificio B	29
Tabla 5: Resumen de derivas de entrepiso para el edificio A sin aislamiento	40
Tabla 6: Cuantías y cantidades vigas edificio A.....	41
Tabla 7: Cantidades estribos de vigas edificio A.....	41
Tabla 8: Cuantías y cantidades columnas edificio A.....	42
Tabla 9: Cantidades estribos de columnas edificio A.....	42
Tabla 10: Cantidades losa tipo edificio A	42
Tabla 11: Resumen de materiales edificio A.....	43
Tabla 12: Tabla de cantidades y precios edificio A	43
Tabla 13: Resumen de derivas de entrepiso para el edificio B sin aislamiento	45
Tabla 14: Cuantías y cantidades vigas edificio B.....	45
Tabla 15: Cantidades estribos de vigas edificio B.....	46
Tabla 16: Cuantías y cantidades columnas edificio B.....	46
Tabla 17: Cantidades estribos de columnas edificio B.....	46
Tabla 18: Cantidades losa tipo edificio B	47
Tabla 19: Resumen de materiales edificio B.....	47
Tabla 20: Tabla de cantidades y precios edificio B	48

Tabla 21: Propiedades para el análisis lineal de los aisladores empleados en el edificio A.....	52
Tabla 22: Propiedades para el análisis no lineal de los aisladores empleados en el edificio A.....	53
Tabla 23: Participaciones de masa del edificio A sin aislamiento	59
Tabla 24: Resumen de cortantes en la base para edificio A sin aislamiento	62
Tabla 25: Cortante de control mínimo (80% del estático).	62
Tabla 26: Participación de masas para el edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm	63
Tabla 27: Participación de masas para el edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm	64
Tabla 28: Participación de masas para el edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm	65
Tabla 29: Cortante de control mínimo (80% del estático).	66
Tabla 30: Resumen de cortantes en la base para edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm	66
Tabla 31: Resumen de cortantes en la base para edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm	67
Tabla 32: Resumen de cortantes en la base para edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm	68
Tabla 33: Participación de masas para el edificio B sin aislamiento	69
Tabla 34: Resumen de cortantes en la base para el edificio B sin aislamiento	72
Tabla 35: Cortante de control mínimo (80% del estático)	72
Tabla 36: Participación de masas para el edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm.....	73

Tabla 37: Participación de masas para el edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm.....	74
Tabla 38: Participación de masas para el edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm.....	75
Tabla 39: Cortante de control mínimo (80% del estático).	76
Tabla 40: Resumen de cortantes en la base para edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm.	76
Tabla 41: Resumen de cortantes en la base para edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm	77
Tabla 42: Resumen de cortantes en la base para edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm	78
Tabla 43: Resumen de reducciones para los cortantes basales en el edificio A empleando aisladores.....	80
Tabla 44: Resumen de reducciones para los cortantes basales en el edificio B empleando aisladores.....	89
Tabla 45: Resumen R equivalentes NEC-11 edificio A.....	101
Tabla 46: Resumen R equivalentes FEMA 450 edificio A.....	102
Tabla 47: Resumen R equivalentes NEC-11 edificio B.....	103
Tabla 48: Resumen R equivalentes FEMA 450 edificio B.....	103
Tabla 49: Resumen de incremento de costos de inversión inicial para los edificios A y B, con y sin aisladores.	108
Tabla 50: Estimación de daños en base al R equivalente.	110
Tabla 51: Estimación de daños en base al R equivalente.	111
Tabla 52: Porcentaje de inversión recuperada, utilizando el concepto de valor actual neto (VAN) para el edificio A.	112

Tabla 53: Porcentaje de inversión recuperada, utilizando el concepto de valor actual neto (VAN) para el edificio B.113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Gráfica Período-Aceleración.....	4
Ilustración 2: Estructura sin aislamiento de base y estructura con aislamiento de base	5
Ilustración 3: Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (LDRB)	6
Ilustración 4: Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB).....	6
Ilustración 5: Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)	7
Ilustración 6: Aislador tipo fricción sin fuerza restauradora	7
Ilustración 7: Aislador de péndulo de fricción.....	8
Ilustración 8: Ciclo de comportamiento histerético (izquierda) y ciclo de comportamiento viscoso (derecha).	9
Ilustración 9: Ciclo de comportamiento histerético de fricción por deslizamiento para superficies planas (izquierda) y para superficies curvas (derecha).....	10
Ilustración 10: Apoyo elastomérico	11
Ilustración 11: Apoyo de caucho con placa de conexión forma no deformada y deformada	12
Ilustración 12: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores de bajo amortiguamiento	13
Ilustración 13: Aislador de gran amortiguamiento	13
Ilustración 14: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores de alto amortiguamiento	14
Ilustración 15: Aisladores de caucho con núcleo de plomo.....	15
Ilustración 16: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB)	15

Ilustración 17: Comparación del ciclo de desplazamiento por fuerza de corte para apoyos elastómeros con y sin núcleo de plomo	16
Ilustración 18: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores tipo fricción de superficie plana (sin fuerza restauradora)	18
Ilustración 19: Péndulo de fricción simple	19
Ilustración 20: Principio de funcionamiento del péndulo de fricción simple..	20
Ilustración 21: Combinación de fuerza restauradora y fricción.....	20
Ilustración 22: Péndulo de fricción simple y péndulo de fricción en operación	21
Ilustración 23: Ciclo de fuerza cortante-desplazamiento del péndulo de fricción simple (izquierda) y péndulo de fricción triple (derecha).....	21
Ilustración 24: Configuraciones de montaje del péndulo de fricción	22
Ilustración 25: Configuración de la estructura a modelar	24
Ilustración 26: Sección de la losa tipo del edificio A.....	26
Ilustración 27: Modelo estructura sin aislamiento sísmico en la base	27
Ilustración 28: Configuración de la estructura a modelar	28
Ilustración 29: Sección de la losa tipo del edificio B.....	30
Ilustración 30: Modelo estructura sin aislamiento sísmico en la base.....	31
Ilustración 31: Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.....	38
Ilustración 32: Espectro sísmico elástico (R=1) e inelástico (reducido por R=6) de aceleraciones para el suelo tipo E de la ciudad de Guayaquil.	39
Ilustración 33: Aislamiento sísmico en la base de la estructura.....	49
Ilustración 34: Parámetros del aislador.....	50
Ilustración 35: Propiedades del apoyo.....	51

Ilustración 36: Propiedades mecánicas verticales (lineales) del apoyo, utilizadas para todo tipo de caso.....	51
Ilustración 37: Propiedades mecánicas horizontales (lineales y no lineales) del apoyo.	52
Ilustración 38: Acelerograma sismo sintético 1	54
Ilustración 39: Acelerograma sismo sintético 2	54
Ilustración 40: Acelerograma sismo sintético 3	55
Ilustración 41: Acelerograma sismo sintético 4	55
Ilustración 42: Acelerograma sismo sintético 5	56
Ilustración 43: Acelerograma sismo sintético 6	56
Ilustración 44: Acelerograma "Sismo del centro de 1940" en California	57
Ilustración 45: Acelerograma sismo de México 1986	57
Ilustración 46: Acelerograma sismo de Guayaquil, centro de la ciudad	58
Ilustración 47: Modo 1 de vibración, traslación en X.....	60
Ilustración 48: Modo 2 de vibración, traslación en Y.....	61
Ilustración 49: Modo 3 de vibración, rotacional.....	61
Ilustración 50: Modo 1 de vibración, traslación en X.....	70
Ilustración 51: Modo 2 de vibración, traslación en Y.....	70
Ilustración 52: Modo 3 de vibración, rotacional.....	71
Ilustración 53: Cortante basal Sintético 1 vs. Tiempo.	81
Ilustración 54: Cortante basal Sintético 2 vs. Tiempo.	81
Ilustración 55: Cortante basal Sintético 3 vs. Tiempo.	82
Ilustración 56: Cortante basal Sintético 4 vs. Tiempo.	82
Ilustración 57: Cortante basal Sintético 5 vs. Tiempo.	83

Ilustración 58: Cortante basal Sintético 6 vs. Tiempo.	83
Ilustración 59: Cortante basal sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo... ..	84
Ilustración 60: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 1 vs. Tiempo.	85
Ilustración 61: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 2 vs. Tiempo.	85
Ilustración 62: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo	86
Ilustración 63: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 4 vs. Tiempo.	86
Ilustración 64: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 5 vs. Tiempo.	87
Ilustración 65: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 6 vs. Tiempo.	87
Ilustración 66: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo.	88
Ilustración 67: Cortante basal Sintético 1 vs. Tiempo.	90
Ilustración 68: Cortante basal Sintético 2 vs. Tiempo.	90
Ilustración 69: Cortante basal Sintético 3 vs. Tiempo.	91
Ilustración 70: Cortante basal Sintético 4 vs. Tiempo.	91
Ilustración 71: Cortante basal Sintético 5 vs. Tiempo.	92
Ilustración 72: Cortante basal Sintético 6 vs. Tiempo	92
Ilustración 73: Cortante basal sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo... ..	93
Ilustración 74: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 1 vs. Tiempo.	94

Ilustración 75: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 2 vs. Tiempo	94
Ilustración 76: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 3 vs. Tiempo.	95
Ilustración 77: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 4 vs. Tiempo.	95
Ilustración 78: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 5 vs. Tiempo.	96
Ilustración 79: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 6 vs. Tiempo.	96
Ilustración 80: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo.	97
Ilustración 81: Espectro reducido por R equivalente NEC-11 edificio A.....	102
Ilustración 82: Espectro reducido por R equivalente FEMA450 edificio A ..	102
Ilustración 83: Espectro reducido por R equivalente NEC-11 edificio B.....	103
Ilustración 84: Espectro reducido por R equivalente FEMA450 edificio B ..	104
Ilustración 85: Historia-tiempo cortante de diseño	105
Ilustración 86: Historia-tiempo cortante de diseño	106
Ilustración 87: Historia-tiempo desplazamiento de control	107
Ilustración 88: Historia-tiempo desplazamiento de control	107
Ilustración 89: Funciones de vulnerabilidad de las edificaciones de Guayaquil	109

RESUMEN

Durante mucho tiempo, el diseño sismo-resistente de edificaciones se ha basado en un concepto de diseño por ductilidad, a pesar de que el desempeño de dicho concepto se ha probado insatisfactorio durante sismos de gran intensidad. Por esta razón, se plantea al sistema de aislamiento sísmico de base, como una alternativa viable para el diseño sismo-resistente de edificaciones.

El uso de aisladores sísmicos supone el diseño de estructuras con mejor desempeño sísmico, acompañado de un impacto económico. En este trabajo se busca evaluar la reducción de la demanda sísmica en edificaciones y el correspondiente impacto económico, propiciados por el uso de aisladores, determinando el nivel de desempeño sísmico en base al coeficiente de reducción de respuesta R demandado para las estructuras con aisladores, como resultado de la fuerza de diseño de NEC-11 sobre cada estructura.

Para lograr esto, se modelaron dos estructuras de hormigón armado de siete pisos de altura con diferente redundancia (cantidad de ejes de columna), cimentados sobre el suelo blando tipo E de la ciudad de Guayaquil, con y sin aisladores sísmicos, y se analizaron los resultados obtenidos.

Al final del trabajo se llega a la conclusión de que el uso de aisladores sísmicos brinda beneficios al ser aplicados a estructuras sobre suelos blandos como los de Guayaquil, pero que dichos beneficios se ven limitados por los códigos de diseño y el bajo aprovechamiento que se le puede dar a los sistemas de aislamiento sísmico. Los resultados de este estudio sustentan una mayor efectividad y obtención de beneficios en el uso de aisladores para estructuras esenciales, redundantes y de más de 7 pisos de altura.

Palabras Claves: Aisladores sísmicos, NEC-11, impacto económico, desempeño estructural, coeficiente de reducción de respuesta R , análisis historia-tiempo.

INTRODUCCIÓN

Por algún tiempo, el diseño sismo –resistente de edificaciones se ha basado en un concepto de diseño por ductilidad. Esto sigue siendo una realidad a pesar de que el desempeño de dichas estructuras dúctiles ha sido probado insatisfactorio durante sismos de gran intensidad para el caso de:

- Estructuras poco redundantes.
- Estructuras muy flexibles que fallan por volteo.
- Estructuras diseñadas con mecanismo de “columna fuerte, viga débil” que no se forma en la práctica, debido a la existencia de paredes que forman columnas cortas que fallan por cortante y no por flexión.
- Inadecuado detallamiento del acero en conexiones.

Para fortalecer la seguridad estructural e integridad de las edificaciones durante sismos fuertes, se necesitan técnicas, o conceptos, confiables y eficientes para el diseño sísmico de edificaciones. Entre las opciones a considerar se tiene el sistema de aislamiento de base como una de las alternativas más prometedoras, el cual se puede adoptar tanto en estructuras nuevas como en estructuras existentes.

El objetivo de los sistemas de aislamiento sísmico es separar a la estructura de la edificación de los efectos más adversos de un sismo, previniendo que la superestructura absorba la energía del sismo. El aislamiento sísmico se logra apoyando a la estructura sobre aisladores cuyas características dinámicas son escogidas para desacoplar el movimiento del suelo con el de la estructura. También se utiliza a los aisladores con el fin de adicionar amortiguamiento sustancial a las estructuras, reduciendo de esta forma la amplitud de los esfuerzos internos máximos. Los desplazamientos y la fluencia se concentran al nivel de los dispositivos de aislamiento, y la superestructura tiende a comportarse en gran medida como un cuerpo rígido, con absorción mínima de fuerzas sísmicas al interior de la estructura. En general, las edificaciones con aislamiento de base se diseñan para que la

superestructura se mantenga en el rango elástico, y la inelasticidad aprovechable para disipar energía se localice en los dispositivos de aislamiento.

Algunos de los sistemas de aislamiento más utilizados son los apoyos de caucho laminado (elastoméricos) y los sistemas de aislamiento por deslizamiento. Los apoyos de caucho laminado (elastoméricos) por su flexibilidad lateral considerable, ayudan a reducir las fuerzas sísmicas cambiando el periodo fundamental de la estructura, de esta forma se evita la resonancia con la frecuencia predominante del sismo. Por otro lado, los sistemas de aislamiento por deslizamiento, limitan las fuerzas transferidas a la superestructura por medio de las fuerzas de fricción. El desempeño de las edificaciones con aislamiento de base en diferentes partes del mundo ha establecido que esta tecnología es una alternativa viable para el diseño sismo-resistente de edificaciones, que estarían en condición resonante con el suelo, sin el empleo de los dispositivos de aislamiento.

El enfoque de este trabajo está en los sistemas de aislamiento de base. Para fines ilustrativos solamente, se mencionará y describirá otros sistemas de aislamiento disponibles.

OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL:

Determinar el impacto que tendría el uso de aisladores sísmicos en edificaciones, teniendo como indicadores a los esfuerzos y deformaciones sufridos por los elementos estructurales de edificaciones tipo y su correspondiente impacto económico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar las características de los diferentes tipos de aisladores sísmicos de base disponibles en el mercado.
- Reconocer los beneficios económicos y de desempeño estructural obtenidos del uso de aisladores sísmicos.

ALCANCE DEL ESTUDIO

El estudio está dirigido a las edificaciones que pueden experimentar la máxima fuerza sísmica de un Espectro de Diseño de Norma Ecuatoriana NEC-11 cuando se construyen sin aisladores sísmicos. Para el efecto, se usan dos estructuras de hormigón armado de 7 pisos cimentados sobre los suelos blandos de la ciudad de Guayaquil y se compara su desempeño sísmico con similares estructuras construidas con aislamiento sísmico. El análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones, se centra en comparar la variación en los esfuerzos sufridos por los elementos estructurales de edificaciones diseñadas con y sin aisladores sísmicos, en el evento de un sismo, y el impacto económico derivado del uso de diseños que incorporen aisladores sísmicos con relación a aquellos que no lo usan.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS

1.1.Principios fundamentales de los sistemas de aislamiento sísmico

Una forma eficiente de mejorar el desempeño sísmico de una estructura se da cuando se incrementa artificialmente el periodo de vibración de una estructura y la capacidad de disipar energía de la misma. Esto se logra mediante el uso de dispositivos diseñados para aislar parte de la estructura de las vibraciones de un sismo (producidas en la base de la estructura). Los dispositivos son diseñados para disipar grandes cantidades de energía reduciendo la energía del sismo que le llega a la superestructura. Los dispositivos de aislamiento tienen el objetivo de aumentar el período de vibración de una estructura, hasta un valor con amplificación menor dentro del espectro de respuesta. Adicionalmente, los dispositivos de disipación de energía proveen amortiguamiento suplementario al interno de la estructura y de esta forma reducen la demanda de esfuerzos sobre los elementos estructurales. Los disipadores de energía y los amortiguadores pueden utilizarse de forma combinada para obtener los mayores beneficios.

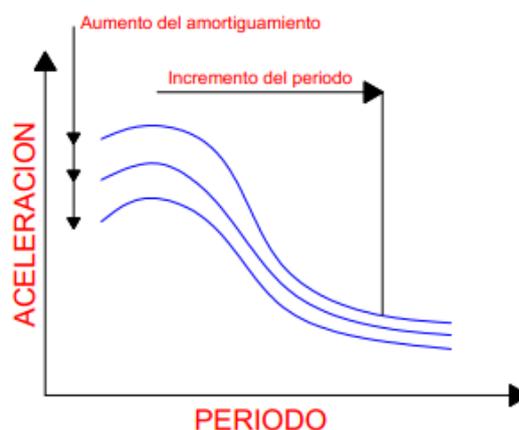


Ilustración 1: Gráfica Período-Aceleración

Fuente: (Cando, Monrroy, Ortega, & Puerres, 2012)

Los aisladores tienen propiedades físicas que se diseñan para mantener a los elementos de la superestructura dentro del rango elástico, o para controlar la ductilidad de los mismos. La mayor parte de los desplazamientos de una estructura puede concentrarse en los dispositivos de aislamiento, dejando que la estructura sufra una deformación relativamente pequeña, comportándose prácticamente como un cuerpo rígido, como un sistema elástico, o inelástico con baja demanda de ductilidad.

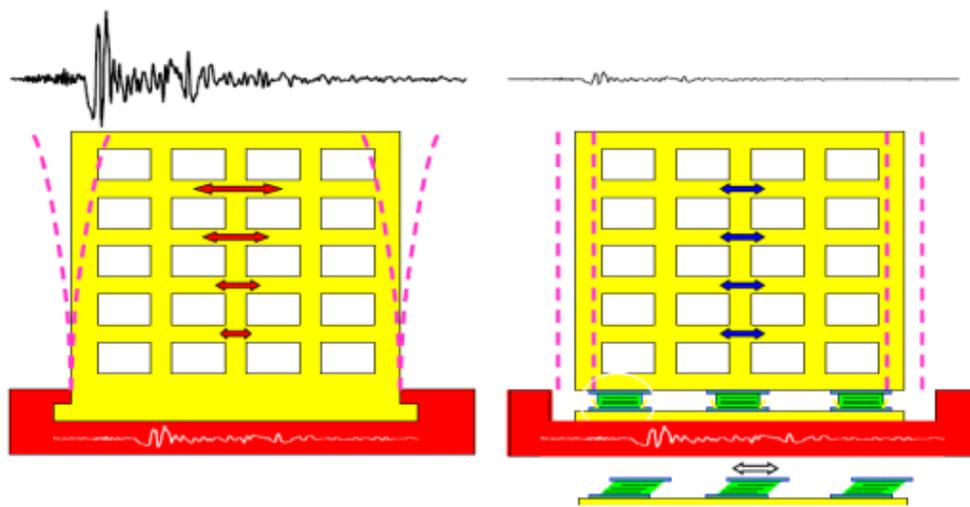


Ilustración 2: Estructura sin aislamiento de base y estructura con aislamiento de base

Fuente: (Cando, Monroy, Ortega, & Puerres, 2012)

1.2.Funciones principales

Las funciones principales de un sistema de aislamiento para una estructura pueden ser una combinación de las siguientes:

- Soportar las cargas gravitacionales de la estructura.
- Incrementar artificialmente el periodo de la estructura.
- Proveer de flexibilidad lateral a la estructura.
- Proveer a la estructura de una fuerza de restauración (una fuerza que permita a la estructura regresar a su posición inicial).
- Disipar energía.

1.3. Tipos de dispositivos de aislamiento de base

Entre los tipos más comunes de dispositivos anti-sísmicos de base están:

- Aisladores Elastoméricos Naturales o de Bajo Amortiguamiento (LDRB).



Ilustración 3: Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (LDRB)

Fuente: (Guerrero, 2011)

- Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento (HDRB).



Ilustración 4: Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB)

Fuente: (Arriagada, 2005)

- Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB).



Ilustración 5: Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

Fuente: (Maurer Söhne Group, 2005)

- Aisladores Tipo Fricción.

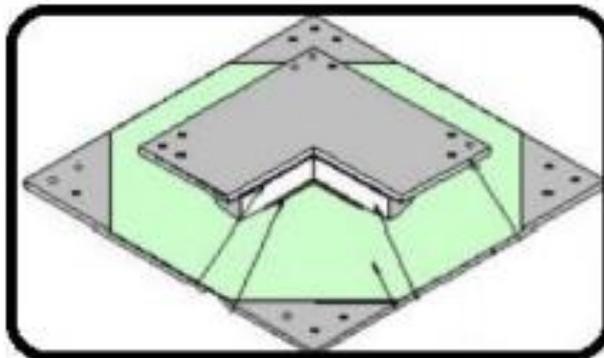


Ilustración 6: Aislador tipo fricción sin fuerza restauradora

Fuente: (Guerrero, 2011)

- Aisladores de Péndulo Friccional.



Ilustración 7: Aislador de péndulo de fricción

Fuente: (Guerrero, 2011)

1.4.Desventajas de los sistemas de aislamiento sísmico

Los dispositivos de aislamiento tienen algunas desventajas:

- Las propiedades de los dispositivos aisladores varían de acuerdo a los efectos del uso, envejecimiento, temperatura, historial de carga, etc.
- La restauración del dispositivo de aislamiento a su posición inicial, después de un evento sísmico que haya causado cualquier tipo de desplazamiento, es muy importante y debe ser tomado en cuenta en el diseño del mismo.
- La generación de calor, debido al movimiento relativo en el dispositivo aislador, puede ser un problema para el buen funcionamiento del mismo y puede tener un impacto en su vida útil.

El factor económico debe ser considerado, ya que los costos de construcción de estructuras con aislamiento sísmico usualmente aumentan en un 5-10% el costo de las estructuras sin aislamiento.

CAPÍTULO II: PROPIEDADES MECÁNICAS

2.1.Descripción de las propiedades mecánicas de un sistema de aislamiento.

Las propiedades de los aisladores dependen de su comportamiento, el cual puede ser uno o algunos de los siguientes:

2.1.1.Comportamiento histerético y comportamiento viscoso

El comportamiento histerético tiene una relación entre fuerza y deformación en el aislador que puede ser definido por un lazo de trayectoria cerrada con fuerzas cíclicas reversibles, y puede ser aproximado por una relación bilineal, en la cual la energía disipada por el ciclo de desplazamiento de diseño es igual al área encerrada por dicho ciclo de histéresis. En cambio, en el comportamiento viscoso, la fuerza de los dispositivos es proporcional a la velocidad del movimiento; Esta fuerza de amortiguamiento es nula para los desplazamientos máximos y por eso dicho dispositivo, no contribuye a la rigidez efectiva del sistema de aislamiento.

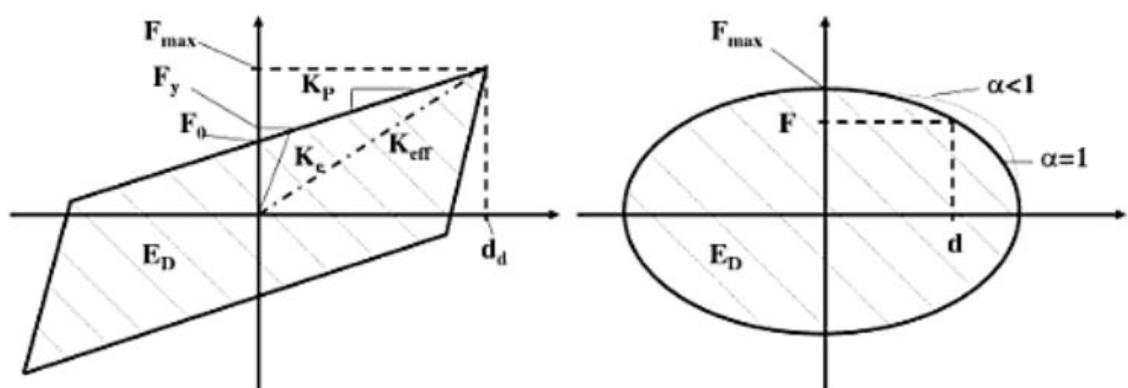


Ilustración 8: Ciclo de comportamiento histerético (izquierda) y ciclo de comportamiento viscoso (derecha).

Fuente: (Calvi, y otros, 2007)

2.1.2. Comportamiento de fricción

Hay dos tipos de comportamiento de fricción, entre estos están:

- Dispositivos de deslizamiento de superficie plana
- Dispositivos de superficie esférica

Los dispositivos de deslizamiento de superficie plana limitan la fuerza que es transmitida a la superestructura en función a la fuerza normal que soporta el dispositivo. Debido a los posibles desplazamientos permanentes importantes que pueden sufrir dichos dispositivos, deberían utilizarse en combinación con dispositivos que provean al sistema de una fuerza restauradora adecuada.

Los dispositivos de deslizamiento de superficie esférica, proveen una fuerza restauradora proporcional al desplazamiento de diseño.

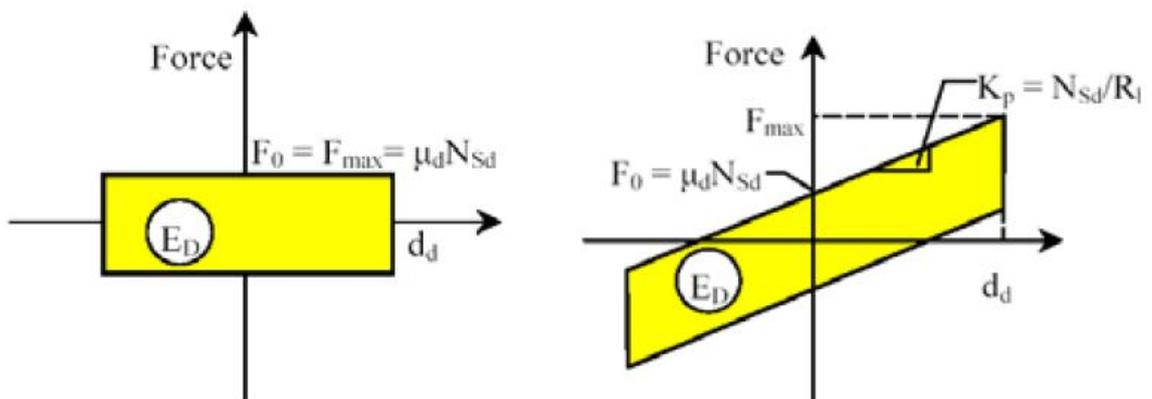


Ilustración 9: Ciclo de comportamiento histerético de fricción por deslizamiento para superficies planas (izquierda) y para superficies curvas (derecha)

Fuente: (Calvi, y otros, 2007)

2.2. Apoyos de aislamiento elastómero

Un apoyo de aislamiento elastómero está compuesto por una cantidad de capas de caucho y cuñas/calces de acero, unidas en capas alternadas, para producir un aislador que sea verticalmente rígido pero a la vez lateralmente flexible. Las capas alternadas de caucho y acero actúan en conjunto para restringir el pandeo lateral de las capas de caucho.

Este tipo de apoyos puede proveer al sistema de flexibilidad y de fuerzas histeréticas y viscosas con amortiguamiento desde bajo a alto. También se puede utilizar un núcleo de plomo dentro de aislador elastómero para proveer al sistema de disipación de energía para la respuesta sísmica y rigidez para las cargas estáticas.

Los tipos de apoyos de aislamiento elastómero disponibles son:

- Apoyos de caucho natural de bajo amortiguamiento (LDB).
- Apoyos de caucho de gran amortiguamiento (HDRB).
- Apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB).

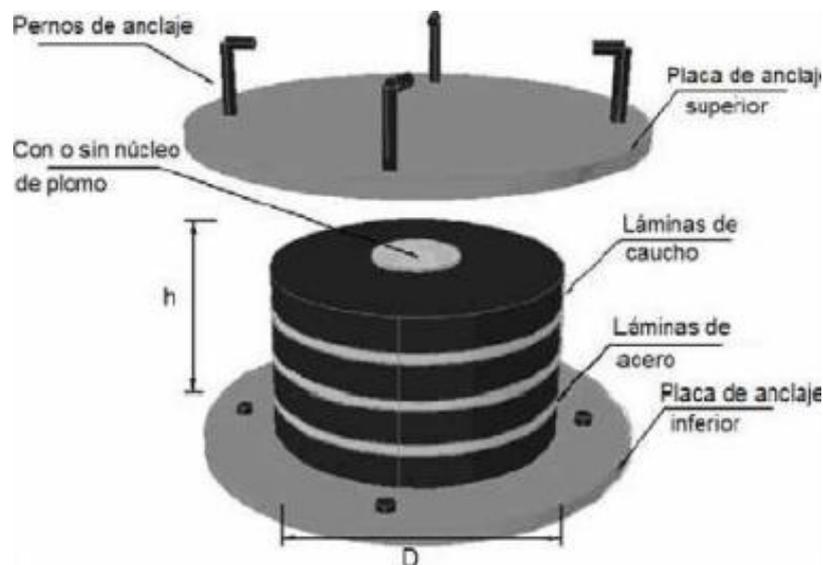


Ilustración 10: Apoyo elastomérico

Fuente: (Cando, Monrroy, Ortega, & Puerres, 2012)

2.2.1. Apoyos de caucho natural

Los apoyos de caucho natural se caracterizan por regirse por parámetros como la capacidad de carga vertical, la rigidez tanto vertical como horizontal, el período lateral del apoyo, el amortiguamiento proporcionado, y el desplazamiento lateral permisible. Los apoyos elastómeros de bajo amortiguamiento tienen un amortiguamiento que se aproxima a 5%, su comportamiento es muy parecido al de un elemento lineal elástico.

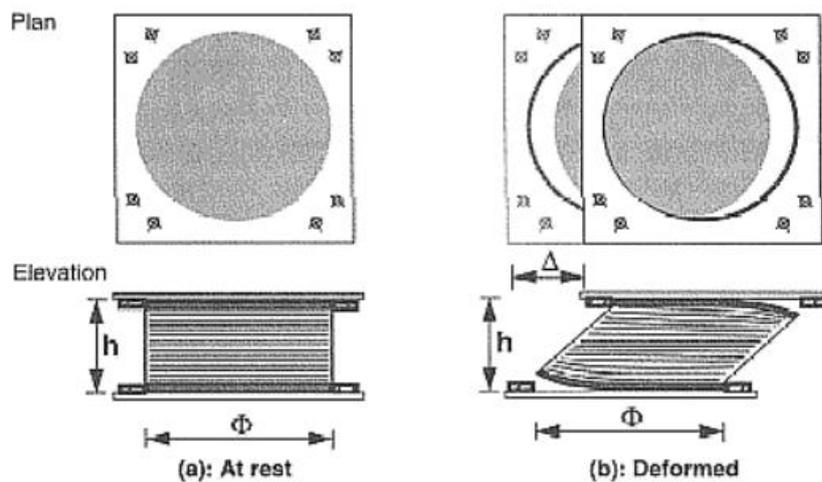


Ilustración 11: Apoyo de caucho con placa de conexión forma no deformada y deformada

Fuente: (Calvi, y otros, 2007)

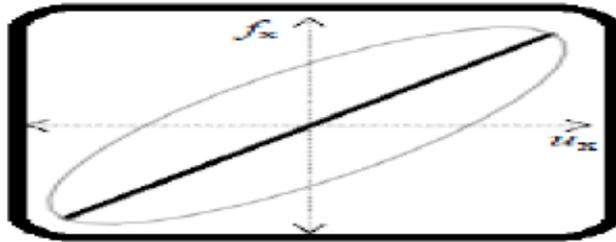


Ilustración 12: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores de bajo amortiguamiento

Fuente: (Guerrero, 2011)

2.2.2. Apoyos de caucho de gran amortiguamiento

Los apoyos de caucho de gran amortiguamiento (HDRB) están compuestos por capas alternadas de caucho y placas de acero de un grosor limitado conectadas por vulcanización. Estos apoyos pueden soportar cargas verticales con deflexiones limitadas, debido a su gran rigidez vertical, y pueden también soportar cargas horizontales operacionales, con desplazamientos muy pequeños. Su vida útil puede llegar a ser más de 60 años.



Ilustración 13: Aislador de gran amortiguamiento

Fuente: (Guerrero, 2011)

Dichos apoyos pueden, cambiar el periodo de una estructura, como su capacidad de disipar energía. El componente de caucho tiene capacidad amortiguadora y está diseñado para resistir deformaciones al corte muy grandes, mucho más grandes que las que resisten los apoyos elastómeros estándar ya que su rigidez es mucho más grande (hasta cuatro veces para deformaciones pequeñas) y va disminuyendo conforme las deformaciones crecen. Sus valores de amortiguamiento están alrededor del 10% al 20%.

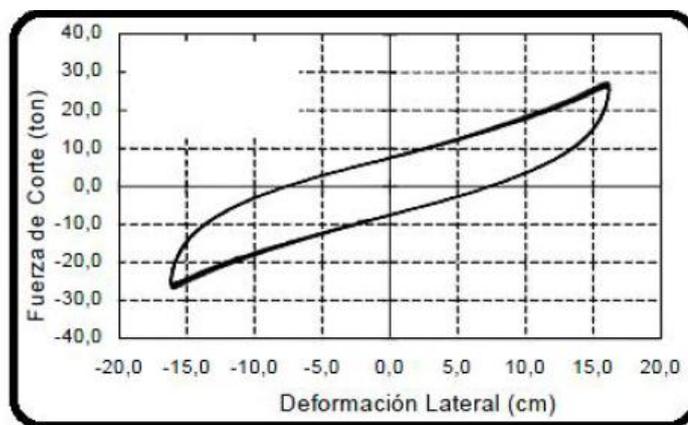


Ilustración 14: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores de alto amortiguamiento

Fuente: (Guerrero, 2011)

2.2.3. Apoyos de caucho con núcleo de plomo

Los apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB), al igual que los apoyos HDRB, están compuestos por capas de caucho alternadas con placas de acero, pero se diferencian en que se les introduce un núcleo de plomo, el cual provee disipación de energía para la respuesta sísmica y rigidez para las cargas estáticas. Sus valores de amortiguamiento están alrededor del 15% al 35%.



Ilustración 15: Aisladores de caucho con núcleo de plomo

Fuente: (Arriagada, 2005)

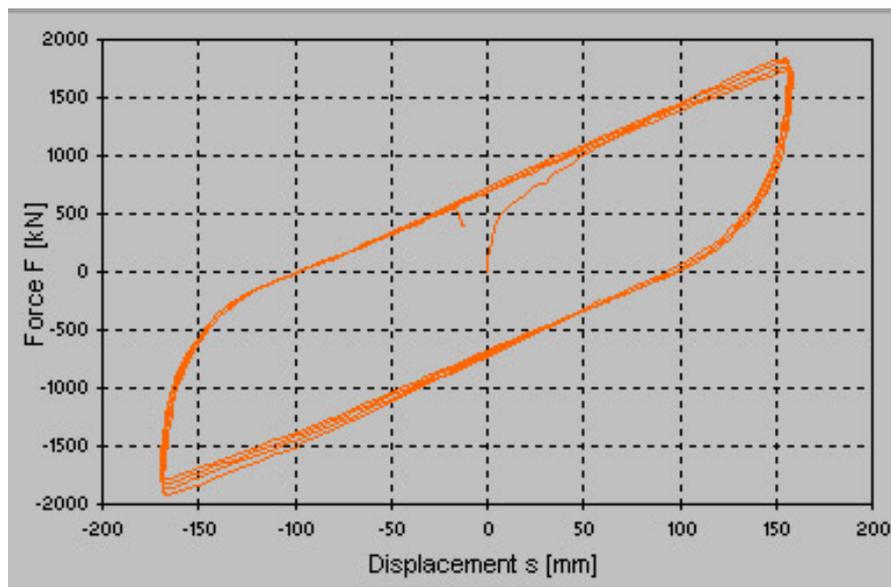


Ilustración 16: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB)

Fuente: (Guerrero, 2011)

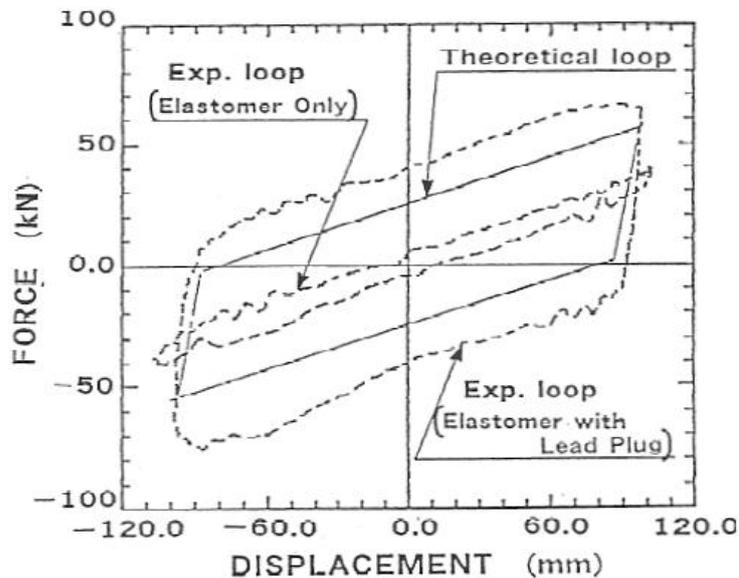


Ilustración 17: Comparación del ciclo de desplazamiento por fuerza de corte para apoyos elastómeros con y sin núcleo de plomo

Fuente: (Calvi, y otros, 2007)

2.2.4.Limitaciones de los apoyos de aislamiento elastómero

En general la reducción de las fuerzas sísmicas que actúan sobre una superestructura causada por un cambio en la longitud del periodo fundamental puede verse acompañada por grandes desplazamientos horizontales a nivel de los aisladores, los cuales con su flexibilidad lateral, pueden llevar a una reducción significativa en la carga axial crítica que actúa sobre los mismos. Esto lleva a que la estabilidad de los apoyos elastómeros pueda verse afectada debido a los grandes desplazamientos laterales y cargas axiales, los cuales son responsables por la reducción en la carga crítica del apoyo, su rigidez al corte y a la rotación. Esto debe ser tomado en cuenta cuando se va a seleccionar el aislador, ya que el aislador

seleccionado debe poseer la rigidez necesaria para permanecer estable bajo cualquier desplazamiento que lo pueda afectar.

2.3. Apoyos de deslizamiento

Este tipo de apoyo consiste en apoyos deslizantes que proveen fuerzas amortiguadoras por acción de fricción sobre una superficie. Los apoyos deslizantes están compuestos por una interfaz deslizante y un elemento rotatorio el cual es necesario para mantener contacto con la interfaz deslizante.

El elemento rotacional puede tomar muchas formas como:

- El apoyo esférico.
- El apoyo de disco.
- El deslizante articulado utilizado en el péndulo de fricción.
- El apoyo elastómero.

El tipo de material utilizado para la interfaz deslizante puede variar entre:

- PTFE (teflón) no lubricado.
- PTFE (teflón) lubricado.
- Interfaces Bimetálicas.

En un sistema aislado por apoyos PTFE, el primer periodo de aislamiento surge de la subestructura y usualmente es muy corto, mientras que el segundo periodo del aislador tiende al infinito y no provee ninguna fuerza restauradora para resistir los desplazamientos. Su ciclo de relación fuerza-desplazamiento casi rectangular provee un amortiguamiento histerético muy grande. A este tipo de apoyo generalmente se lo encuentra trabajando en conjunto con otros dispositivos que provean al sistema aislante de una fuerza restauradora.

2.3.1. Apoyos de Aislamiento tipo Fricción de Superficie Plana

Los apoyos de aislamiento tipo fricción de superficie plana están compuestos por interfaces de acero y teflón (PTFE) que proveen disipación de energía por acción de fricción entre ellas. Los factores que influyen en este tipo de apoyo son los coeficientes de fricción de las interfaces deslizantes y el peso de la estructura. A diferencia de los aisladores de base, los apoyos de tipo fricción de superficie plana no incrementan el periodo fundamental de la estructura, únicamente limitan la cantidad de fuerza que es transmitida a la estructura.

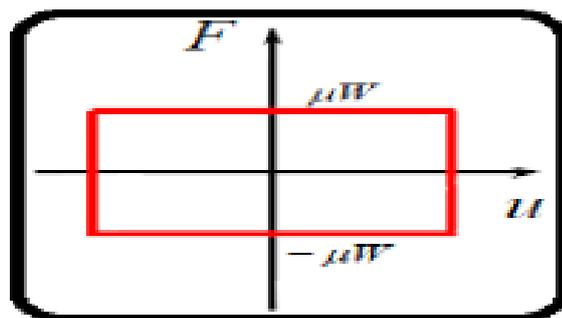


Ilustración 18: Ciclo de fuerza cortante-deformación de los aisladores tipo fricción de superficie plana (sin fuerza restauradora)

Fuente: (Guerrero, 2011)

Una gran desventaja que tienen los apoyos de aislamiento tipo fricción de superficie plana es que no proveen al sistema de una fuerza restauradora, que lleve a la estructura a su posición inicial, por lo que deben ser usados en combinación con sistemas que provean una fuerza restauradora.

2.3.2. Péndulo de Fricción

El péndulo de fricción es un sistema de aislamiento deslizante que regresa a su posición inicial después de terminado el movimiento vibratorio del suelo.

Está compuesto por dos placas deslizantes, de las cuales una es una superficie curva de acero inoxidable, conectada a la otra por medio de un deslizador articulado cubierto por un material de alta capacidad portante como el teflón.



Ilustración 19: Péndulo de fricción simple

Fuente: (Single Pendulum Bearing, 2011)

Una de las características más importantes del péndulo de fricción es que los desplazamientos residuales se reducen debido al efecto $P-\Delta$ de auto-centrado inducida por la superficie curva del dispositivo. El efecto $P-\Delta$ de auto-centrado es la restitución del desplazamiento lateral ocasionado por la curvatura del dispositivo que introduce una componente vertical y las fuerzas de restauración de sentido contrario, y disminuye la componente horizontal del movimiento permitiendo el movimiento de retorno. El péndulo de fricción puede proveer un periodo dinámico equivalente en el orden de dos a cinco segundos y una capacidad de desplazamiento mayor a un metro.

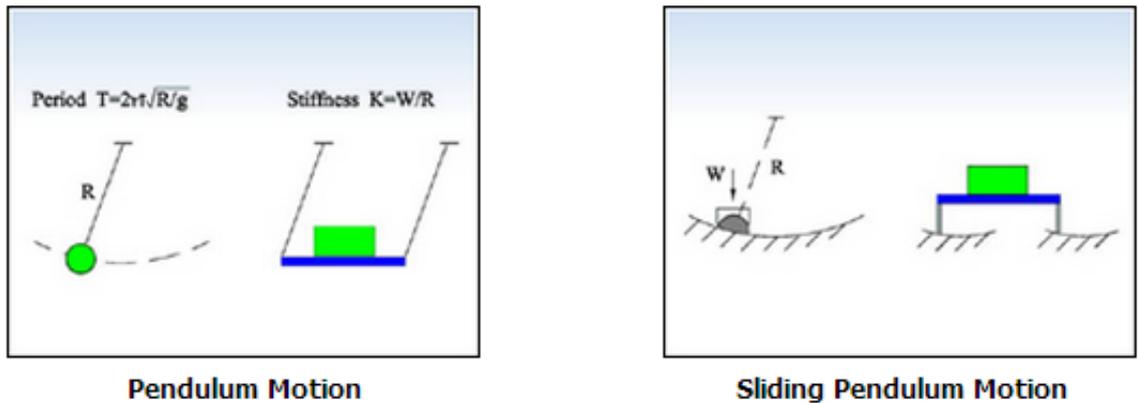


Ilustración 20: Principio de funcionamiento del péndulo de fricción simple

Fuente: (Friction Pendulum Bearings, 2011)

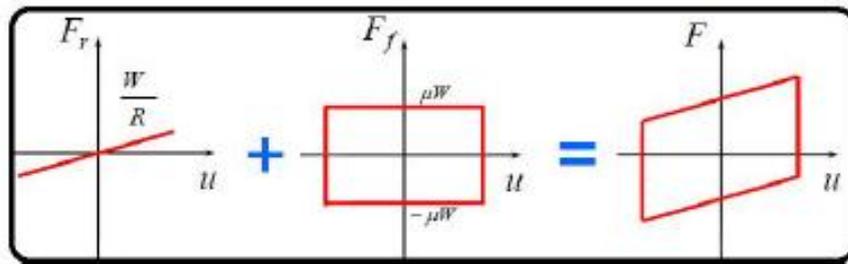


Ilustración 21: Combinación de fuerza restauradora y fricción

Fuente: (Friction Pendulum Bearings, 2011)

Durante el movimiento vibratorio del suelo, el deslizador se mueve sobre la superficie curva levantando a la superestructura y disipando energía por fricción entre la superficie curva y el deslizador. Actualmente existen péndulos de fricción de hasta tres superficies curvas, lo que permite disminuir el tamaño del aislador e igual lograr un mismo desplazamiento horizontal. Los valores de amortiguamiento del péndulo de fricción están alrededor del 10% al 40%, con coeficientes de fricción de 0.03 a 0.20.

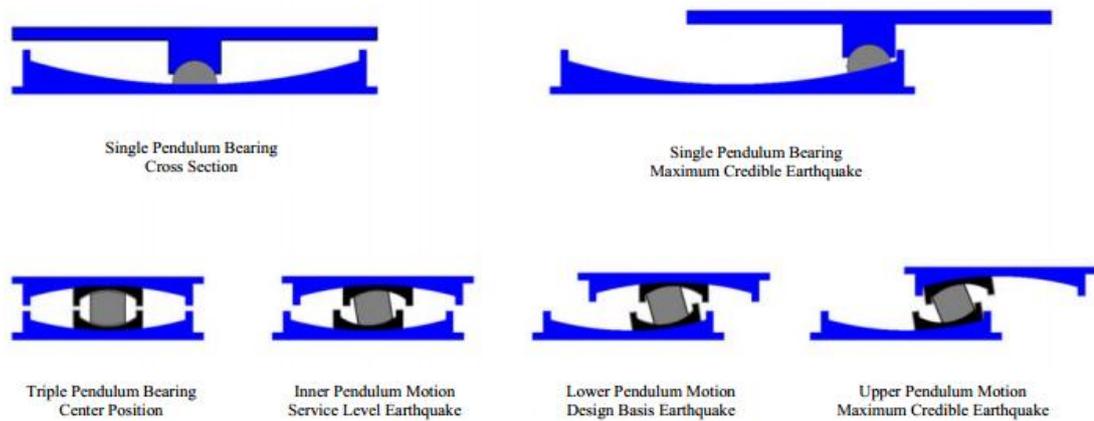
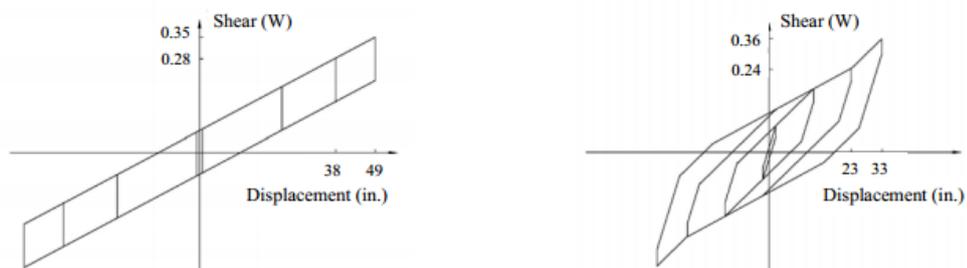


Ilustración 22: Péndulo de fricción simple y péndulo de fricción en operación

Fuente: (Friction Pendulum Bearings, 2011)



Single Pendulum Force-Displacement Hysteretic Loop

Triple Pendulum Force-Displacement Hysteretic Loop

Ilustración 23: Ciclo de fuerza cortante-desplazamiento del péndulo de fricción simple (izquierda) y péndulo de fricción triple (derecha)

Fuente: (Earthquake Protection Systems, 2011)

El péndulo de fricción puede ser montado de cualquiera de las siguientes configuraciones:

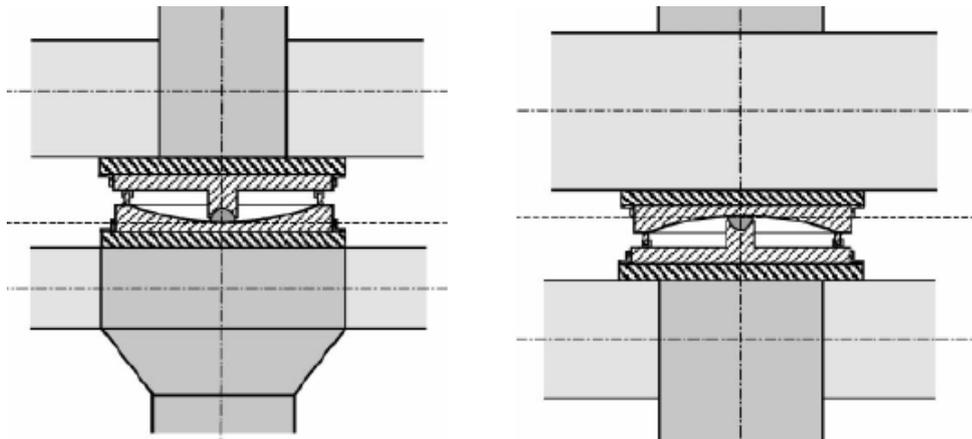


Fig.6-8. FPS bearing in downward (left) and upward (right) position

Ilustración 24: Configuraciones de montaje del péndulo de fricción

Fuente: (Calvi, y otros, 2007)

Conceptualmente las dos configuraciones anteriores son equivalentes en términos de efecto de aislamiento, pero tienen implicaciones diferentes para el diseño de la superestructura y la cimentación. Esto se debe a que en el caso de la Ilustración 24 (izquierda) el efecto $P-\Delta$ de auto-centrado es transmitido a la estructura debajo del sistema de aislamiento (la cimentación) y en el caso de la Ilustración 24 (derecha) el efecto $P-\Delta$ es transmitido a la superestructura.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA GENERAL

Para cumplir con el objetivo y alcance del estudio se analizarán dos estructuras regulares, ambas de siete pisos de altura, pero con diferente número de luces. Dichos edificios se modelarán con y sin aisladores sísmicos. El edificio con más luces se denominará “edificio A”, mientras que el edificio con menos luces se denominará “edificio B”. Se decidió modelar dos edificios, con diferente número de luces, para cubrir un rango amplio de estructuras; y, así poder comparar la efectividad de los aisladores entre dos estructuras de diferente esbeltez (altura/ancho) y redundancia (ejes de columnas).

El diseño de la superestructura para todas las edificaciones es el mismo por simplicidad, y porque se busca evaluar la reducción de la demanda sísmica propiciada por el uso de aisladores para un mismo diseño. Así, el análisis de costos se basará en el cambio del nivel de desempeño sísmico entre la estructura con aisladores y la estructura sin aisladores. El nivel de desempeño se determinará encontrando el grado de elasticidad/plasticidad asociado al valor del coeficiente de reducción de respuesta R demandado en cada estructura como resultado de la fuerza de diseño sobre cada estructura. Por ejemplo, para la estructura sin aisladores se usará un coeficiente de reducción de respuesta estructural $R = 6$, mientras que para la estructura con aisladores se usará un coeficiente de reducción de respuesta estructural R equivalente a la fuerza sísmica reducida, valor que se anticipa cercano a la condición elástica con $1 \leq R \leq 2$.

Las estructuras son simétricas, sin irregularidades en planta y elevación; y con diafragma rígido de losa en cada piso.

3.1. Metodología de análisis y diseño de las estructuras sin aislamiento sísmico

3.1.1. Caracterización estructural del edificio “A”

La edificación a modelar, con y sin aislamiento sísmico, consiste de siete pisos, una altura de entrepiso de 3.24 metros, con un total de 22.68 metros de altura a nivel de cubierta. Tiene cinco luces de cinco metros de longitud en ambos sentidos (X & Y).

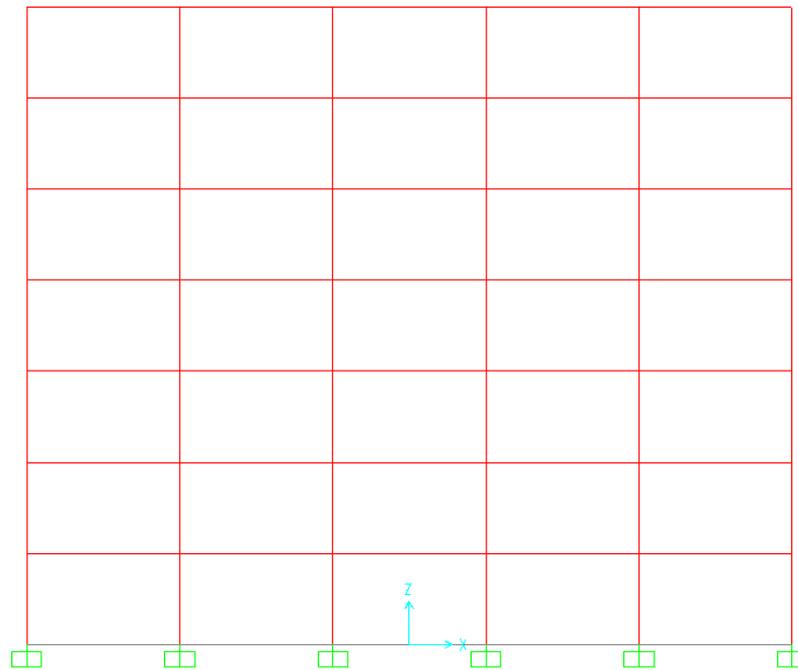


Ilustración 25: Configuración de la estructura a modelar

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

3.1.1.1. Definición de la geometría

El dimensionamiento que se le dio a las columnas es el siguiente:

COLUMNAS								
SECCION (cm x cm)	PLANTA							CUBIERTA
	PB	1	2	3	4	5	6	
40X40							X	-
45X45						X		-
50X50					X			-
55X55			X	X				-
60X60	X	X						-

Tabla 1: Dimensiones de las columnas del edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

El dimensionamiento que se le dio a las vigas es el siguiente:

VIGAS PRINCIPALES								
SECCION (cm x cm)	PLANTA							CUBIERTA
	PB	1	2	3	4	5	6	
25X50	-							X
30X60	-	X	X	X	X	X	X	

Tabla 2: Dimensiones de las vigas del edificio A sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

El dimensionamiento que se le dio a la losa nervada tipo es el siguiente:

Ancho de nervio (b) 10 cm

Altura libre del nervio (h) 20 cm

Espesor de la capa de compresión de la losa (e) 5 cm

Espaciamiento de nervios 50 cm

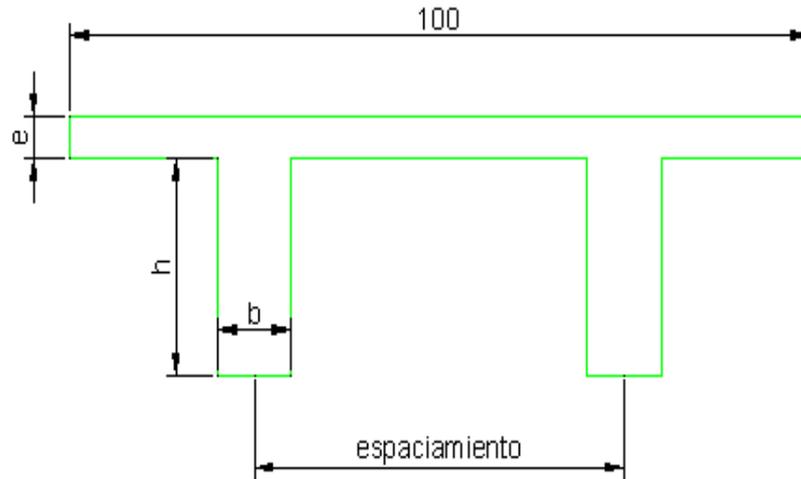


Ilustración 26: Sección de la losa tipo del edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

Finalmente la estructura obtenida para el edificio A es la siguiente:

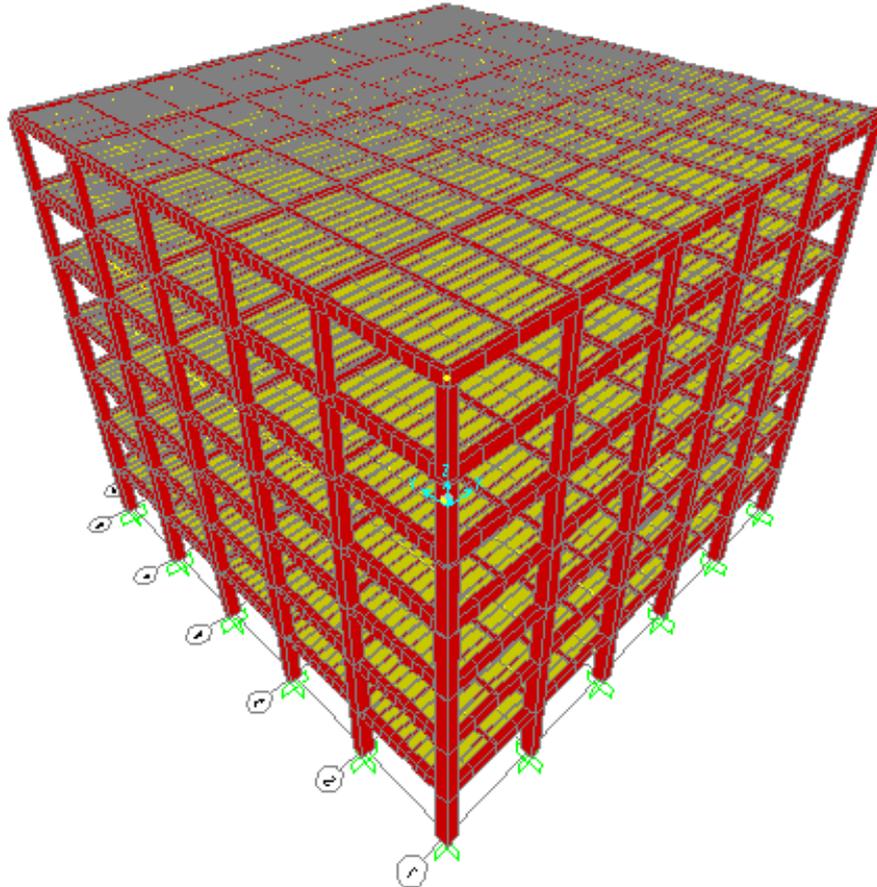


Ilustración 27: Modelo estructura sin aislamiento sísmico en la base

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

3.1.2. Caracterización estructural del edificio “B”

La edificación a modelar, con y sin aislamiento sísmico, consiste de siete pisos, una altura de entrepiso de 3.24 metros, con un total de 22.68 metros de altura a nivel de cubierta. Tiene dos luces de cinco metros de longitud en ambos sentidos (X & Y).

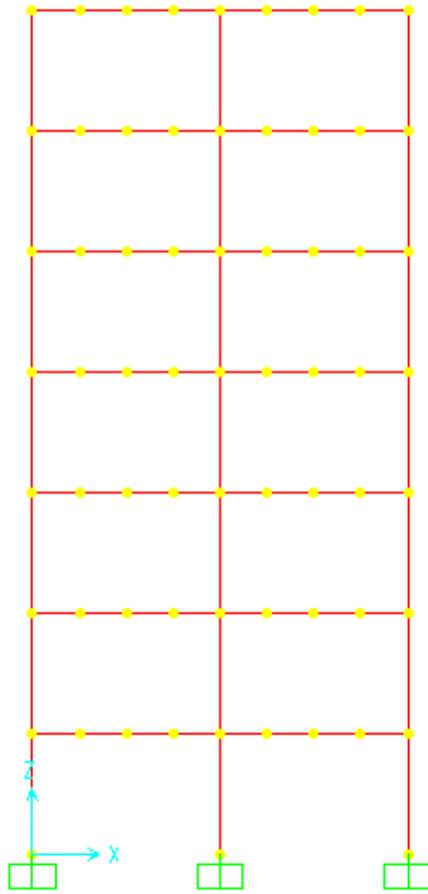


Ilustración 28: Configuración de la estructura a modelar

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

3.1.2.1. Definición de la geometría

El dimensionamiento que se le dio a las columnas es el siguiente:

COLUMNAS								
SECCION (cm x cm)	PLANTA							CUBIERTA
	PB	1	2	3	4	5	6	
40X40							X	-
45X45						X		-
50X50					X			-
55X55			X	X				-
60X60	X	X						-

Tabla 3: Dimensiones de las columnas del edificio B sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

El dimensionamiento que se le dio a las vigas es el siguiente:

VIGAS PRINCIPALES								
SECCION (cm x cm)	PLANTA							CUBIERTA
	PB	1	2	3	4	5	6	
25X50	-							X
30X60	-	X	X	X	X	X	X	

Tabla 4: Dimensiones de las vigas del edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

El dimensionamiento que se le dio a la losa tipo es el siguiente:

Ancho de nervio (b) 10 cm

Altura libre del nervio (h) 20 cm

Espesor de la capa de compresión de la losa (e) 5 cm

Espaciamiento de nervios 50 cm

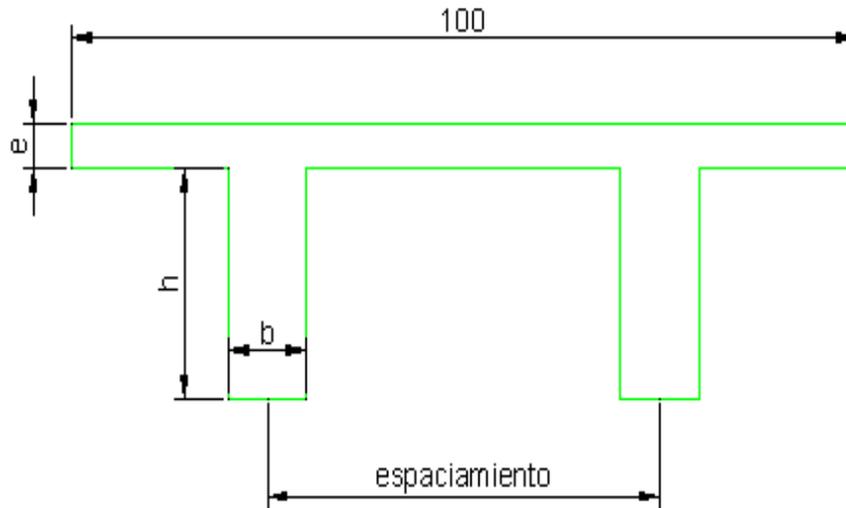


Ilustración 29: Sección de la losa tipo del edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

Finalmente la estructura obtenida para el edificio B es la siguiente:

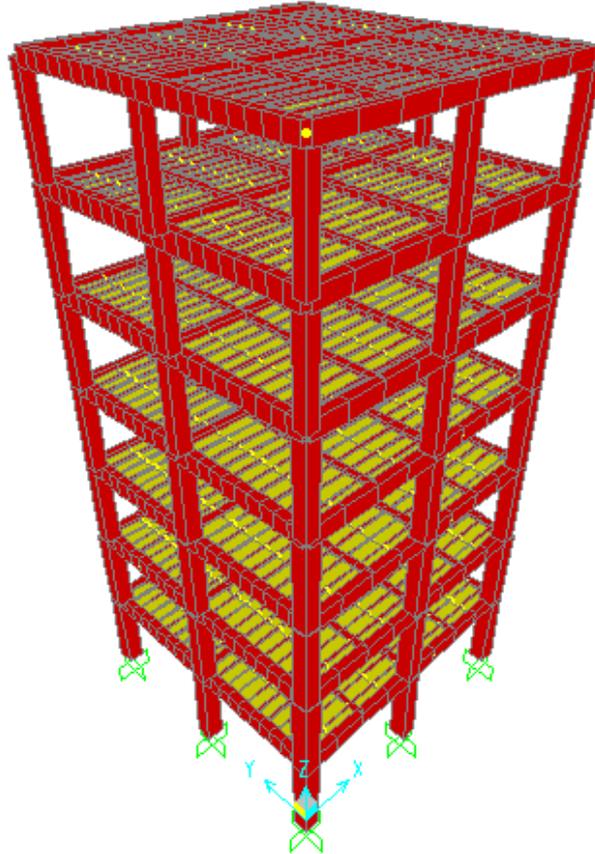


Ilustración 30: Modelo estructura sin aislamiento sísmico en la base.

Fuente: Elaborado por Game, D. (2013)

3.1.3. Tipos de análisis

3.1.3.1. Análisis estático

El análisis estático se utilizará únicamente en lo pertinente al cálculo de los coeficientes sísmicos de diseño de las estructuras, los que se usan para el control de la fuerza de corte mínima aplicable a los análisis dinámicos espectrales e historia-tiempo.

3.1.3.2. Análisis Modal

El análisis modal se utilizará para modelar los análisis dinámicos espectrales e historia-tiempo, y debe ser consistente con los modos de vibración más importantes que gobiernan el comportamiento de la estructura. El análisis estático solo toma en cuenta el primer modo de cualquier coordenada de movimiento, lo que representa la mayor porción de las masas participativas. Los análisis dinámicos toman en cuenta los demás modos de vibración, hasta alcanzar con los modos considerados, más del 90% de las masas participativas dentro de la respuesta dinámica. Al tomar una mayor participación de masas, los resultados de los análisis dinámicos tanto espectrales como historia-tiempo, deben ser cercanos y menos conservadores a los resultados obtenidos del análisis estático. En el caso del cortante basal, el cortante basal resultante de cualquiera de los análisis dinámicos es menor al cortante estático equivalente, pero por norma NEC-11 debe ser mayor al 80% del cortante basal estático, para estructuras regulares. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

3.1.3.3. Análisis dinámico espectral

El análisis dinámico espectral se utilizará para el diseño de la superestructura de los edificios A y B, en la determinación de cuantías de los elementos estructurales críticos y la determinación y control de las derivas de entrepiso. En el análisis espectral se usará el espectro de diseño de NEC-11 para el suelo blando de la ciudad de Guayaquil tipo E.

3.1.3.4. Análisis dinámico lineal historia-tiempo

El análisis dinámico lineal historia-tiempo se utilizará en el análisis de los edificios A y B sin aislamiento sísmico. Mediante este análisis se podrán determinar los parámetros de interés (cortante en la base y desplazamiento en la cubierta), para ambas estructuras en el tiempo. Los registros de sismos

a utilizar en el análisis son en su mayoría sismos sintéticos generados para suelo tipo E, con la finalidad de completar los siete sismos necesarios para el análisis dada la carencia de sismos con movimiento fuerte del terreno registrados por acelerógrafos en la ciudad de Guayaquil. Se usarán también registros de sismos reales, pero solo se tomará en cuenta para el análisis el sismo registrado en el sótano del edificio “Torres de la Merced”, el cual posee características representativas al suelo tipo E.

3.2. Metodología de análisis y diseño de las estructuras con aislamiento sísmico

3.2.1. Análisis estático

El análisis estático se utilizará para calcular el coeficiente sísmico C_s para control del cortante mínimo V_{min} .

3.2.2. Análisis modal

El análisis modal se utilizará para determinar períodos, modos y formas modales de vibración, que sirven tanto para el análisis dinámico espectral como para el análisis dinámico historia-tiempo.

3.2.3. Análisis dinámico espectral

El análisis dinámico espectral se usa para calcular el periodo T que se usará para calcular el coeficiente sísmico C_s , para las estructuras aisladas con nuevo periodo T , con el cual se define el valor del cortante mínimo V_{min} . En el análisis espectral se usará el espectro de diseño del NEC-11 para el suelo blando de la ciudad de Guayaquil tipo E.

3.2.4. Análisis dinámico no lineal historia-tiempo

El análisis dinámico no lineal historia-tiempo se utilizará en el análisis de los edificios A y B con aislamiento sísmico. Mediante este análisis se podrán determinar los parámetros de interés (cortante en la base y desplazamiento en la cubierta), para ambas estructuras con elementos no lineales (aisladores), en el tiempo.

Para efectos de análisis cada uno de los acelerogramas fue normalizado para el espectro de diseño del suelo tipo E de la ciudad de Guayaquil.

Para realizar los análisis Historia-Tiempo se usaron de referencia videos de cursos de SAP2000 del Ing. Genner Villareal Castro, Ph. D., en los cuales se demuestra paso a paso, como realizar los análisis dinámicos historia-tiempo lineal y no lineal. (Villareal, 2012)

CAPÍTULO IV: DISEÑO DE LA SUPERESTRUCTURA

4.1. Documentos de Referencia y Normas

NEC-11 (Norma Ecuatoriana de la Construcción)

ACI 318-08 "Building Code Requirements for Structural Concrete"

4.2. Materiales Utilizados

Hormigón	$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días
Acero de Refuerzo para Hormigón	ASTM A615 - $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

4.3. Cargas de diseño

4.3.1. Cargas gravitacionales

Las siguientes cargas gravitacionales se utilizaron en el diseño y análisis de los edificios A y B. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

4.3.1.1. Carga Muerta (D)

Peso Propio Losa Nervada	216 kg/m ²
Recubrimiento piso	100 kg/m ²
Tumbado	40 kg/m ²
Paredes	100 kg/m ²
Instalaciones	<u>40 kg/m²</u>
Total Carga Muerta de Plantas	496 kg/m²
Total Carga Muerta de Cubierta	296 kg/m²

4.3.1.2.Carga Viva (L)

Oficinas	240 kg/m ² (NEC-11)
Carga Viva de Cubierta	<u>100 kg/m²</u> (NEC-11)
Total Carga Viva de Plantas	240 kg/m²
Total Carga Viva de Cubierta	100 kg/m²

4.3.2.Cargas de Diseño Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11)

La ciudad de Guayaquil corresponde a la zona sísmica V en el mapa para diseño sísmico NEC-11(Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011), la cual tiene un valor de factor $Z=0.4$ y es considerada una zona de alta amenaza sísmica. Se ha considerado un perfil de suelo tipo E, representativo del suelo blando de la ciudad de Guayaquil.

Se consideran valores de F_a , F_d y F_s correspondientes a la zona sísmica V y tipo de perfil de suelo E los cuales son $F_a=1.15$, $F_d=1.6$ y $F_s=1.9$.

Se utilizó el valor $r=1.5$ para tipo de suelo D y E, y el valor de $n=1.8$, el cual corresponde al valor de n para todas las provincias, excepto Esmeraldas.

Para los factores de sitio F_a y F_d , y el factor de comportamiento inelástico del subsuelo F_s , $T_o = 0.26$ y $T_c = 1.45$.

Se consideró a los edificios A y B como pórticos resistentes a momento de hormigón armado con un coeficiente de reducción de respuesta estructural $R=6$. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

4.3.2.1.Método de las Fuerzas Laterales (Análisis Estático)

$$V = \frac{I \times Sa}{R \times \emptyset_p \times \emptyset_E} \times W$$

$z = 0.4 \rightarrow$ Guayaquil ; $n = 1.8 \rightarrow$ Provincias de la costa excepto Esmeraldas

Perfil de Suelo $\rightarrow E$

Factor de Sitio $\rightarrow Fa = 1.15$

Factor de Sitio $\rightarrow Fd = 1.6$

Coefficiente de Reducción de Respuesta $\rightarrow R = 6$

Factor de comportamiento inelástico del subsuelo $\rightarrow Fs = 1.9$

Factor de Importancia $\rightarrow I = 1$

Es una estructura regular tanto en planta como en elevación por lo cual:

Coefficiente de irregularidad en planta $\rightarrow \emptyset_p = 1$

Coefficiente de irregularidad en elevación $\rightarrow \emptyset_E = 1$

$$Sa = n \times z \times Fa = 1.8 \times 0.4 \times 1.15 = 0.828$$

$$V = \frac{1 \times 0.828}{6 \times 1 \times 1} \times W$$

$$V = 0.138W$$

En donde V es el cortante basal de diseño y W el peso sísmico de la estructura según NEC-11 (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011).

4.3.2.2. Espectro de Diseño (Análisis Espectral Dinámico)

El espectro de diseño del NEC-11 se utilizó en el diseño de las superestructuras de los edificios A y B.

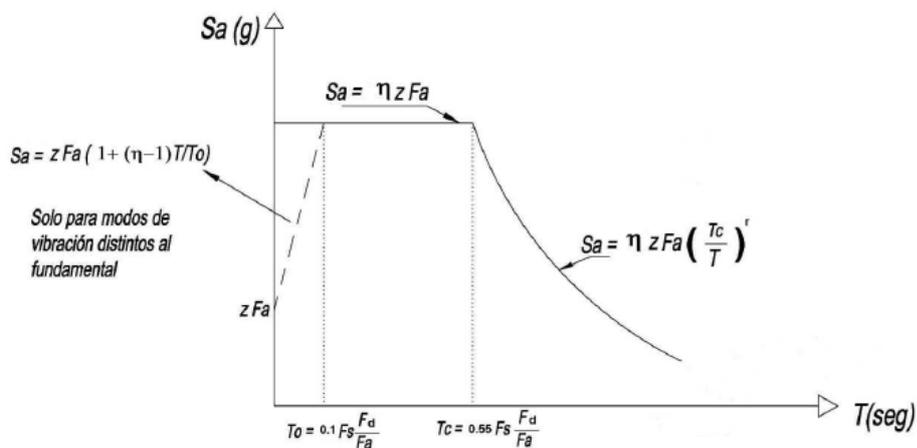


Ilustración 31: Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

En la siguiente ilustración se puede apreciar el espectro sísmico elástico (no reducido, $R=1$) y el espectro reducido por un $R=6$, el cuál se utilizó en el diseño de las superestructuras de los edificios A y B.

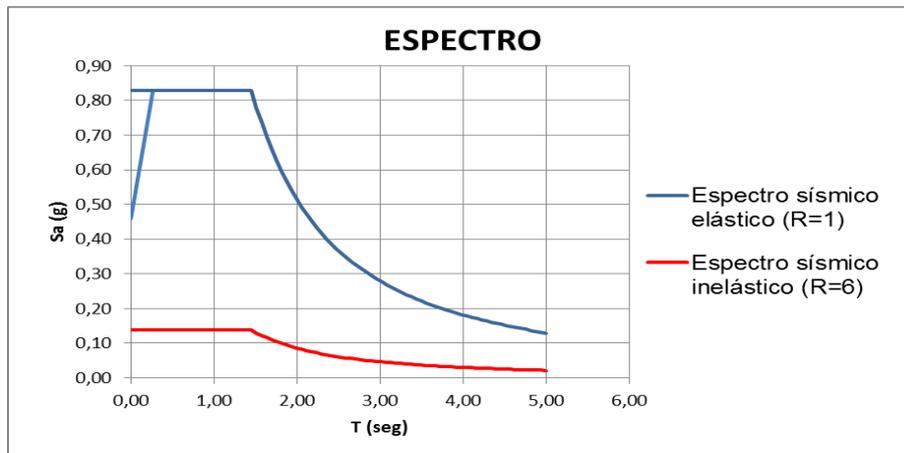


Ilustración 32: Espectro sísmico elástico (R=1) e inelástico (reducido por R=6) de aceleraciones para el suelo tipo E de la ciudad de Guayaquil.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

4.4. Combinaciones de carga

Las siguientes combinaciones de carga del ACI 318-08 se utilizaron en el diseño de los edificios A y B.

4.4.1. Combinaciones de carga de diseño del ACI 318-08

- 1.4D
- 1.2D+1.6L+0.5Lr
- 1.2D+1.6Lr+1L
- 1.2D+1E+1L
- 0.9D+1E

4.4.2. Combinaciones de carga de servicio

- D+L
- E

4.5.Diseño de edificio A

Para efectos de este trabajo se indicarán únicamente las cuantías de acero resultantes en los elementos críticos de los edificios, las cuales junto con la geometría de los elementos, se utilizarán luego para determinar el costo aproximado de las estructuras de los edificios A y B. Adicionalmente, se realizará el chequeo de derivas, para asegurar que las estructuras cumplen con la norma. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

4.5.1.Chequeo de derivas

Se realizó el chequeo de derivas como lo indica la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) para el caso de estructuras de hormigón. Se consideraron los efectos de aplicar fuerzas bidireccionales, 100% en la dirección principal y 30% en la dirección ortogonal, y un 5% de torsión accidental. A continuación se encuentra el resumen de las derivas de entrepiso para las diferentes plantas, tomadas como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivas en las direcciones X y Y.

PISO	Δ_i (%)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (%)	
1	0,91	<2,00	OK
2	1,67	<2,00	OK
3	1,85	<2,00	OK
4	1,66	<2,00	OK
5	1,44	<2,00	OK
6	1,09	<2,00	OK
7	0,68	<2,00	OK

Tabla 5: Resumen de derivas de entrepiso para el edificio A sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

El edificio A cumple con los requisitos de deriva máxima dispuestos por el NEC-11.

4.5.2. Cuantías y cantidades

En las siguientes tablas se muestran las cuantías de los elementos críticos del edificio A, así como el volumen de hormigón y el peso de acero de refuerzo y estribos aproximados, de toda la superestructura.

VIGAS EDIFICIO A							
VIGA	DIMENSIONES (m)		LONG. (m)	CUANTIA	CANT.	VOLUMEN DE HORMIGÓN (m ³)	ACERO DE REFUERZO (kg)
	b	h					
VIGA PRINCIPAL XZ	0,30	0,60	25,00	0,014	36	162,00	17803,80
VIGA PRINCIPAL YZ	0,30	0,60	25,00	0,011	36	162,00	13988,70
VIGA DE CUBIERTA XZ	0,25	0,50	25,00	0,006	6	18,75	883,13
VIGA DE CUBIERTA XY	0,25	0,50	25,00	0,005	6	18,75	735,94
VIGA SECUNDARIA	0,25	0,50	25,00	0,005	35	109,38	4292,97
TOTAL						470,88	37704,53

Tabla 6: Cuantías y cantidades vigas edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

ESTRIBOS VIGAS EDIFICIO A						
VIGA	LADO (m)	REC+0,5ØEST (m)	LONG. EST. (m)	CANT.	LONG. TOTAL / VIGA (m)	PESO (kg)
30X60	0,6	0,05	1,40	29	40,60	9006,74
25X50	0,5	0,05	1,10	29	31,90	1670,89
TOTAL						10677,64

Tabla 7: Cantidades estribos de vigas edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

COLUMNAS EDIFICIO A							
COLUMNA	DIMENSIONES (m)		LONG. (m)	CUANTIA	CANT.	VOLUMEN DE HORMIGÓN (m ³)	ACERO DE REFUERZO (kg)
	a	b					
COLUMNA PB&PISO 1	0,60	0,60	6,48	0,016	36	83,98	10547,99
COLUMNA PISO 2&3	0,55	0,55	6,48	0,012	36	70,57	6647,43
COLUMNA PISO 4	0,50	0,50	3,24	0,010	36	29,16	2289,06
COLUMNA PISO 5	0,45	0,45	3,24	0,012	36	23,62	2224,97
COLUMNA PISO 6	0,40	0,40	3,24	0,016	36	18,66	2344,00
TOTAL						225,99	24053,44

Tabla 8: Cuantías y cantidades columnas edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

ESTRIBOS COLUMNAS EDIFICIO A						
COLUMNA	LADO (m)	REC+0,5ØEST (m)	LONG. EST. (m)	CANT.	LONG. TOTAL / COL (m)	PESO (kg)
60X60	0,6	0,05	4,67	32	149,33	3312,83
55X55	0,55	0,05	4,20	32	134,40	2981,54
50X50	0,5	0,05	4,13	32	132,15	2931,72
45X45	0,45	0,05	3,77	32	120,53	2673,76
40X40	0,4	0,05	3,39	32	108,51	2407,16
TOTAL						14307,01

Tabla 9: Cantidades estribos de columnas edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

LOSA	AREA DE SECCION DE LOSA NERVADA (m ²)	CUANTIA	CANT. (m ²)	VOLUMEN DE HORMIGÓN (m ³)	ACERO DE REFUERZO (kg)
LOSA TIPO	0,09	0,0039	4375	393,75	12054,6563

Tabla 10: Cantidades losa tipo edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En la siguiente tabla se muestra el resumen de cantidades de hormigón y acero de refuerzo del edificio A.

RESUMEN DE MATERIALES EDIFICIO A		
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD
HORMIGÓN DE VIGAS	m3	470,88
HORMIGÓN DE COLUMNAS	m3	225,99
HORMIGÓN DE LOSAS	m3	393,75
ACERO DE REFUERZO	kg	98797,28

Tabla 11: Resumen de materiales edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

4.5.3.Cantidades y costos en estructura edificio A

A continuación se encuentra la tabla de cantidades y costos aproximados de los diferentes elementos que conforman a la superestructura del edificio A. Los precios unitarios fueron tomados de precios unitarios promedio referenciales para edificios, calculados y proporcionados por la empresa “Argudo y Asociados”.

TABLA DE CANTIDADES Y PRECIOS EDIFICIO A					
No	Concepto	Unid.	Precio Unit. USD	Cantidad	Precio Total USD
2,0	<u>ESTRUCTURAS</u>				
2,3	Acero de refuerzo $f_y=4200\text{Kg/cm}^2$	kg	\$ 2,35	98797,28	\$ 232.173,61
2,4	Columnas de Hormigón	m ³	\$ 250,00	225,99	\$ 56.497,50
2,5	Losa nervada	m ³	\$ 255,00	393,75	\$ 100.406,25
2,6	Vigas de Hormigón	m ³	\$ 262,00	470,88	\$ 123.369,25
	TOTAL				\$ 512.446,61

Tabla 12: Tabla de cantidades y precios edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

El indicador de costo por metro cúbico de hormigón es \$469,87/m³ de hormigón y el indicador de costo por metro cuadrado de área construida es \$117,13/m² de área construida.

4.6.Diseño de edificio B

Para efectos de este trabajo se indicarán únicamente las cuantías de acero resultantes en los elementos críticos de los edificios, las cuales junto con la geometría de los elementos, se utilizarán luego para determinar el costo aproximado de las estructuras de los edificios A y B. Adicionalmente se realizará el chequeo de derivas, para asegurarse que las estructuras cumplen con la norma. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

4.6.1.Chequeo de derivas

Se realizó el chequeo de derivas como lo indica la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) para el caso de estructuras de hormigón. Se consideraron los efectos de aplicar fuerzas bidireccionales, 100% en la dirección principal y 30% en la dirección ortogonal, y un 5% de torsión accidental. A continuación se encuentra el resumen de las derivas de entrepiso para las diferentes plantas, tomadas como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivas en las direcciones X y Y.

PISO	Δ_i (%)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (%)	
1	0,69	<2,00	OK
2	1,31	<2,00	OK
3	1,48	<2,00	OK
4	1,35	<2,00	OK
5	1,17	<2,00	OK
6	0,88	<2,00	OK
7	0,56	<2,00	OK

Tabla 13: Resumen de derivas de entrepiso para el edificio B sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

El edificio B cumple con los requisitos de deriva máxima dispuestos por el NEC-11.

4.6.2. Cuantías y cantidades

En las siguientes tablas se muestran las cuantías de los elementos críticos del edificio B, así como el volumen de hormigón y el peso de acero de refuerzo y estribos aproximados, de toda la superestructura.

VIGAS EDIFICIO B							
VIGA	DIMENSIONES (m)		LONG. (m)	CUANTIA	CANT.	VOLUMEN DE HORMIGÓN (m3)	ACERO DE REFUERZO (kg)
	b	h					
VIGA PRINCIPAL XZ	0,30	0,60	10,00	0,014	18	32,40	3560,76
VIGA PRINCIPAL YZ	0,30	0,60	10,00	0,009	18	32,40	2289,06
VIGA DE CUBIERTA XZ	0,25	0,50	10,00	0,005	3	3,75	147,19
VIGA DE CUBIERTA XY	0,25	0,50	10,00	0,005	3	3,75	147,19
VIGA SECUNDARIA	0,25	0,50	10,00	0,006	14	17,50	824,25
TOTAL						89,80	6968,45

Tabla 14: Cuantías y cantidades vigas edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

ESTRIBOS VIGAS EDIFICIO B						
VIGA	LADO (m)	REC+0,5ØEST (m)	LONG. EST. (m)	CANT.	LONG. TOTAL / VIGA (m)	PESO (kg)
30X60	0,6	0,05	1,40	29	40,60	1801,35
25X50	0,5	0,05	1,10	29	31,90	314,52
TOTAL						2115,87

Tabla 15: Cantidades estribos de vigas edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

COLUMNAS EDIFICIO B							
COLUMNA	DIMENSIONES (m)		LONG. (m)	CUANTIA	CANT.	VOLUMEN DE HORMIGÓN (m3)	ACERO DE REFUERZO (kg)
	a	b					
COLUMNA PB&PISO 1	0,60	0,60	6,48	0,013	9	21,00	2142,56
COLUMNA PISO 2&3	0,55	0,55	6,48	0,012	9	17,64	1661,86
COLUMNA PISO 4	0,50	0,50	3,24	0,010	9	7,29	572,27
COLUMNA PISO 5	0,45	0,45	3,24	0,012	9	5,90	556,24
COLUMNA PISO 6	0,40	0,40	3,24	0,016	9	4,67	586,00
TOTAL						56,50	5518,92

Tabla 16: Cuantías y cantidades columnas edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

ESTRIBOS COLUMNAS EDIFICIO B						
COLUMNA	LADO (m)	REC+0,5ØEST (m)	LONG. EST. (m)	CANT.	LONG. TOTAL / COL (m)	PESO (kg)
60X60	0,6	0,05	4,67	32	149,33	828,21
55X55	0,55	0,05	4,20	32	134,40	745,39
50X50	0,5	0,05	4,13	32	132,15	732,93
45X45	0,45	0,05	3,77	32	120,53	668,44
40X40	0,4	0,05	3,39	32	108,51	601,79
TOTAL						3576,75

Tabla 17: Cantidades estribos de columnas edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

LOSA	AREA DE SECCION DE LOSA NERVADA (m2)	CUANTIA	CANT. (m2)	VOLUMEN DE HORMIGÓN (m3)	ACERO DE REFUERZO (kg)
LOSA TIPO	0,09	0,0039	700	63	1928,745

Tabla 18: Cantidades losa tipo edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En la siguiente tabla se muestra el resumen de cantidades de hormigón y acero de refuerzo del edificio B.

RESUMEN DE MATERIALES EDIFICIO B		
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD
HORMIGÓN DE VIGAS	m3	89,80
HORMIGÓN DE COLUMNAS	m3	56,50
HORMIGÓN DE LOSAS	m3	63,00
ACERO DE REFUERZO	kg	20108,74

Tabla 19: Resumen de materiales edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

4.6.3.Cantidades y costos en estructura edificio B

A continuación se encuentra la tabla de cantidades y costos aproximados de los diferentes elementos que conforman a la superestructura del edificio B. Los precios unitarios fueron tomados de precios unitarios promedio referenciales para edificios, calculados y proporcionados por la empresa “Argudo y Asociados”.

TABLA DE CANTIDADES Y PRECIOS EDIFICIO B					
No	Concepto	Unid.	Precio Unit. USD	Cantidad	Precio Total USD
2,0	<u>ESTRUCTURAS</u>				
2,3	Acero de refuerzo fy=4200Kg/cm ²	kg	\$ 2,35	20108,74	\$ 47.255,53
2,4	Columnas de Hormigón	m ³	\$ 250,00	56,50	\$ 14.124,38
2,5	Losa nervada	m ³	\$ 255,00	63,00	\$ 16.065,00
2,6	Vigas de Hormigón	m ³	\$ 260,00	89,80	\$ 23.348,00
			TOTAL		\$ 100.792,91

Tabla 20: Tabla de cantidades y precios edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

El indicador de costo por metro cúbico de hormigón es \$481,58/m³ de hormigón y el indicador de costo por metro cuadrado de área construida es \$143,99/m² de área construida.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO

5.1. Características del aislador sísmico

Se modelaron tres aisladores sísmicos de base de tipo aislador elastómero con núcleo de plomo, con desplazamientos de diseño diferentes (rigideces diferentes). Dichos aisladores tienen un comportamiento muy rígido en el sentido vertical y un comportamiento flexible en el sentido horizontal (comportamiento no lineal). Se seleccionó al aislador elastómero con núcleo de plomo debido a que provee una disipación de energía mayor que otros tipos de aisladores elastómeros, ya que sus valores de amortiguamiento son elevados.

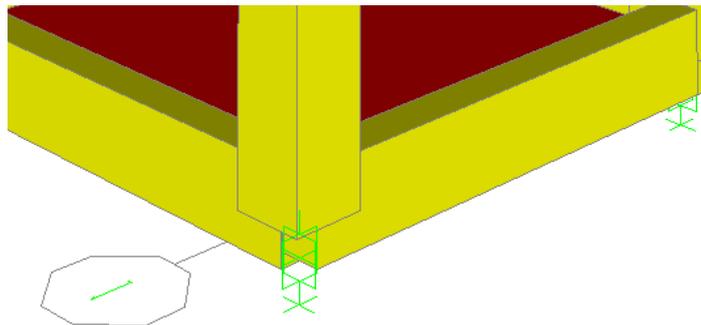


Ilustración 33: Aislamiento sísmico en la base de la estructura.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

5.1.1. Parámetros del aislador sísmico

Entre los parámetros que caracterizan a este aislador están:

1. Las propiedades utilizadas para los casos de análisis lineal:
 - La rigidez efectiva vertical (dirección U1).
 - El amortiguamiento efectivo vertical (dirección U1).
 - La rigidez efectiva horizontal (dirección U2 y U3).
 - El amortiguamiento efectivo horizontal (dirección U2 y U3).

2. Las propiedades utilizadas para los casos de análisis no lineal:

- Rigidez.
- Esfuerzo de Fluencia.
- Relación entre la rigidez elástica y la rigidez inelástica.

Para entender de mejor manera los parámetros del aislador, nombrados anteriormente, se ilustra a continuación la siguiente figura con una breve explicación:

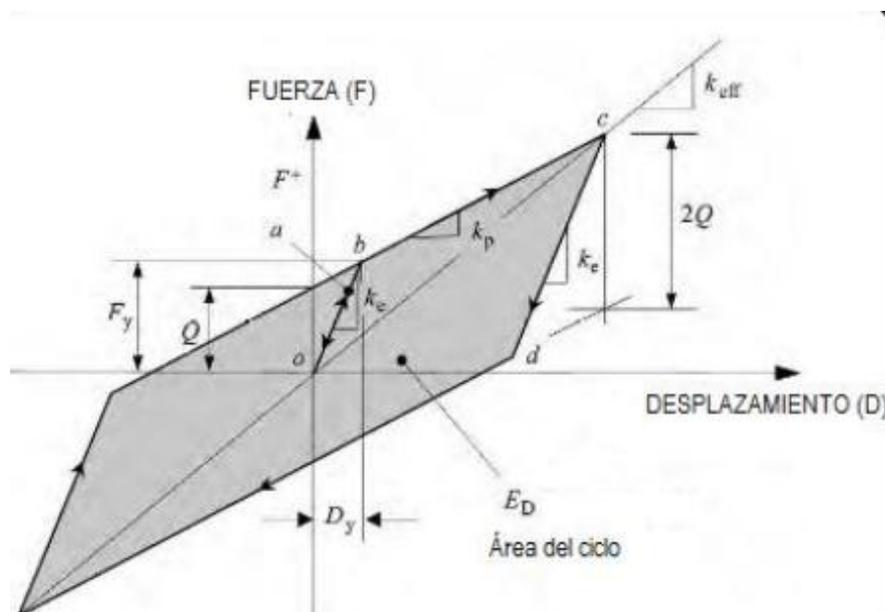


Ilustración 34: Parámetros del aislador.

Fuente: (Guerrero, 2011)

En donde:

K_e : Rigidez horizontal elástica del aislador.

K_p : Rigidez horizontal plástica del aislador.

K_{eff} : Rigidez horizontal efectiva del aislador.

F_y : Esfuerzo de Fluencia

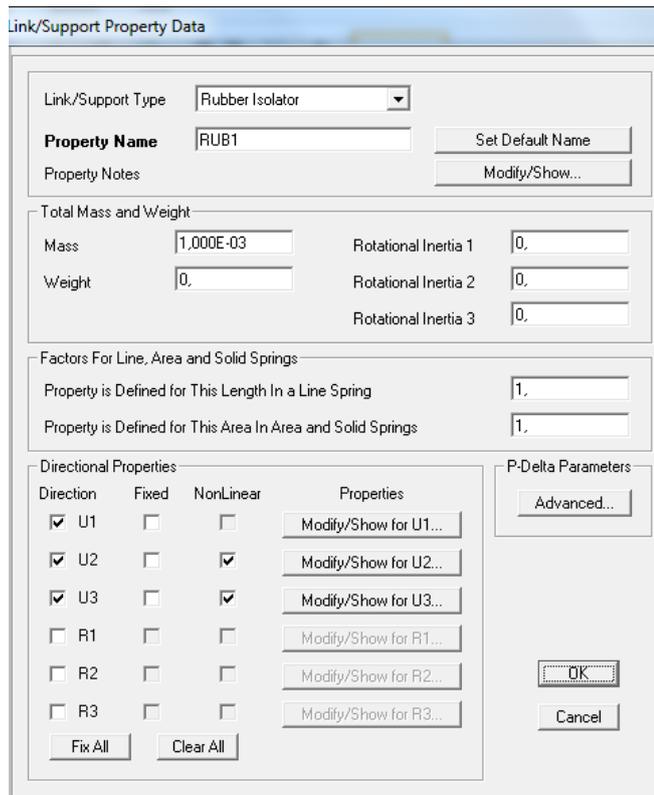


Ilustración 35: Propiedades del apoyo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

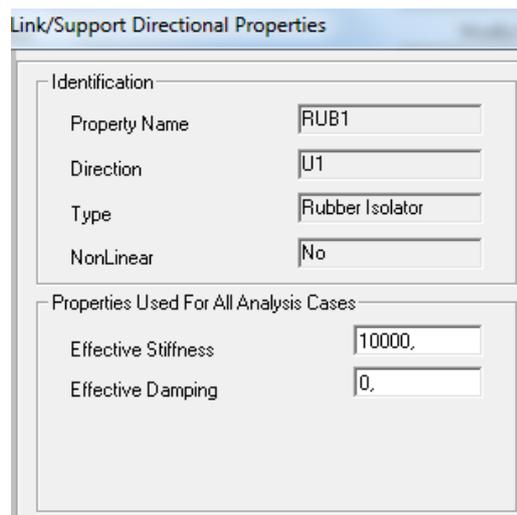


Ilustración 36: Propiedades mecánicas verticales (lineales) del apoyo, utilizadas para todo tipo de caso.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: RUB1

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 1,5

Effective Damping: 0,

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0,

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 10,

Yield Strength: 5,

Post Yield Stiffness Ratio: 0.2

Ilustración 37: Propiedades mecánicas horizontales (lineales y no lineales) del apoyo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

5.2.Características mecánicas de los aisladores empleados

Las siguientes propiedades corresponden al análisis lineal de los aisladores con núcleo de plomo empleados (LRB).

TIPO DE AISLADOR (Δ diseño)	ANÁLISIS LINEAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO		
	RIGIDEZ EFECTIVA HORIZONTAL (KN/mm)	RIGIDEZ EFECTIVA VERTICAL (KN/mm)	AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO
LRB-500mm(300mm)	0,90	776	0,27
LRB-500mm(350mm)	0,77	665	0,27
LRB-500mm(400m)	0,67	582	0,27

Tabla 21: Propiedades para el análisis lineal de los aisladores empleados en el edificio A

Fuente: (FIP-Group)

Las siguientes propiedades corresponden al análisis no lineal de los aisladores con núcleo de plomo empleados (LRB).

TIPO DE AISLADOR-DIÁMETRO (mm)	ANÁLISIS NO LINEAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO				
	RIGIDEZ EN RANGO ELÁSTICO (KN/mm)	DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA (mm)	FUERZA DE FLUENCIA (KN)	RELACION Kp/Ke	DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO (mm)
LRB-500mm	8,83	12	106	0,1	300
LRB-500mm	7,57	14	106	0,1	350
LRB-500mm	6,625	16	106	0,1	400

Tabla 22: Propiedades para el análisis no lineal de los aisladores empleados en el edificio A

Fuente: (FIP-Group)

5.3. Análisis Historia-Tiempo

El análisis Historia-Tiempo se lo utilizó para calcular el cortante a la base en el tiempo y el desplazamiento de un nodo de control en la cubierta en el tiempo, de los edificios A y B, durante los sismos que se encuentran a continuación.

Los análisis paso a paso en el tiempo deben realizarse utilizando las dos componentes horizontales de registros de acelerogramas apropiadamente seleccionados y escalados a partir de los registros de no menos de 3 eventos sísmicos. Estos acelerogramas deben poseer las características de magnitud, distancia a la falla, mecanismo de falla y efectos del suelo consistentes con aquellos parámetros que controlen el sismo de diseño, (...) Cuando no se disponga de al menos 3 eventos sísmicos, pueden utilizarse acelerogramas apropiadamente simulados para generar el número de registros y de componentes requeridos. (NEC-11 2.7.7.7.1.Registros de aceleración, cap.2, pág.63)

Los sismos sintéticos para suelos tipo E utilizados en este estudio fueron generados a partir de sismos sintéticos generados para suelos tipo D. (Argudo, 2011)

5.3.1.Sismo Sintético 1

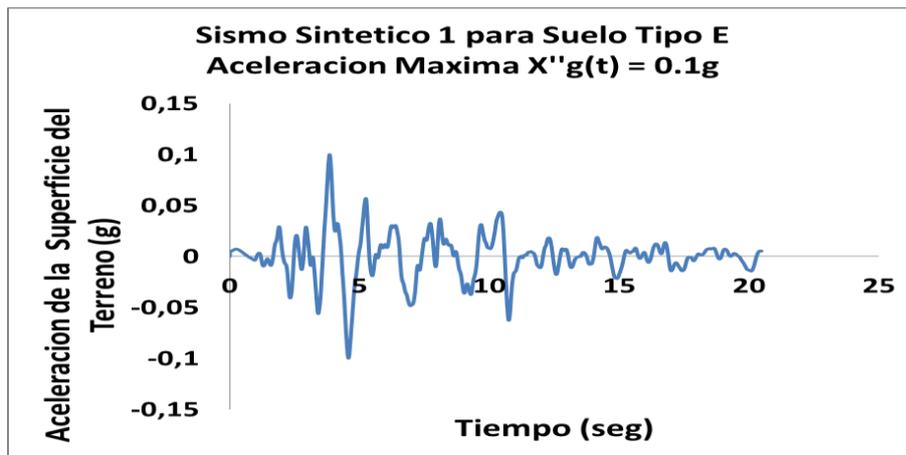


Ilustración 38: Acelerograma sismo sintético 1

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.2.Sismo Sintético 2

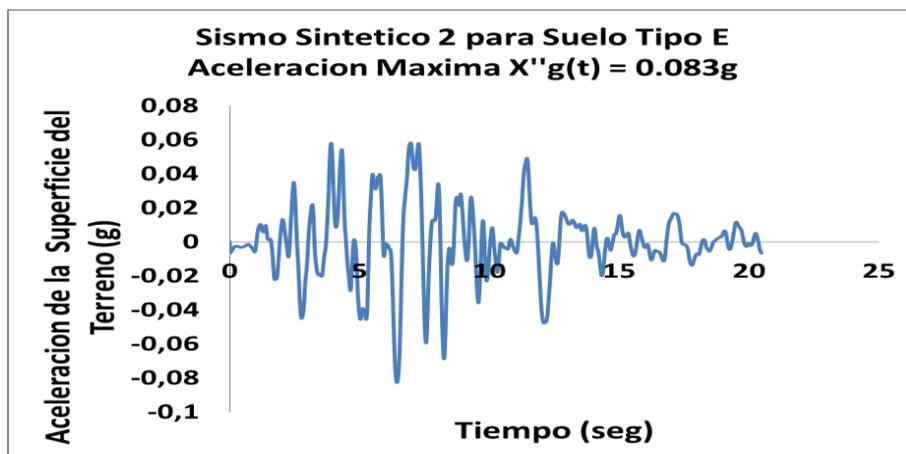


Ilustración 39: Acelerograma sismo sintético 2

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.3.Sismo Sintético 3

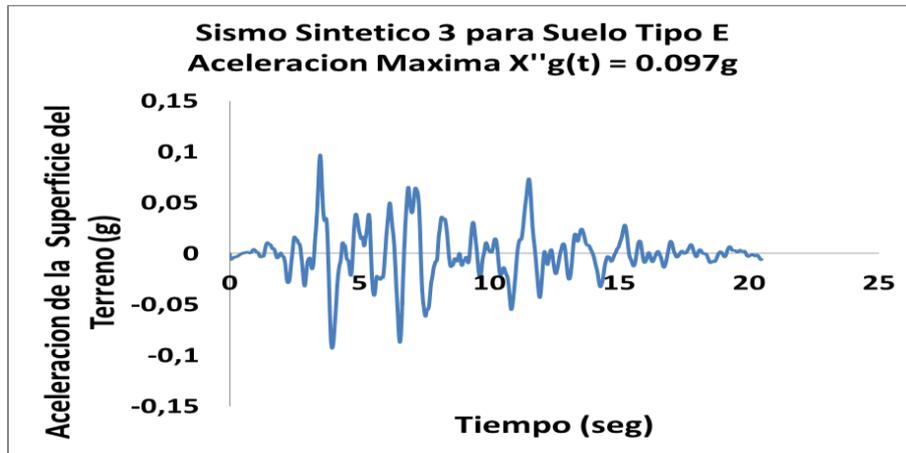


Ilustración 40: Acelerograma sismo sintético 3

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.4.Sismo Sintético 4

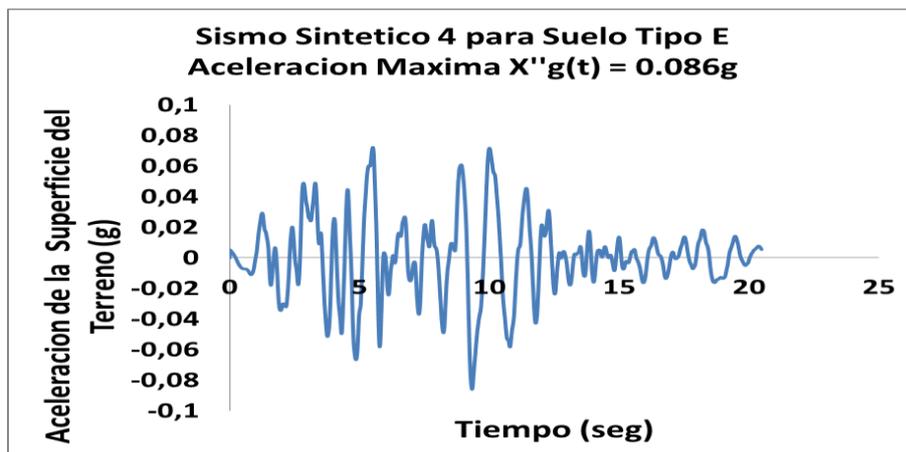


Ilustración 41: Acelerograma sismo sintético 4

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.5.Sismo Sintético 5

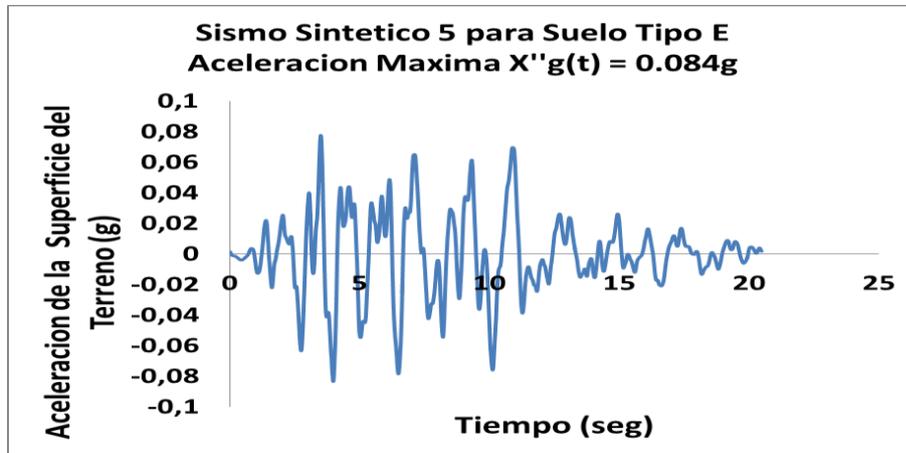


Ilustración 42: Acelerograma sismo sintético 5

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.6.Sismo Sintético 6

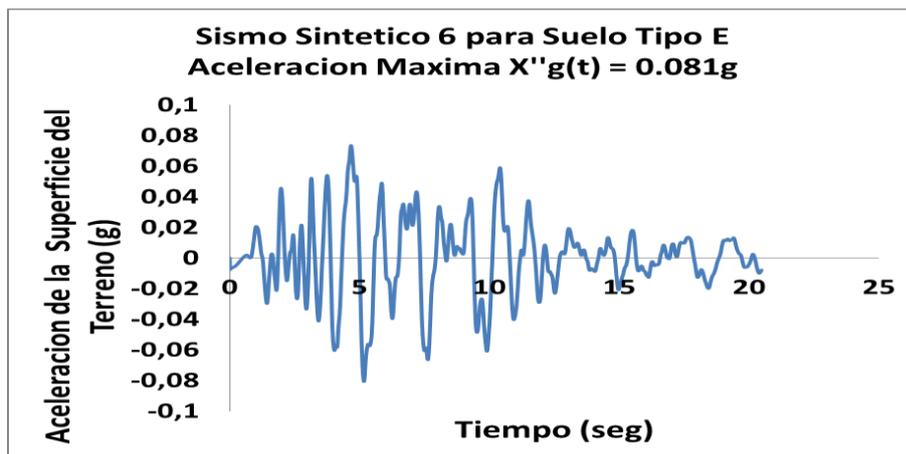


Ilustración 43: Acelerograma sismo sintético 6

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.7.Sismo “El Centro 1940”

El sismo “El centro 1940” es un sismo que ocurrió en el sur de California, Estados Unidos, tuvo una magnitud de 6.9 y una intensidad de X en la escala de Mercalli.

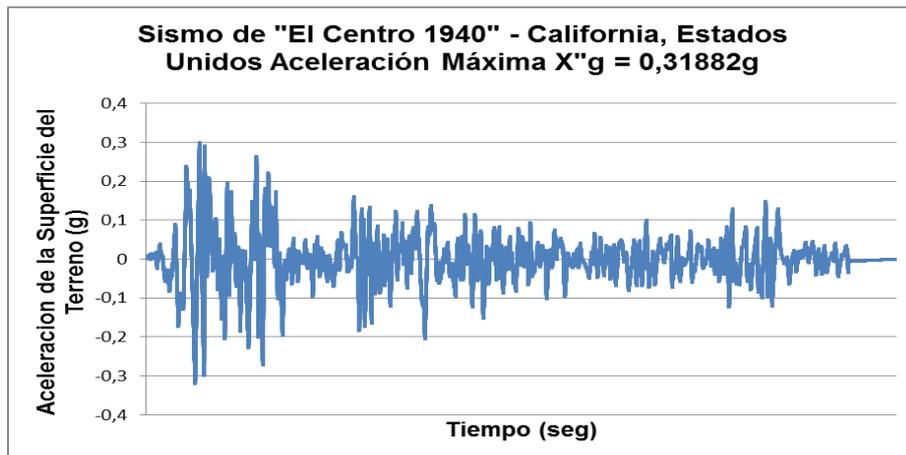


Ilustración 44: Acelerograma "Sismo del centro de 1940" en California

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.8.Sismo de México 1986

El sismo de México 1986 ocurrió en la Costa de Michoacán, Ciudad de México, tuvo una magnitud de 7.0.

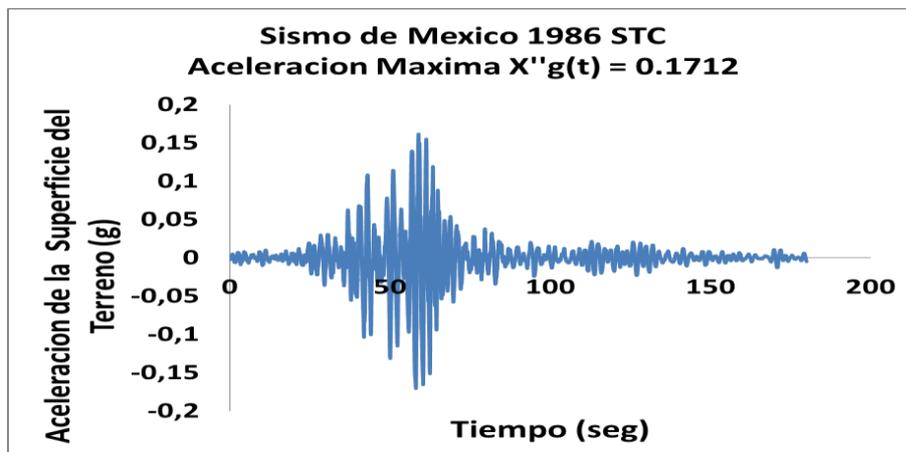


Ilustración 45: Acelerograma sismo de México 1986

Fuente: (Argudo, 2011)

5.3.9.Sismo de Guayaquil

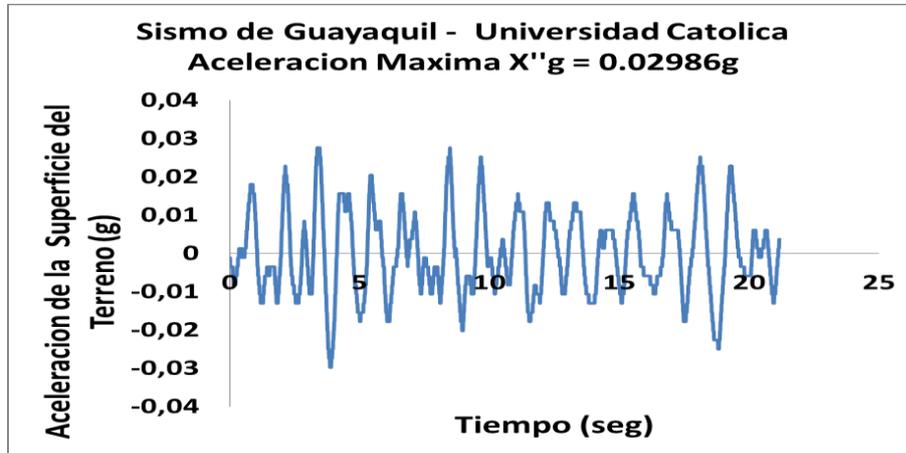


Ilustración 46: Acelerograma sismo de Guayaquil, centro de la ciudad

Fuente: (Argudo, 2011)

CAPÍTULO VI: RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Resultados para el edificio “A” sin aisladores

6.1.1. Análisis Modal

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis modal para el edificio “A” sin, aislamiento sísmico, de estos resultados, se utilizará el valor del periodo fundamental para determinar la aceleración correspondiente del espectro de respuesta para movimientos sísmicos de diseño, NEC-11.

PARTICIPACIÓN DE MASA							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	1,138	0,626	0,090	0,626	0,090	0,138	0,138
2	1,091	0,119	0,641	0,744	0,731	0,034	0,173
3	0,888	0,031	0,046	0,776	0,777	0,604	0,777
4	0,386	0,081	0,017	0,857	0,794	0,021	0,798
5	0,372	0,021	0,084	0,878	0,878	0,004	0,801
6	0,303	0,005	0,006	0,883	0,884	0,086	0,887
7	0,222	0,038	0,008	0,920	0,892	0,006	0,893
8	0,213	0,009	0,039	0,929	0,931	0,002	0,895
9	0,157	0,005	0,002	0,934	0,934	0,022	0,917
10	0,123	0,032	0,027	0,967	0,960	0,000	0,917
11	0,111	0,023	0,029	0,989	0,990	0,003	0,920
12	0,000	0,000	0,000	0,989	0,990	0,000	0,920

Tabla 23: Participaciones de masa del edificio A sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En la tabla de participaciones de masa se puede apreciar que los primeros 3 modos de vibración contienen la fracción mayor de las masas participativas de la respuesta dinámica de la estructura.

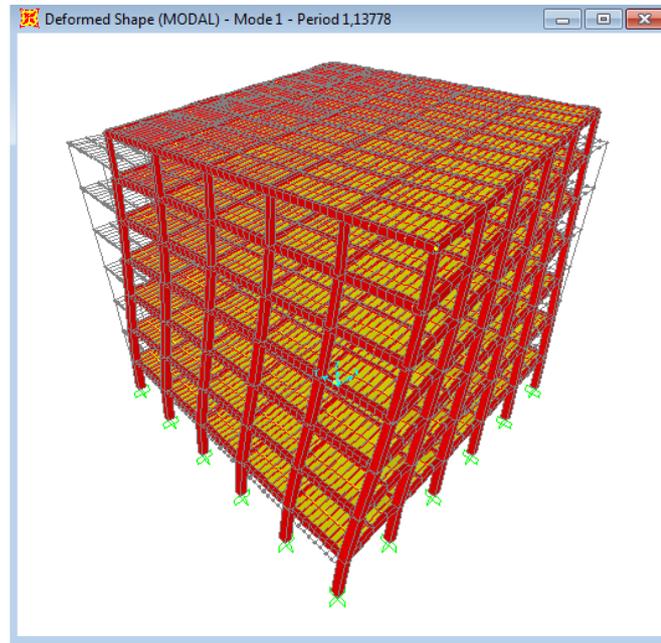


Ilustración 47: Modo 1 de vibración, traslación en X.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

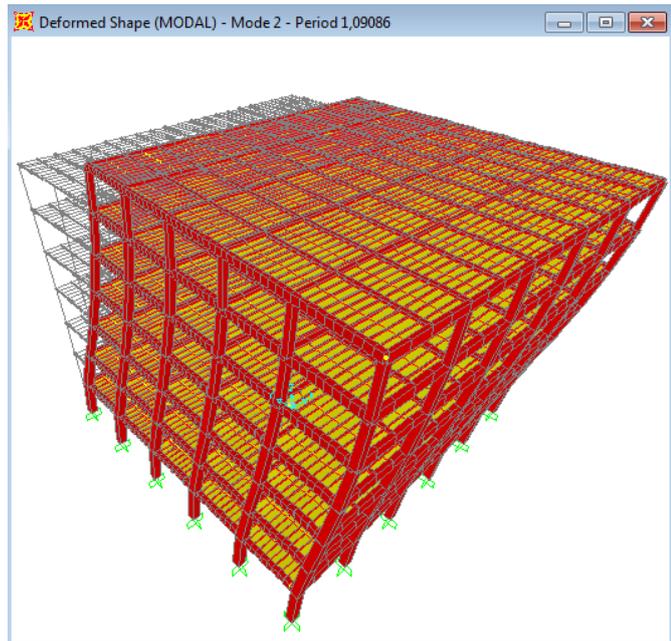


Ilustración 48: Modo 2 de vibración, traslación en Y.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

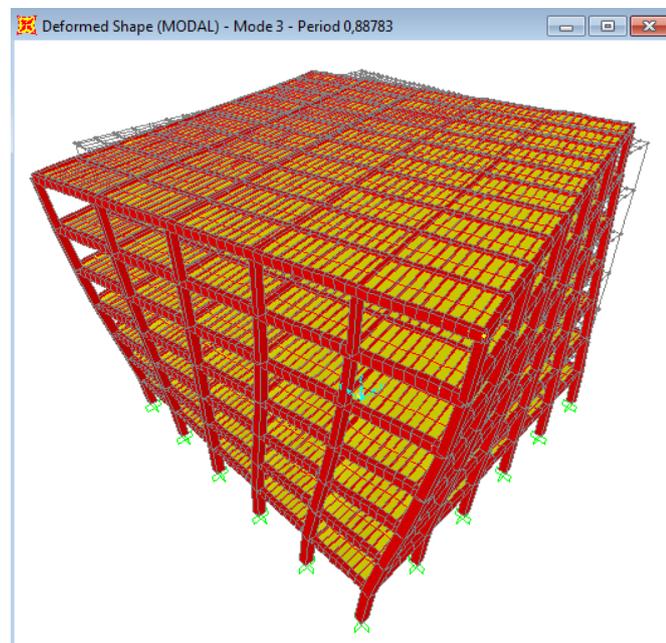


Ilustración 49: Modo 3 de vibración, rotacional.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

6.1.2. Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo)

A continuación se encuentra el resumen de los cortantes máximos en la base, tomados como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los cortantes máximos en las direcciones X y Y, para el edificio “A” con base empotrada. Se utiliza un solo valor representativo para toda la estructura debido a que esta es simétrica.

CORTANTE EN LA BASE		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MÁXIMO (Ton)
SINTETICO 1	LinModHist	5629,21
SINTETICO 2	LinModHist	4715,82
SINTETICO 3	LinModHist	5637,59
SINTETICO 4	LinModHist	8439,91
SINTETICO 5	LinModHist	6138,59
SINTETICO 6	LinModHist	8289,82
GYE CENTRO	LinModHist	8589,82
SISMO DEL CENTRO, CA	LinModHist	1620,63
MEXICO STC	LinModHist	2720,17

Tabla 24: Resumen de cortantes en la base para edificio A sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Sa (R=1)	W	V	0,8V
0,828	4217,34	3491,958	2793,566

Tabla 25: Cortante de control mínimo (80% del estático).

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En los resultados obtenidos en las tablas 25 y 26 podemos observar que tanto el cortante máximo obtenido para el Sismo del Centro, como para el Sismo de México no cumplen con el requerimiento mínimo de la norma.

6.2.Resultados para el edificio “A” aislado

6.2.1.Análisis Modal

A continuación se encuentran los resultados obtenidos del análisis modal para el edificio “A” aislado con los diferentes dispositivos utilizados.

PARTICIPACIÓN DE MASA - AISLADOR LRB500 (DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO = 300mm)							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	2,477	0,478	0,409	0,478	0,409	0,234	0,234
2	2,401	0,464	0,532	0,942	0,941	0,000	0,235
3	1,965	0,053	0,055	0,996	0,996	0,761	0,996
4	0,512	0,003	0,001	0,999	0,997	0,001	0,997
5	0,495	0,001	0,003	1,000	1,000	0,000	0,997
6	0,401	0,000	0,000	1,000	1,000	0,003	1,000
7	0,255	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
8	0,210	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
9	0,171	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
10	0,136	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
11	0,007	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
12	0,003	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000

Tabla 26: Participación de masas para el edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Tal como se hizo en la sección 6.1.1.Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=2,477$ segundos para calcular $S_a=0,37$.

PARTICIPACIÓN DE MASA - AISLADOR LRB500 (DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO = 350mm)							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	2,658	0,474	0,415	0,474	0,415	0,235	0,235
2	2,576	0,469	0,527	0,943	0,942	0,000	0,235
3	2,108	0,054	0,055	0,997	0,997	0,762	0,997
4	0,516	0,002	0,001	0,999	0,998	0,001	0,998
5	0,498	0,001	0,002	1,000	1,000	0,000	0,998
6	0,403	0,000	0,000	1,000	1,000	0,002	1,000
7	0,255	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
8	0,211	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
9	0,172	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
10	0,136	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
11	0,007	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
12	0,003	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000

Tabla 27: Participación de masas para el edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm

Tal como se hizo en la sección 6.1.1.Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=2,658$ segundos para calcular $S_a=0,34$.

PARTICIPACIÓN DE MASA - AISLADOR LRB500 (DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO = 400mm)							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	2,832	0,470	0,418	0,470	0,418	0,235	0,235
2	2,745	0,473	0,524	0,944	0,943	0,000	0,236
3	2,247	0,054	0,055	0,997	0,998	0,762	0,998
4	0,519	0,002	0,000	0,999	0,998	0,000	0,998
5	0,501	0,001	0,002	1,000	1,000	0,000	0,998
6	0,405	0,000	0,000	1,000	1,000	0,002	1,000
7	0,256	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
8	0,211	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
9	0,172	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
10	0,136	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
11	0,007	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
12	0,003	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000

Tabla 28: Participación de masas para el edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm

Tal como se hizo en la sección 6.1.1. Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=2,832$ segundos para calcular $S_a=0,30$.

6.2.2. Análisis dinámico no lineal (Historia-Tiempo)

Siguiendo el mismo procedimiento descrito antes en la sección 6.1.2. Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo), se calcularon los cortantes máximos a la base para el edificio "A" con base aislada.

Sa (R=1)	W	V	0,8V
0,37	4217,34	1560,416	1248,333
0,34	4217,34	1433,896	1147,116
0,3	4217,34	1265,202	1012,162

Tabla 29: Cortante de control mínimo (80% del estático).

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CORTANTE EN LA BASE – LRB500 (300mm)		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINTETICO 1	NonModHist	1637,90
SINTETICO 2	NonModHist	1486,14
SINTETICO 3	NonModHist	1245,72
SINTETICO 4	NonModHist	1718,16
SINTETICO 5	NonModHist	1812,64
SINTETICO 6	NonModHist	1610,67
GYE CENTRO	NonModHist	1459,04
SISMO CENTRO, CA	NonModHist	601,73
MEXICO STC	NonModHist	7614,72

Tabla 30: Resumen de cortantes en la base para edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CORTANTE EN LA BASE - LRB500 (350mm)		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINETICO 1	NonModHist	1359,63
SINETICO 2	NonModHist	1327,09
SINETICO 3	NonModHist	1129,15
SINETICO 4	NonModHist	1602,04
SINETICO 5	NonModHist	1544,19
SINETICO 6	NonModHist	1313,01
GYE CENTRO	NonModHist	1272,58
SISMO CENTRO, CA	NonModHist	583,02
MEXICO STC	NonModHist	7035,45

Tabla 31: Resumen de cortantes en la base para edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CORTANTE EN LA BASE - LRB500 (400mm)		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINTETICO 1	NonModHist	1195,18
SINTETICO 2	NonModHist	1249,25
SINTETICO 3	NonModHist	1033,82
SINTETICO 4	NonModHist	1374,14
SINTETICO 5	NonModHist	1349,70
SINTETICO 6	NonModHist	1154,31
GYE CENTRO	NonModHist	1100,37
SISMO CENTRO, CA	NonModHist	566,99
MEXICO STC	NonModHist	5425,88

Tabla 32: Resumen de cortantes en la base para edificio A aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En los resultados obtenidos en las tablas 30, 31, 32 y 33 se puede observar que el cortante máximo obtenido para el Sismo del Centro no cumple con el requerimiento mínimo de la norma, mientras que el Sismo de México amplifica grandemente el cortante en la base.

6.3.Resultados para el edificio “B” sin aisladores

6.3.1.Análisis Modal

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis modal para el edificio “B” sin aislamiento sísmico, de estos resultados, se utilizará el valor del periodo fundamental para determinar la aceleración correspondiente del espectro de respuesta para movimientos sísmicos de diseño, conforme NEC-11.

PARTICIPACIÓN DE MASA							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	1,036	0,742	0,018	0,742	0,018	0,117	0,117
2	1,003	0,020	0,745	0,763	0,763	0,474	0,592
3	0,644	0,005	0,006	0,767	0,769	0,177	0,769
4	0,347	0,105	0,005	0,872	0,774	0,013	0,782
5	0,337	0,005	0,105	0,877	0,878	0,072	0,854
6	0,217	0,001	0,002	0,878	0,880	0,023	0,877
7	0,197	0,046	0,002	0,923	0,882	0,006	0,884
8	0,190	0,003	0,048	0,926	0,930	0,037	0,920
9	0,129	0,024	0,000	0,950	0,930	0,004	0,924
10	0,102	0,001	0,058	0,950	0,988	0,020	0,944
11	0,089	0,041	0,001	0,992	0,989	0,023	0,966
12	0,000	0,000	0,000	0,992	0,989	0,000	0,966

Tabla 33: Participación de masas para el edificio B sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Tal como se hizo en la sección 6.1.1. Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=1,036$ segundos para calcular $S_a=0,828$. Una de las diferencias en comportamiento que existe entre el edificio B y el edificio A se la puede ver claramente en la tabla 34, en donde la mayor participación de masa rotacional se concentra en el modo 2 de vibración, lo cual se debe a que el edificio B se ve más afectado por los efectos torsionales que el edificio A.

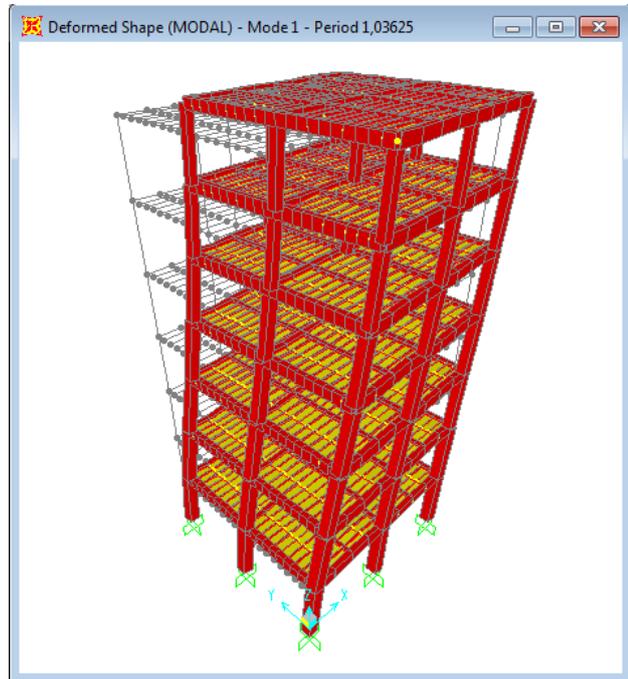


Ilustración 50: Modo 1 de vibración, traslación en X.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

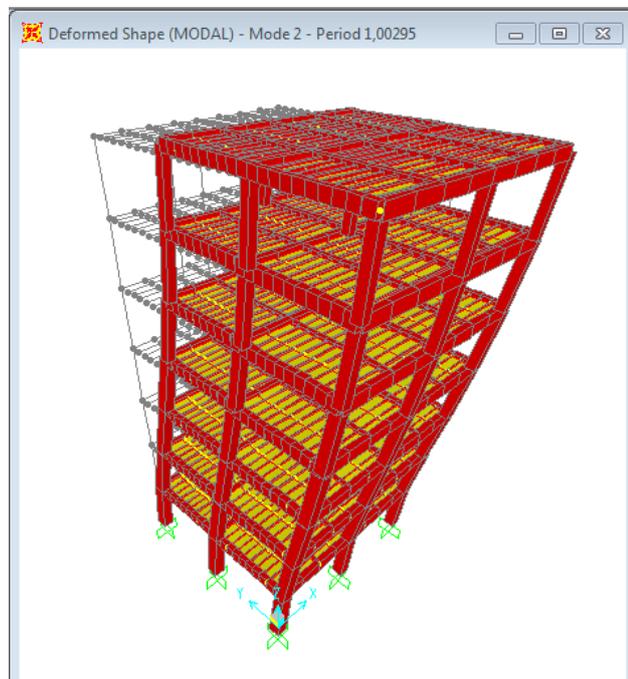


Ilustración 51: Modo 2 de vibración, traslación en Y.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

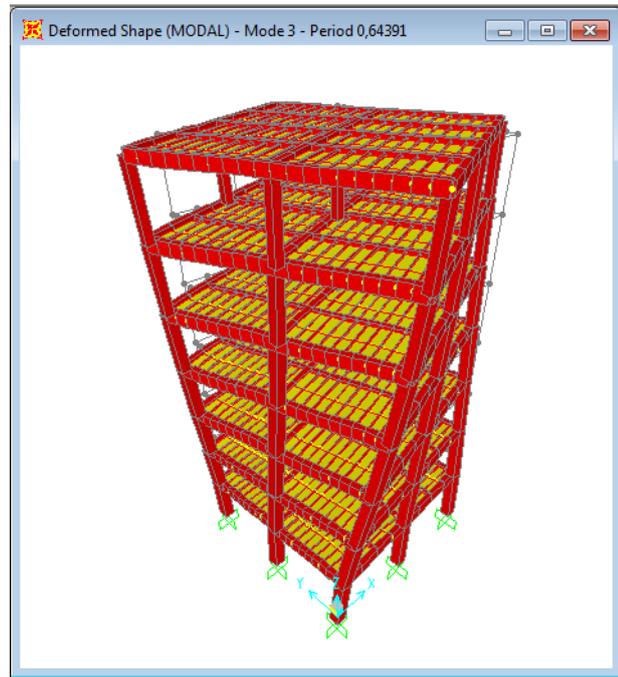


Ilustración 52: Modo 3 de vibración, rotacional.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

6.3.2. Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo)

Siguiendo el mismo procedimiento descrito antes, en la sección 6.1.2., Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo), se calcularon los cortantes máximos a la base para el edificio “B” sin aislamiento sísmico.

CORTANTE EN LA BASE		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINETICO 1	LinModHist	837,981783
SINETICO 2	LinModHist	633,046354
SINETICO 3	LinModHist	814,085218
SINETICO 4	LinModHist	922,282311
SINETICO 5	LinModHist	840,711856
SINETICO 6	LinModHist	1190,14399
GYE CENTRO	LinModHist	487,852227
SISMO CENTRO, CA	LinModHist	1228,3946
MEXICO STC	LinModHist	436,073579

Tabla 34: Resumen de cortantes en la base para el edificio B sin aislamiento

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Sa (R=1)	W	V	0,8V
0,828	760,08	629,34624	503,476992

Tabla 35: Cortante de control mínimo (80% del estático)

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En los resultados obtenidos en las tablas 34 y 35 podemos observar que tanto el cortante máximo obtenido para el Sismo de Guayaquil (Gye Centro), como para el Sismo de México no cumplen con el requerimiento mínimo de la norma.

6.4.Resultados para el edificio “B” aislado

6.4.1.Análisis Modal

A continuación se encuentran los resultados obtenidos del análisis modal para el edificio “B” aislado con los diferentes dispositivos utilizados.

PARTICIPACIÓN DE MASA - AISLADOR LRB500 (DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO = 300mm)							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	2,096	0,589	0,381	0,589	0,381	0,005	0,005
2	2,067	0,392	0,601	0,982	0,982	0,761	0,766
3	1,428	0,012	0,012	0,993	0,994	0,229	0,994
4	0,475	0,006	0,000	0,999	0,994	0,001	0,995
5	0,464	0,000	0,005	1,000	1,000	0,004	0,999
6	0,301	0,000	0,000	1,000	1,000	0,001	1,000
7	0,232	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
8	0,193	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
9	0,130	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
10	0,123	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
11	0,011	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
12	0,003	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000

Tabla 36: Participación de masas para el edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Tal como se hizo en la sección 6.1.1.Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=2,096$ segundos para calcular $S_a=0,48$.

PARTICIPACIÓN DE MASA - AISLADOR LRB500 (DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO = 350mm)							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	2,245	0,576	0,395	0,576	0,395	0,007	0,007
2	2,214	0,407	0,588	0,983	0,983	0,760	0,767
3	1,532	0,012	0,012	0,995	0,995	0,229	0,996
4	0,480	0,004	0,000	0,999	0,996	0,001	0,996
5	0,469	0,000	0,004	1,000	1,000	0,003	0,999
6	0,303	0,000	0,000	1,000	1,000	0,001	1,000
7	0,232	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
8	0,194	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
9	0,130	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
10	0,124	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
11	0,010	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
12	0,004	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000

Tabla 37: Participación de masas para el edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Tal como se hizo en la sección 6.1.1. Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=2,245$ segundos para calcular $S_a=0,43$.

PARTICIPACIÓN DE MASA - AISLADOR LRB500 (DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO = 400mm)							
MODO	T (seg)	% PART. DE MASA EN X	% PART. DE MASA EN Y	SUM. DE PART. DE MASA EN X	SUM. DE PART. DE MASA EN Y	PART. DE MASA ROTACIONAL	SUM. DE PART. DE MASA ROTACIONAL
1	2,390	0,565	0,407	0,565	0,407	0,009	0,009
2	2,357	0,419	0,577	0,984	0,984	0,759	0,768
3	1,632	0,012	0,012	0,996	0,996	0,229	0,997
4	0,485	0,004	0,000	1,000	0,997	0,000	0,997
5	0,474	0,000	0,003	1,000	1,000	0,002	0,999
6	0,304	0,000	0,000	1,000	1,000	0,001	1,000
7	0,233	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
8	0,194	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
9	0,130	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
10	0,124	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
11	0,009	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000
12	0,004	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	1,000

Tabla 38: Participación de masas para el edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Tal como se hizo en la sección 6.1.1.Análisis modal, se usó el periodo fundamental $T=2,390$ segundos para calcular $S_a=0,39$.

6.4.2.Análisis dinámico no lineal (Historia-Tiempo)

Siguiendo el mismo procedimiento descrito antes en la sección 6.1.2.Análisis dinámico lineal (Historia-Tiempo), se calcularon los cortantes máximos a la base para el edificio “B” con base aislada.

Sa (R=1)	W	V	0,8V
0,48	760,08	364,8384	291,87072
0,43	760,08	326,8344	261,46752
0,39	760,08	296,4312	237,14496

Tabla 39: Cortante de control mínimo (80% del estático).

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CORTANTE EN LA BASE - LRB500(300mm)		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINTETICO 1	NonModHist	383,25
SINTETICO 2	NonModHist	297,52
SINTETICO 3	NonModHist	296,96
SINTETICO 4	NonModHist	315,12
SINTETICO 5	NonModHist	475,29
SINTETICO 6	NonModHist	398,46
GYE CENTRO	NonModHist	311,14
SISMO CENTRO, CA	NonModHist	144,85
MEXICO STC	NonModHist	1926,12

Tabla 40: Resumen de cortantes en la base para edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 300mm.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CORTANTE EN LA BASE - LRB500 (350mm)		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINETICO 1	NonModHist	333,27
SINETICO 2	NonModHist	277,60
SINETICO 3	NonModHist	280,13
SINETICO 4	NonModHist	281,75
SINETICO 5	NonModHist	376,25
SINETICO 6	NonModHist	356,60
GYE CENTRO	NonModHist	297,78
SISMO CENTRO, CA	NonModHist	138,51
MEXICO STC	NonModHist	1666,24

Tabla 41: Resumen de cortantes en la base para edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 350mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CORTANTE EN LA BASE - LRB500 (400mm)		
CASO DE CARGA	TIPO DE CASO	CORTANTE MAXIMO (Ton)
SINETICO 1	NonModHist	294,24
SINETICO 2	NonModHist	261,28
SINETICO 3	NonModHist	258,78
SINETICO 4	NonModHist	260,44
SINETICO 5	NonModHist	322,57
SINETICO 6	NonModHist	307,16
GYE CENTRO	NonModHist	278,99
SISMO CENTRO, CA	NonModHist	134,05
MEXICO STC	NonModHist	1433,44

Tabla 42: Resumen de cortantes en la base para edificio B aislado con el dispositivo LRB500 con un desplazamiento de diseño de 400mm

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En los resultados obtenidos en las tablas 39, 40, 41 y 42 podemos observar que el cortante máximo obtenido para el Sismo del Centro no cumple con el requerimiento mínimo de la norma, mientras que el Sismo de México amplifica grandemente el cortante en la base.

CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el “capítulo VI: Resultados obtenidos” se pudo apreciar que, de los tres sismos reales, tanto el “Sismo de El Centro” como el “Sismo de México” dan resultados insatisfactorios, al no cumplir con los requisitos mínimos de cortante dinámico de la norma NEC-11, o amplificando grandemente los resultados, mientras que el “Sismo de Guayaquil” en solo un caso estuvo ligeramente por debajo del requisito mínimo de cortante dinámico de norma NEC-11 (menos del 5%), por lo que será considerado para los análisis siguientes. Esto se debe a que el “Sismo de México” concentra energía en unos pocos períodos dentro del rango $2 \leq T \leq 3.5$ segundos, y da allí resultados muy amplificados; el “Sismo del Centro” es para suelo tipo D y es normal que para periodos mayores a dos segundos atenúe mucho la respuesta; el “Sismo de Guayaquil” es para suelo tipo E pero fue medido para un sismo de poca intensidad, asociado con bajas deformaciones en el terreno, por lo que para periodos mayores a un segundo atenúa también bastante los resultados. Por estas razones se usan los sismos sintéticos y el sismo de Guayaquil (Gye Centro) para los siguientes análisis.

7.1. Análisis de resultados edificio “A”

7.1.1. Cortantes en la base empleando diferentes aisladores

Los porcentajes de reducción de cortante fueron calculados en función de los resultados obtenidos del modelo sin aisladores, para la condición del sismo de diseño elástico ($R=1$).

CORTANTES EN LA BASE Y % DE REDUCCIÓN DEL CORTANTE EMPLEANDO DIFERENTES AISLADORES							
CASO DE CARGA	Modelo sin aisladores	LRB500 ($\Delta=300\text{mm}$)	% LRB500 ($\Delta=300\text{mm}$)	LRB500 ($\Delta=350\text{mm}$)	% LRB500 ($\Delta=350\text{mm}$)	LRB500 ($\Delta=400\text{mm}$)	% LRB500 ($\Delta=400\text{mm}$)
SINTETICO 1	5629,21	1637,90	70,90%	1359,63	75,85%	1195,18	78,77%
SINTETICO 2	4715,82	1486,14	68,49%	1327,09	71,86%	1249,25	73,51%
SINTETICO 3	5637,59	1245,72	77,90%	1129,15	79,97%	1033,82	81,66%
SINTETICO 4	8439,91	1718,16	79,64%	1602,04	81,02%	1374,14	83,72%
SINTETICO 5	6138,59	1812,64	70,47%	1544,19	74,84%	1349,70	78,01%
SINTETICO 6	8289,82	1610,67	80,57%	1313,01	84,16%	1154,31	86,08%
GYE CENTRO	8589,82	1459,04	83,01%	1272,58	85,19%	1100,37	87,19%
SISMO CENTRO, CA	1620,63	601,73	62,87%	583,02	64,03%	566,99	65,01%
MEXICO STC	2720,17	7614,72	0,00%	7035,45	0,00%	5425,88	0,00%

Tabla 43: Resumen de reducciones para los cortantes basales en el edificio A empleando aisladores

. Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.1.2. Gráficas de cortante en la base vs. Tiempo

En las ilustraciones 53 a 59 se muestran las gráficas de cortante en la base vs. tiempo para los sismos seleccionados, del edificio A con y sin aisladores. Los cortantes se obtienen para la condición del sismo de diseño elástico ($R=1$).

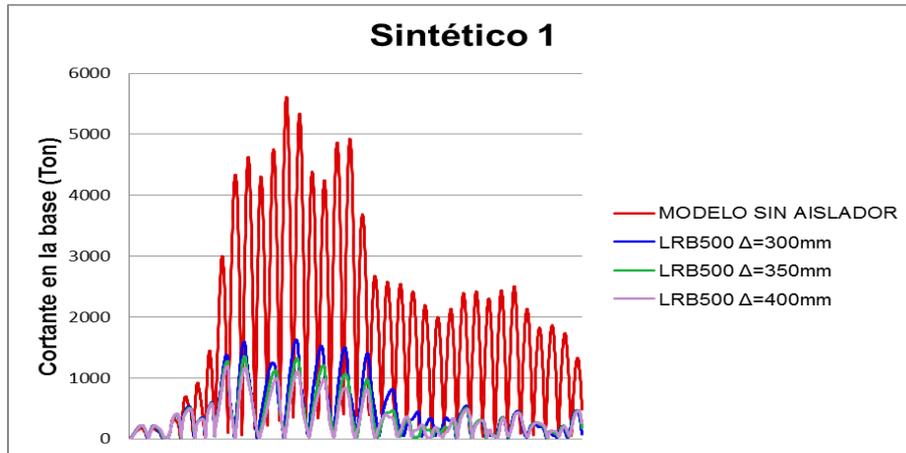


Ilustración 53: Cortante basal Sintético 1 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

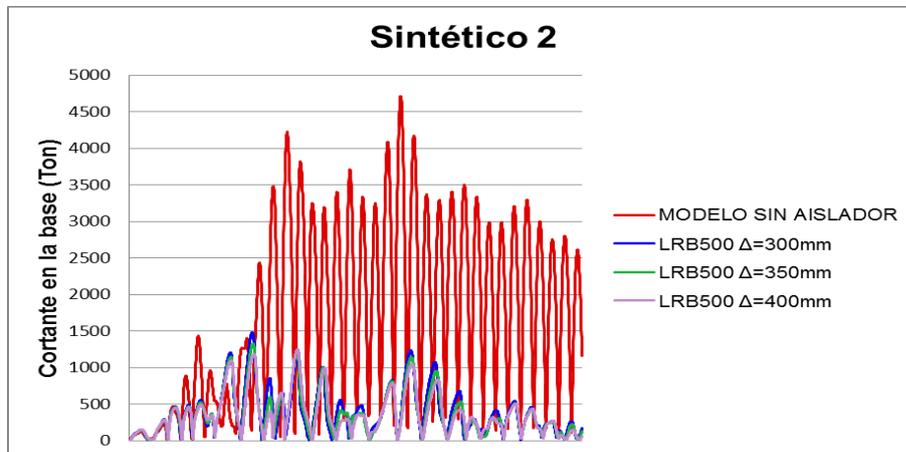


Ilustración 54: Cortante basal Sintético 2 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

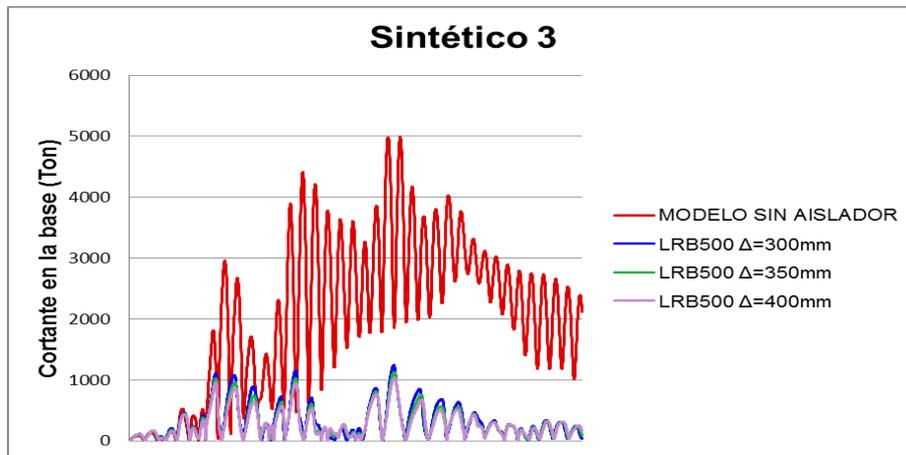


Ilustración 55: Cortante basal Sintético 3 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

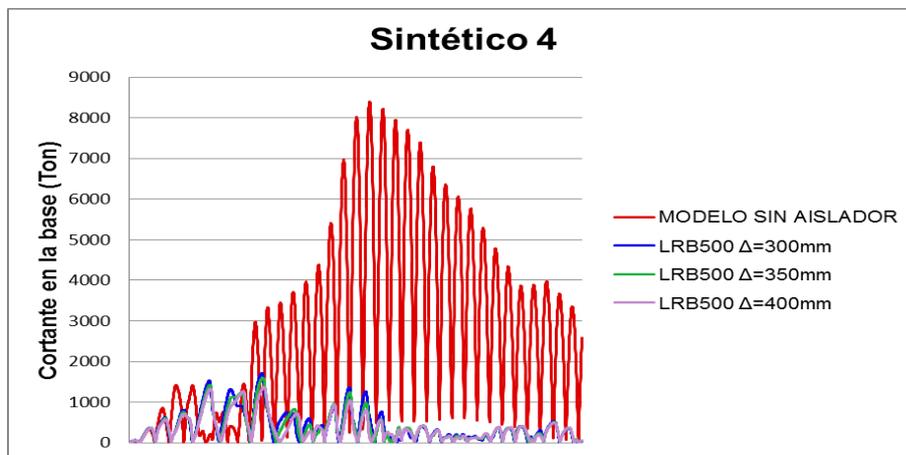


Ilustración 56: Cortante basal Sintético 4 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

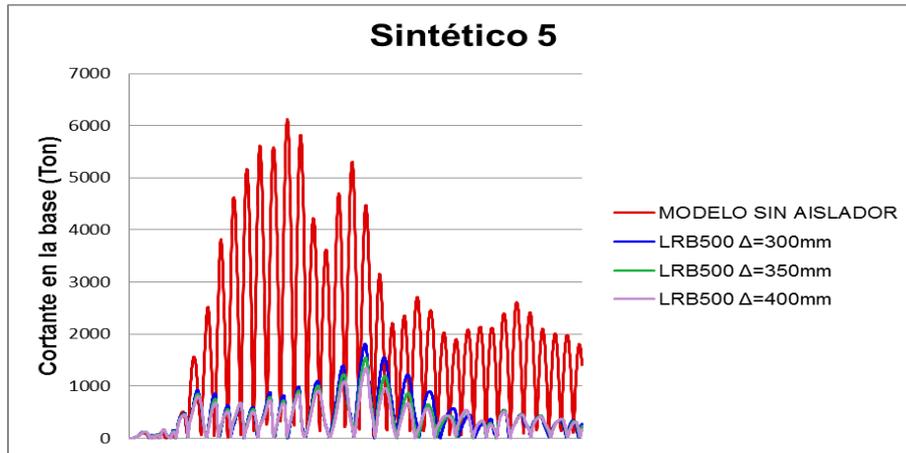


Ilustración 57: Cortante basal Sintético 5 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

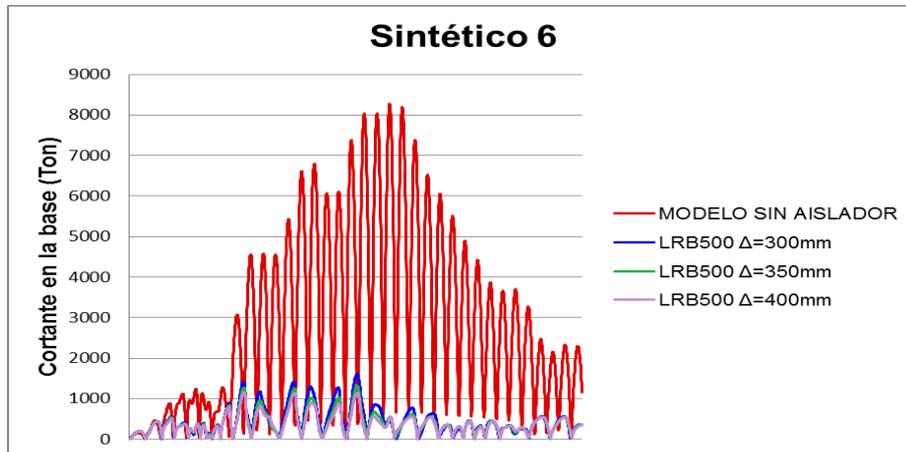


Ilustración 58: Cortante basal Sintético 6 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

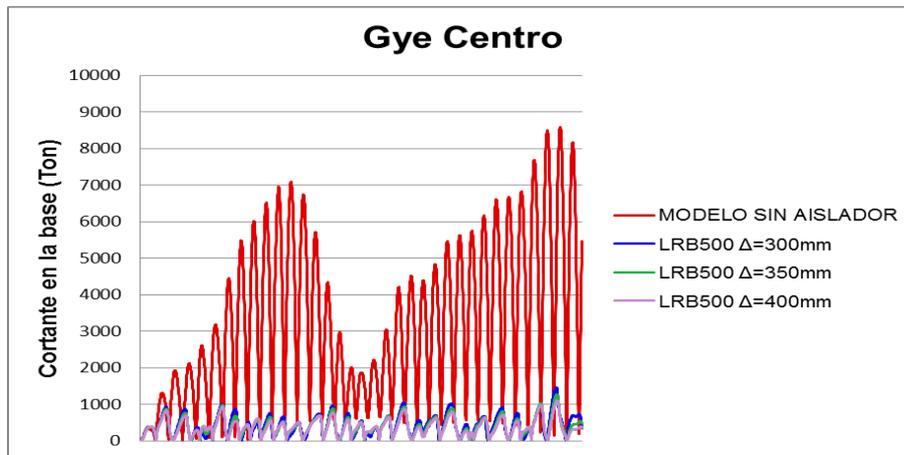


Ilustración 59: Cortante basal sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.1.3. Gráficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs. Tiempo

En las ilustraciones 60 a 66 se muestran las gráficas de desplazamiento de un nodo de control en la cubierta vs. tiempo para los sismos seleccionados, del edificio A con y sin aisladores. Los desplazamientos graficados son absolutos o totales, para la condición del sismo de diseño elástico ($R=1$), siendo el desplazamiento total igual a la suma de la deformación de flexión de la superestructura y la deformación de corte horizontal en el aislador.

La fracción mayor de la deformación total está asociada con las deformaciones de corte horizontal en el aislador, y no con las deformaciones de flexión de la superestructura, la cual se mueve muy cercana al movimiento de un cuerpo rígido. No se registraron valores de deformación de flexión de la superestructura, que sean mayores a 0,15 metros, para ninguno de los casos.

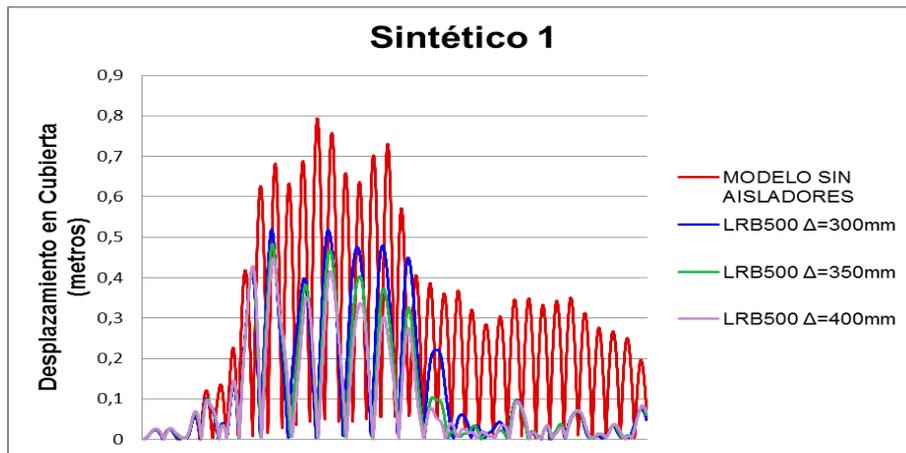


Ilustración 60: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 1 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

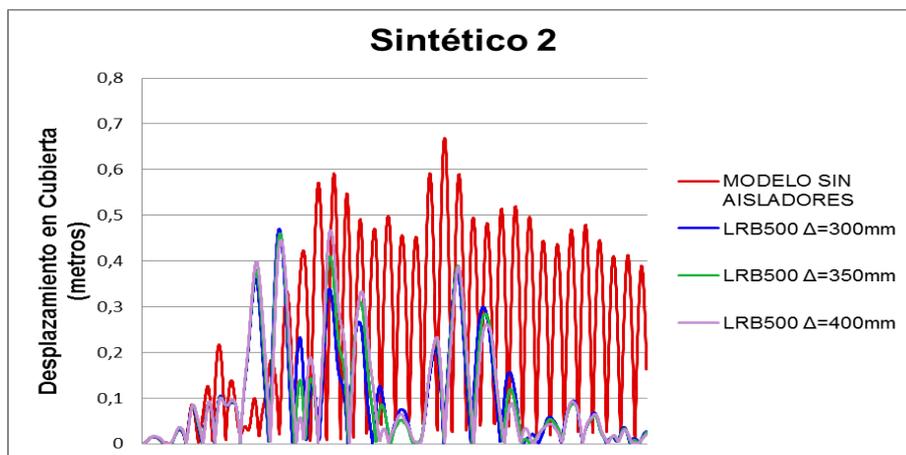


Ilustración 61: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 2 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

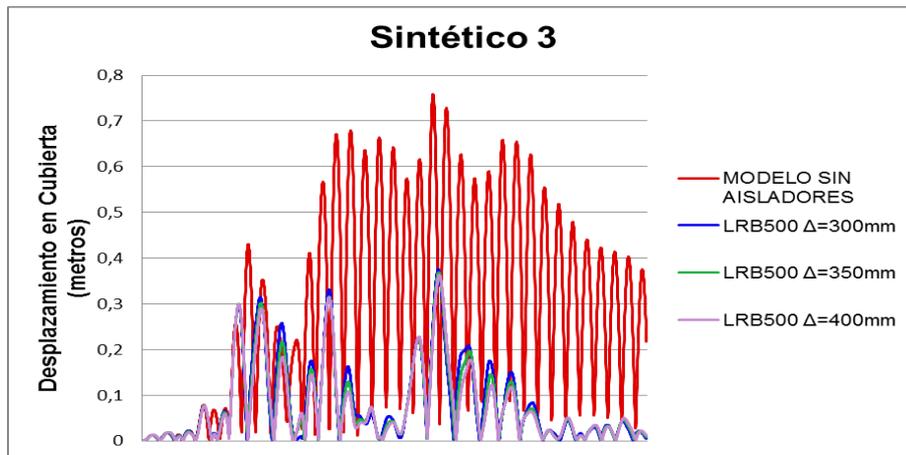


Ilustración 62: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

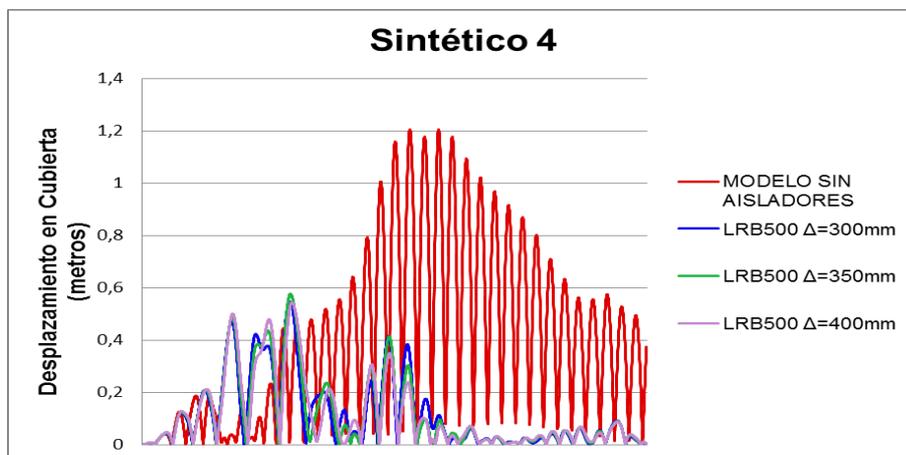


Ilustración 63: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 4 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

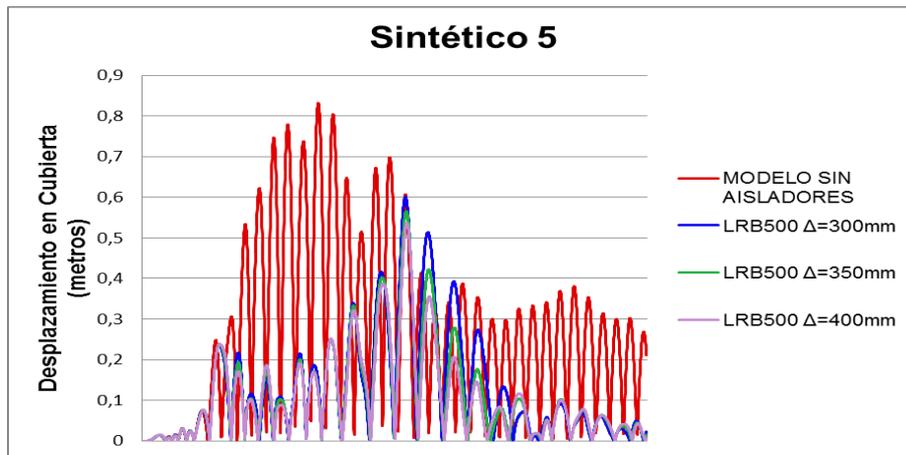


Ilustración 64: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 5 vs. Tiempo.

. Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

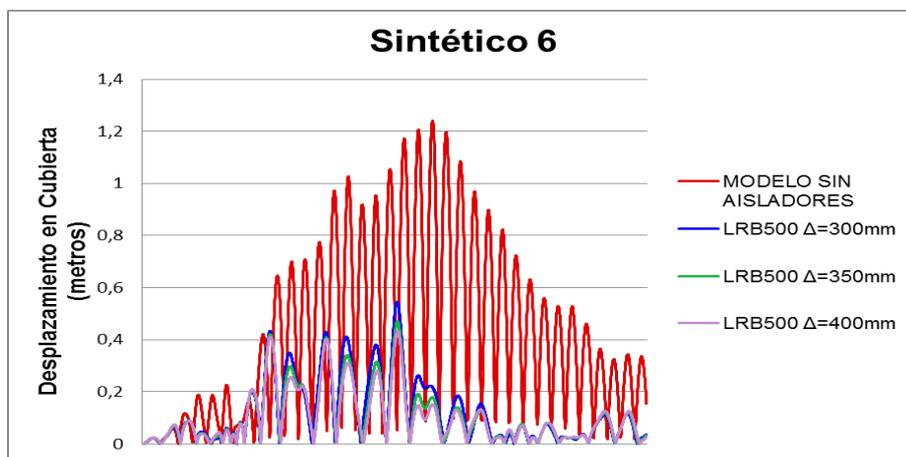


Ilustración 65: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 6 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

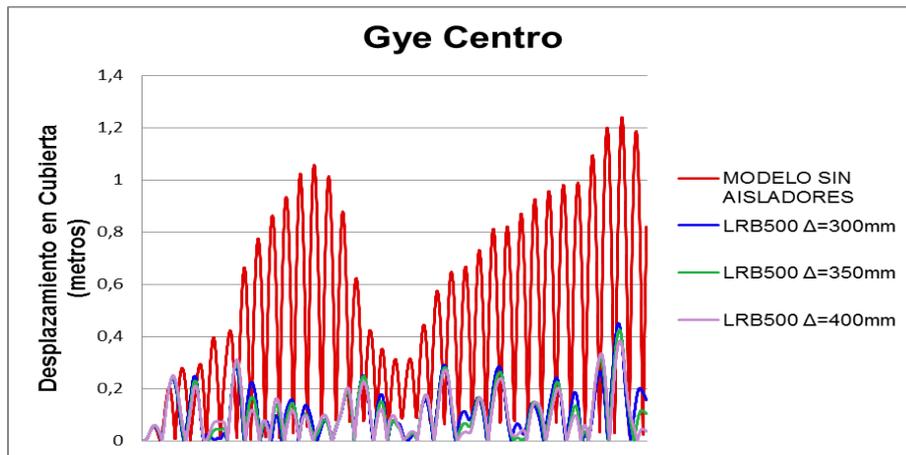


Ilustración 66: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.2.Análisis de resultados edificio “B”

7.2.1.Cortantes en la base empleando diferentes aisladores

Los porcentajes de reducción de cortante fueron calculados en función de los resultados obtenidos del modelo sin aisladores, para la condición del sismo de diseño elástico (R=1).

CORTANTES EN LA BASE Y % DE REDUCCIÓN DEL CORTANTE EMPLEANDO DIFERENTES AISLADORES							
CASO DE CARGA	Modelo sin aisladores	LRB500 ($\Delta=300\text{mm}$)	% LRB500 ($\Delta=300\text{mm}$)	LRB500 ($\Delta=350\text{mm}$)	% LRB500 ($\Delta=350\text{mm}$)	LRB500 ($\Delta=400\text{mm}$)	% LRB500 ($\Delta=400\text{mm}$)
SINTETICO 1	837,98	383,25	54,27%	333,27	60,23%	294,24	64,89%
SINTETICO 2	633,05	297,52	53,00%	277,60	56,15%	261,28	58,73%
SINTETICO 3	814,09	296,96	63,52%	280,13	65,59%	258,78	68,21%
SINTETICO 4	922,28	315,12	65,83%	281,75	69,45%	260,44	71,76%
SINTETICO 5	840,71	475,29	43,47%	376,25	55,25%	322,57	61,63%
SINTETICO 6	1190,14	398,46	66,52%	356,60	70,04%	307,16	74,19%
GYE CENTRO	487,85	311,14	36,22%	297,78	38,96%	278,99	42,81%
SISMO CENTRO, CA	1228,39	144,85	88,21%	138,51	88,72%	134,05	89,09%
MEXICO STC	436,07	1926,12	0,00%	1666,24	0,00%	1433,44	0,00%

Tabla 44: Resumen de reducciones para los cortantes basales en el edificio B empleando aisladores

. Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.2.2. Gráficas de cortante en la base vs. Tiempo

En las ilustraciones 67 a 73 se muestran las gráficas de cortante en la base vs. tiempo para los sismos seleccionados, del edificio B con y sin aisladores. Los cortantes se obtienen para la condición del sismo de diseño elástico ($R=1$).

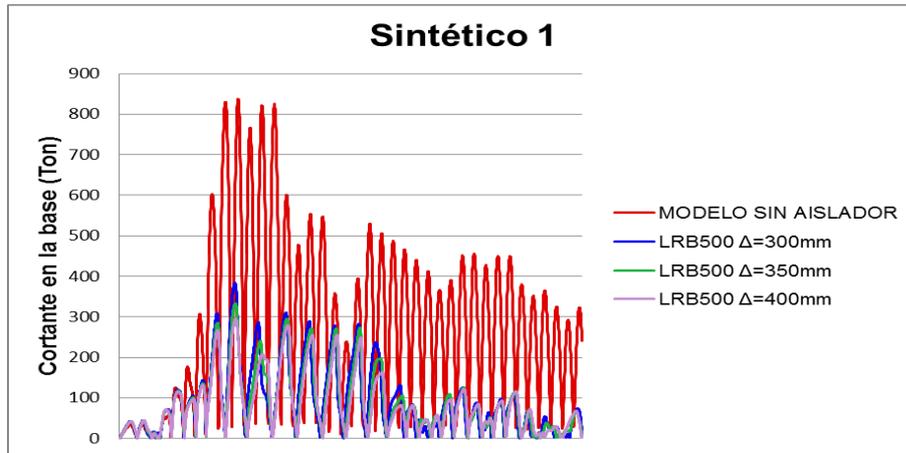


Ilustración 67: Cortante basal Sintético 1 vs. Tiempo.

. Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

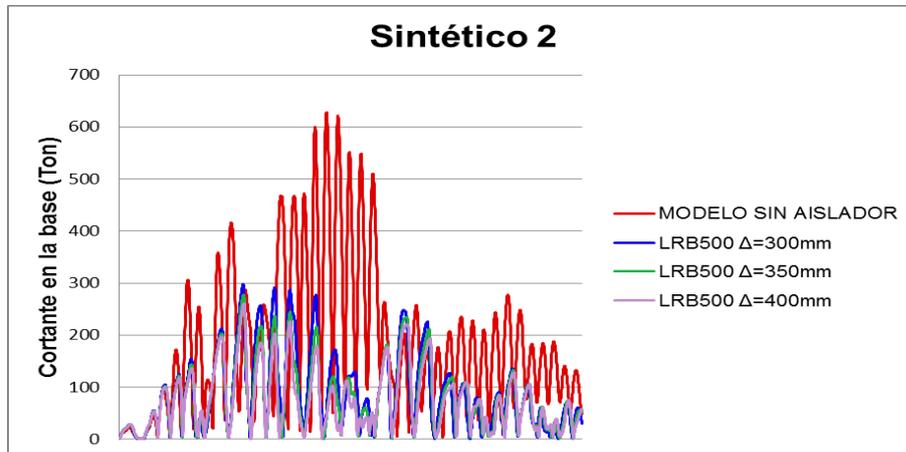


Ilustración 68: Cortante basal Sintético 2 vs. Tiempo.

. Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

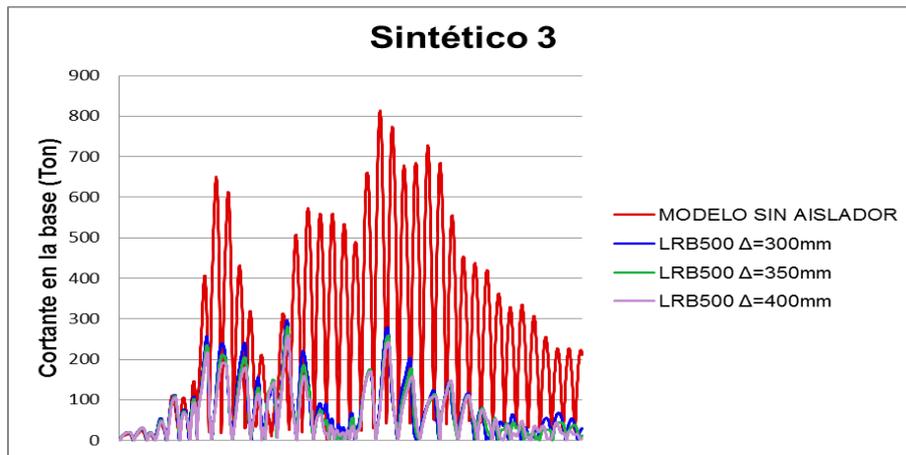


Ilustración 69: Cortante basal Sintético 3 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

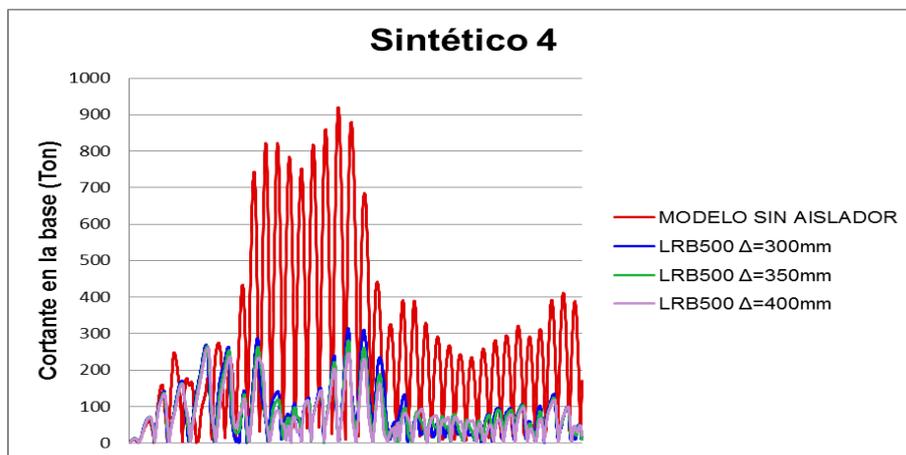


Ilustración 70: Cortante basal Sintético 4 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

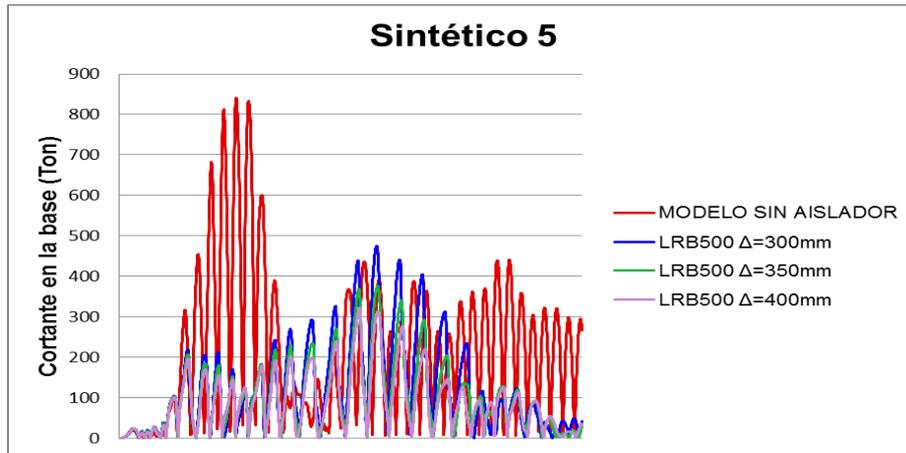


Ilustración 71: Cortante basal Sintético 5 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

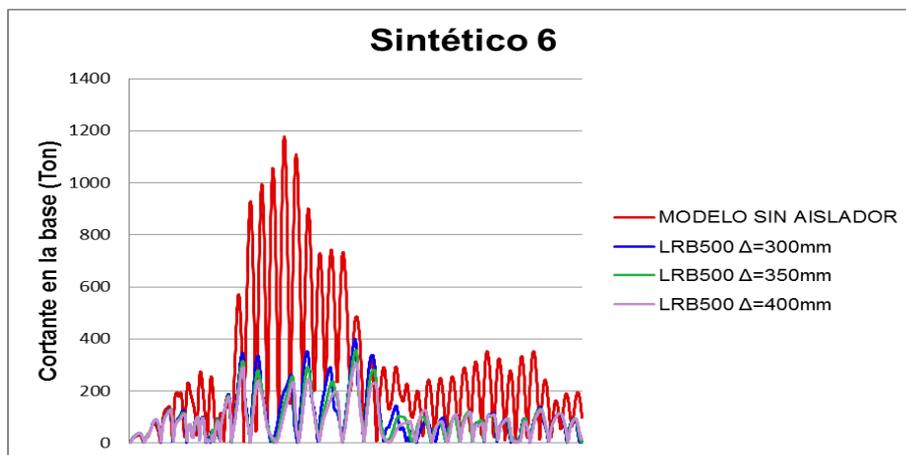


Ilustración 72: Cortante basal Sintético 6 vs. Tiempo

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

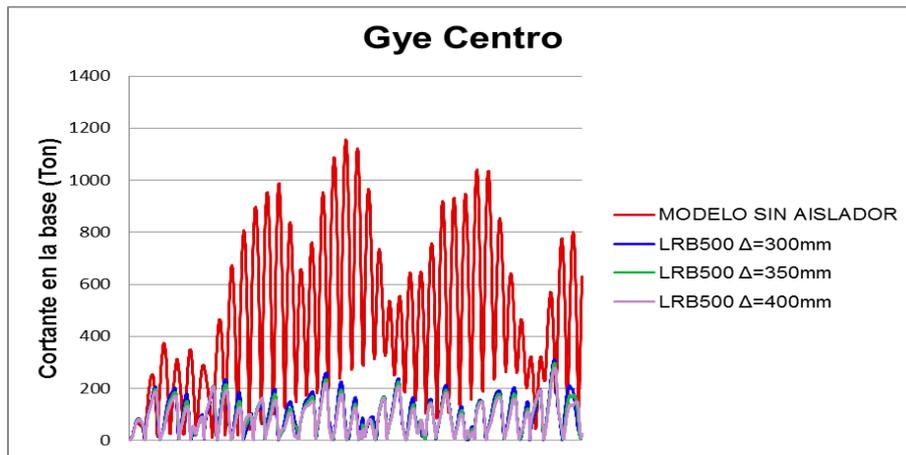


Ilustración 73: Cortante basal sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.2.3. Gráficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs. Tiempo

En las ilustraciones 74 a 80 se muestran las gráficas de desplazamiento de un nodo de control en la cubierta vs. tiempo para los sismos seleccionados, del edificio B con y sin aisladores. Tal como se hizo en la sección 7.1.3. Gráficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs. tiempo, los desplazamientos graficados son absolutos o totales, para la condición del sismo de diseño elástico ($R=1$).

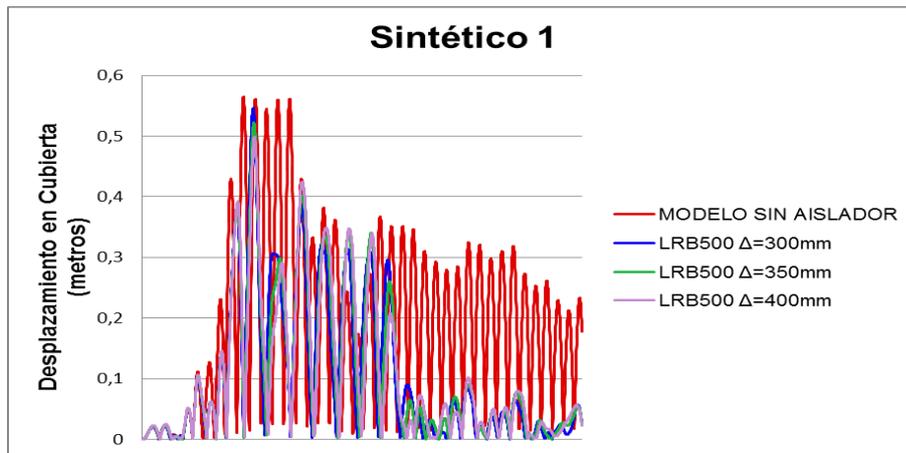


Ilustración 74: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 1 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

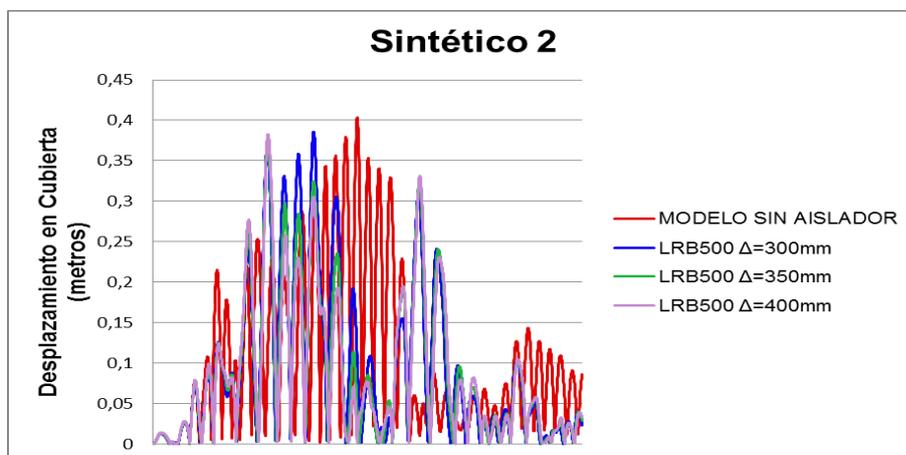


Ilustración 75: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 2 vs. Tiempo

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

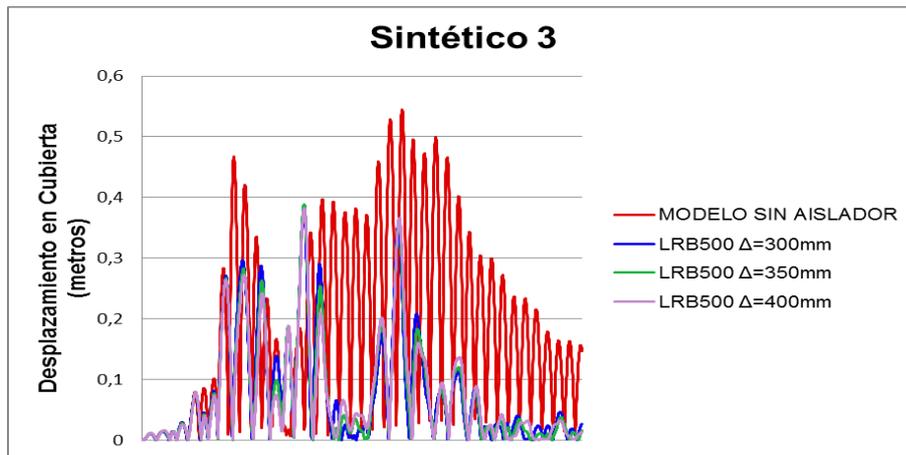


Ilustración 76: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 3 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

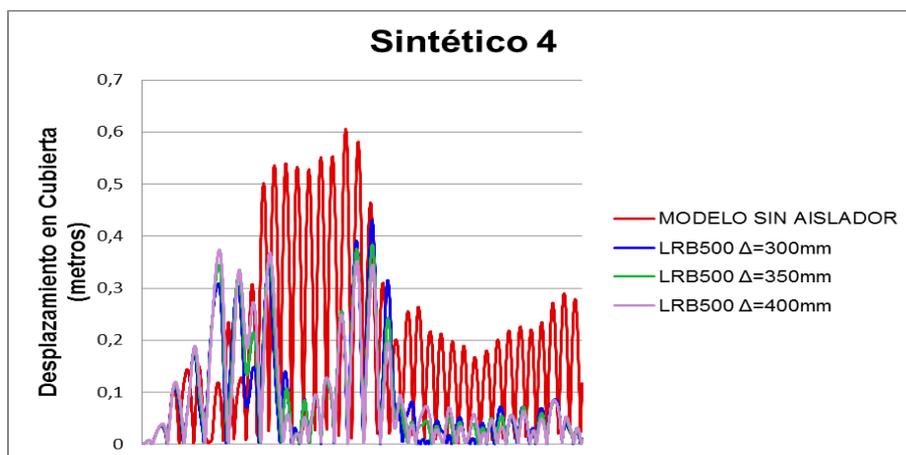


Ilustración 77: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 4 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

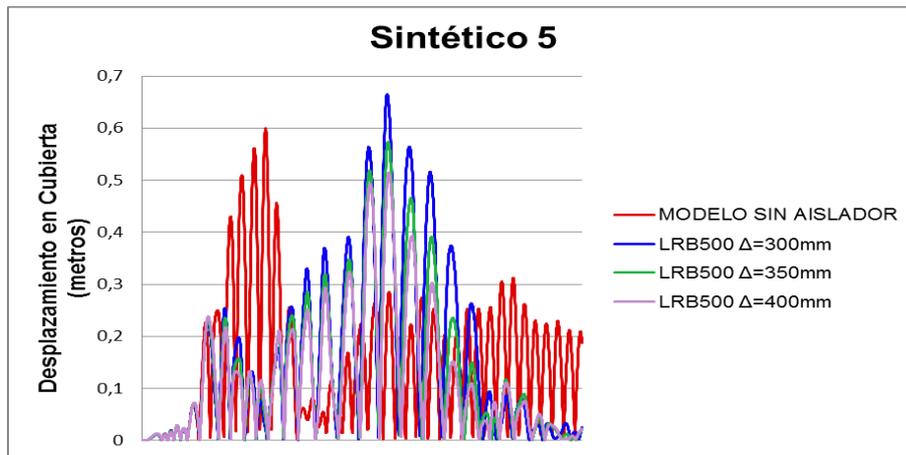


Ilustración 78: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 5 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

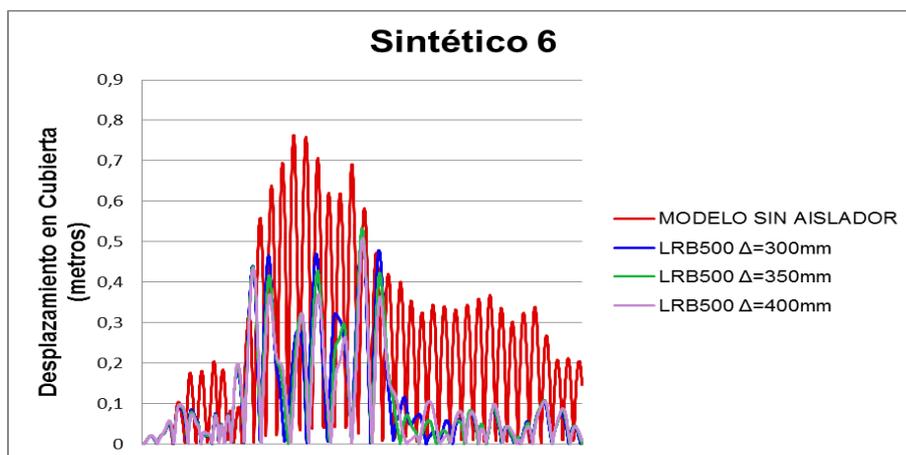


Ilustración 79: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo Sintético 6 vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

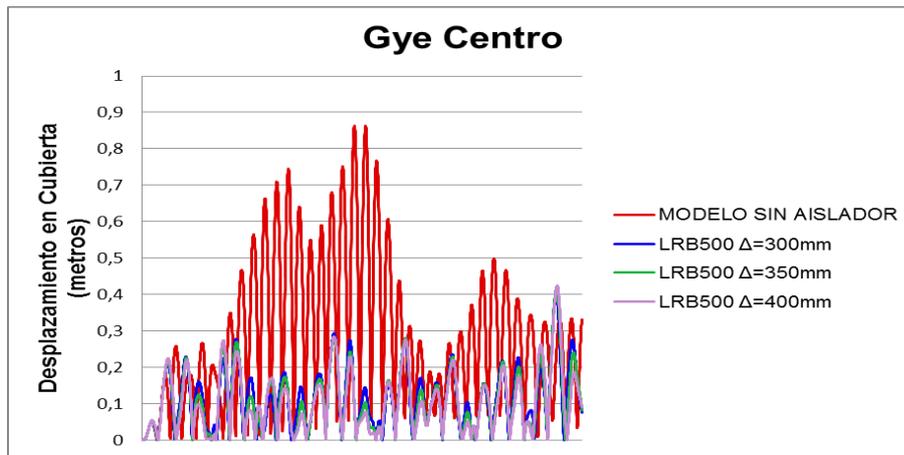


Ilustración 80: Desplazamiento de un nodo de control en la cubierta para el sismo del centro de Guayaquil vs. Tiempo.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.3.Historia-tiempo de los parámetros de interés

7.3.1.Discusión de requerimiento de FEMA 450 y NEC-11

El NEC-11 hace referencia al FEMA 450 para el diseño sísmico de edificios con sistemas de aislamiento sísmico, por esta razón se mencionará a ambos códigos en cuanto al diseño sísmico se refiere.

El diseño sísmico de edificios con sistemas de aislamiento sísmico utilizará como requerimientos mínimos a las especificaciones del Capítulo 13 del BSSC (FEMA, 2004)

Primero se quiere aclarar conceptos generales como:

$S_a \rightarrow$ *Aceleración del espectro elástico con $R = 1$*

$V = \frac{S_a \times I}{R} \times W \rightarrow$ *Cortante Basal sin aislamiento*

$C_s = \frac{S_a \times I}{R} \rightarrow$ *Aceleración del espectro inelástico o elástico reducido*

$I \rightarrow$ *Factor de importancia = 1 para todos los casos expuestos*

7.3.1.1. Criterio FEMA 450 (ASCE 7-10)

Los historia-tiempo fueron elaborados a partir de 7 registros de sismos apropiadamente seleccionados y escalados.

Cada par de componentes horizontales debe ser escalada de tal manera que para cada período entre $0.5T_d$ y $1.25T_m$ (...) el promedio de los espectros SRSS de todos los pares de componentes horizontales no sea inferior a 1.3 veces la ordenada correspondiente del espectro de respuesta de diseño, (...) por más del 10 por ciento. (FEMA, 2004)

El FEMA 450 propone utilizar el valor promedio de los parámetros de interés multiplicado por 1.3, lo cual equivale aproximadamente a la media de los parámetros de respuesta más 3 desviaciones estándar o por decirlo de otra manera, al sexto parámetro de respuesta más alto de los 7 existentes.

El FEMA 450 propone un valor mínimo del cortante de diseño para la estructura sobre el sistema de aislamiento.

Donde el procedimiento historia-tiempo es utilizado y la estructura tiene una configuración regular, la fuerza lateral de diseño en la estructura que está sobre el sistema de aislamiento no debe ser tomada menor que el 60% de V_s , como está determinada en la Sec. 13.3.3.2. (FEMA, 2004).

$$V_{\text{diseño, sin aislador}} = \left(\frac{S_{a, \text{sin aislador}}}{R = 6} \right) \times W$$

$$V_{\text{diseño, con aislador}} = 0,6 V_{s \text{ FEMA 450}}$$

$$V_{\text{diseño, con aislador}} = 0,6 \left(\frac{K_{D\text{máx}} \times D_D}{R_{\text{equiv FEMA-450}}} \right)$$

Haciendo:

$$V_{\text{diseño, sin aislador}} = V_{\text{diseño, con aislador}}$$

Para justificar el uso de la misma superestructura.

$$0,6 \left(\frac{K_{D\text{máx}} \times D_D}{R_{\text{equiv FEMA-450}}} \right) = \left(\frac{S_{a, \text{sin aislador}}}{R = 6} \right) \times W$$

$$R_{\text{equiv FEMA-450}} = 6 \times \left(\frac{0,6 \times K_{D\text{máx}} \times D_D}{S_{a, \text{sin aislador}} \times W} \right)$$

$$\text{Condición} \rightarrow 1 \leq R_{\text{equiv FEMA-450}} \leq 2$$

En donde:

Dd: Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislamiento en la dirección considerada.

Kdmax: Rigidez efectiva máxima del sistema de aislamiento al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal bajo consideración.

En el caso en el que el cortante de diseño determinado mediante el análisis historia-tiempo es menor al cortante mínimo determinado anteriormente, todos los parámetros de respuesta pueden ser ajustados proporcionalmente para arriba.

13.4.3.3. Escalado de los resultados. Donde la fuerza lateral de diseño sobre los elementos estructurales, determinada utilizando el espectro de respuesta o el procedimiento historia-tiempo, es menor al nivel mínimo requerido por la Sec.13.4.3.1 y 13.4.3.2, todos los parámetros de respuesta, incluyendo los momentos y fuerzas internas de los elementos estructurales, deben ser ajustados proporcionalmente para arriba (FEMA, 2004).

7.3.1.2.Criterio NEC-11

Los historia-tiempo fueron elaborados a partir de 7 registros de sismos apropiadamente seleccionados y escalados.

Si se realizan 7 o más análisis paso a paso en el tiempo, se utilizará para el diseño el valor promedio de los parámetros de respuesta de interés. (NEC-11 2.7.7.1.Registros de aceleración, cap.2, pág.63)

El NEC-11 propone utilizar para el diseño el valor promedio de los parámetros de respuesta de interés.

El NEC-11 propone un valor mínimo del cortante de diseño para la estructura sobre el sistema de aislamiento.

El cortante basal mínimo será calculado conforme lo estipula la sección 2.7.2 del método de cálculo estático de fuerzas sísmicas (NEC-11 2.10.4.Requisitos de diseño generales, cap.2, pág.76).

El NEC-11 limita el valor del cortante, al cortante basal calculado para el método estático de fuerzas sísmicas para una estructura del periodo T de la estructura aislada. Se deberá entender que NEC-11 se refiere al cortante estático correspondiente a una estructura hipotética sin aislamiento con un periodo T igual al periodo fundamental de la estructura aislada que es analizada. En este caso, por consistencia con FEMA 450, se adoptó un criterio que no está en NEC-11, el cual permite reducir el valor del cortante basal mínimo propuesto por el NEC-11 al 60%.

$$V_{\text{diseño,sin aislador}} = \left(\frac{S_{a,\text{sin aislador}}}{R = 6} \right) \times W$$

$$V_{\text{diseño,con aislador}} = 0,6V_{s\text{ NEC-11}}$$

$$V_{\text{diseño,con aislador}} = 0,6 \left(\frac{S_{a,\text{con aislador}}}{R_{\text{equiv NEC-11}}} \right) \times W$$

Haciendo:

$$V_{\text{diseño,sin aislador}} = V_{\text{diseño,con aislador}}$$

Para justificar el uso de la misma estructura.

$$R_{equiv\ NEC-11} = 6 \times \left(\frac{S_{a,conaislador} \times 0,6}{S_{a,sin aislador}} \right)$$

$$R_{equiv\ NEC-11} = 3,6 \times \left(\frac{S_{a,conaislador}}{S_{a,sin aislador}} \right)$$

7.3.1.3. Criterios adoptados

En este trabajo se utilizó el método propuesto por el FEMA 450 para el procesamiento de los resultados de los análisis historia-tiempo de siete sismos, ya que se considera que NEC-11 no proporciona un procedimiento consistente con el concepto de sismo de diseño (siendo el factor de carga del sismo igual a uno). El sismo de diseño debe ser último y corresponde a un valor estadístico seguro equivalente a 95% de confianza (5% error), definido por el valor promedio más tres desviaciones estándar.

	SIN AISLADOR	LRB (Δ=300mm)	LRB (Δ=350mm)	LRB (Δ=400mm)
PERÍODO T (seg)	1,130	2,480	2,660	2,830
Sa: Aceleración espectro elástico	0,828	0,370	0,340	0,300
0,6 Sa,conaislador	-	0,222	0,204	0,180
Vs diseño,con aislador NEC-11	-	581,993	581,993	581,993
Requivalente NEC-11	6,000	1,609	1,478	1,304

Tabla 45: Resumen R equivalentes NEC-11 edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

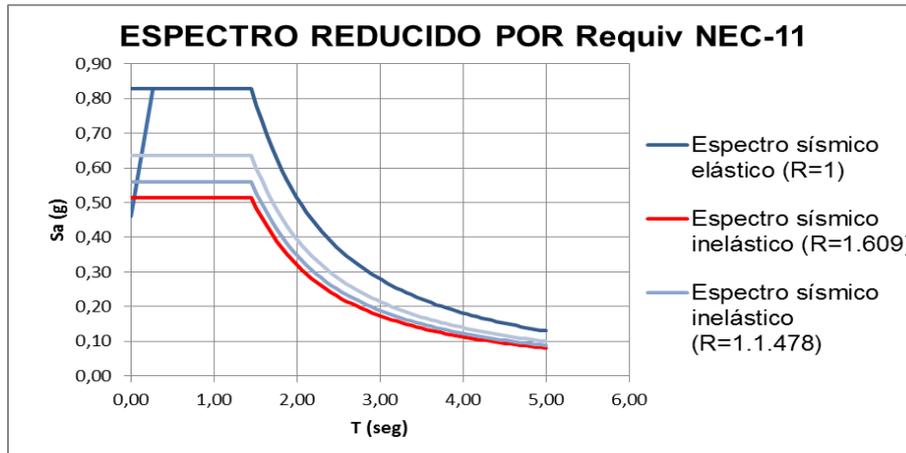


Ilustración 81: Espectro reducido por R equivalente NEC-11 edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

	SIN AISLADOR	LRB ($\Delta=300\text{mm}$)	LRB ($\Delta=350\text{mm}$)	LRB ($\Delta=400\text{mm}$)
PERÍODO T (seg)	1,130	2,480	2,660	2,830
Sa: Aceleración espectro elástico	0,828	0,370	0,340	0,300
0,6 Kdmáx x Dd	-	616,590	565,820	523,802
Vs diseño, con aislador FEMA 450	-	581,993	565,820	523,802
Requivalente FEMA 450	6,000	1,059	0,972	0,900

Tabla 46: Resumen R equivalentes FEMA 450 edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

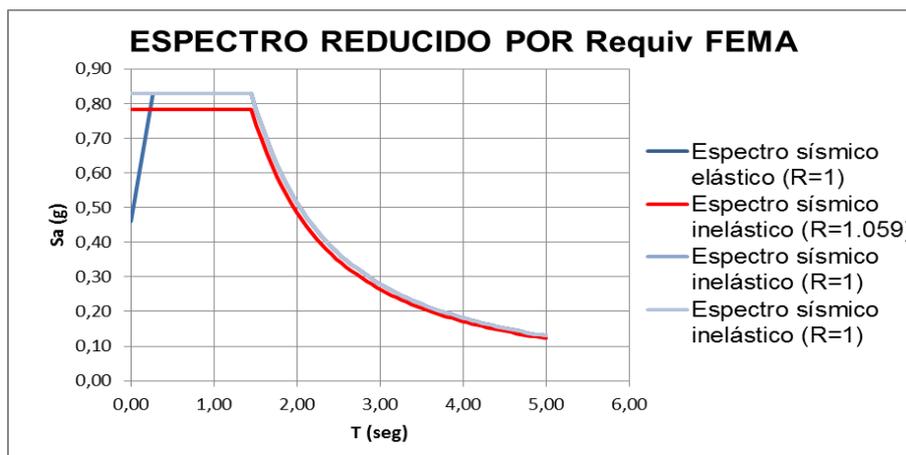


Ilustración 82: Espectro reducido por R equivalente FEMA450 edificio A

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

	SIN AISLADOR	LRB ($\Delta=300\text{mm}$)	LRB ($\Delta=350\text{mm}$)	LRB ($\Delta=400\text{mm}$)
PERÍODO T (seg)	1,030	2,090	2,250	2,380
Sa: Aceleración espectro elástico	0,828	0,480	0,430	0,390
0,6 Sa, con aislador	-	0,288	0,258	0,234
Vs diseño, con aislador NEC-11	-	104,891	104,891	104,891
Requivalente NEC-11	6,000	2,087	1,870	1,696

Tabla 47: Resumen R equivalentes NEC-11 edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

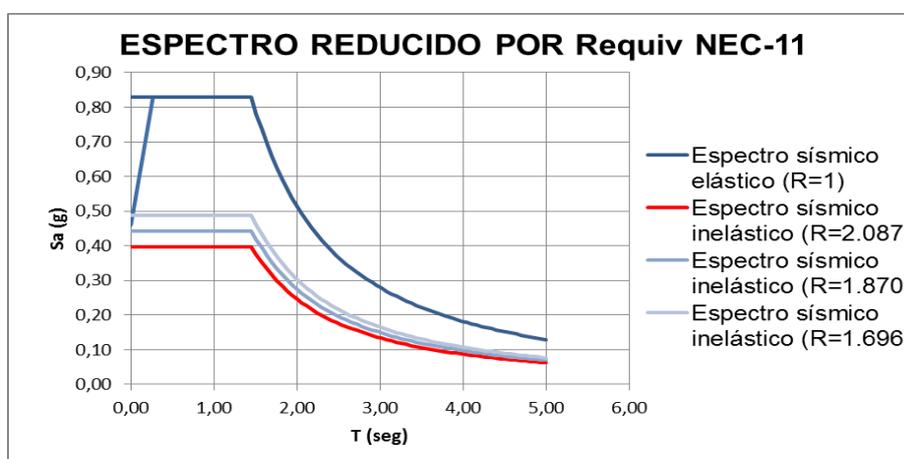


Ilustración 83: Espectro reducido por R equivalente NEC-11 edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

	SIN AISLADOR	LRB ($\Delta=300\text{mm}$)	LRB ($\Delta=350\text{mm}$)	LRB ($\Delta=400\text{mm}$)
PERÍODO T (seg)	1,030	2,090	2,250	2,380
Sa: Aceleración espectro elástico	0,828	0,480	0,430	0,390
0,6 Kdmáx x Dd	-	129,908	119,652	110,128
Vs diseño, con aislador FEMA 450	-	104,891	104,891	104,891
Requivalente FEMA 450	6,000	1,239	1,141	1,050

Tabla 48: Resumen R equivalentes FEMA 450 edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

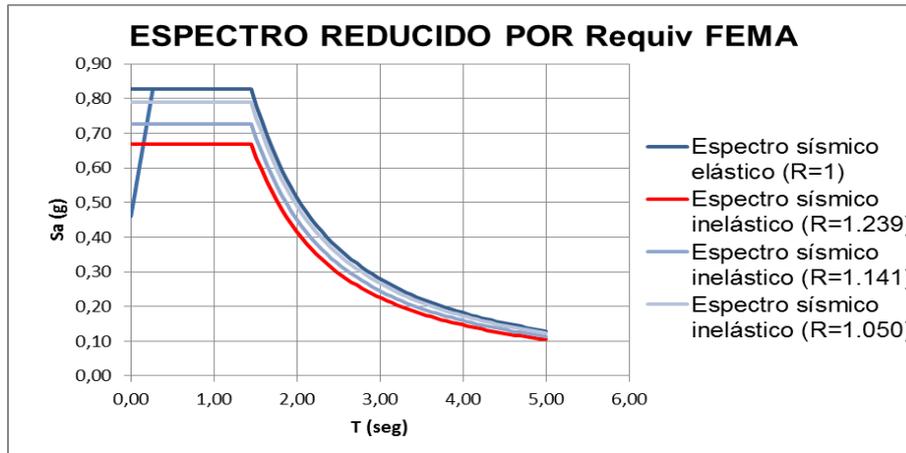


Ilustración 84: Espectro reducido por R equivalente FEMA450 edificio B

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En las tablas 45-48 se pueden ver las aceleraciones del espectro elástico S_a y cortantes de diseño según NEC-11 y FEMA 450, así como el R equivalente, el cual es el valor requerido para justificar el uso de la misma estructura diseñada en el capítulo IV. En dichas tablas también se puede apreciar que el cortante de diseño de NEC-11 gobierna, por lo cual se usará el cortante de diseño de NEC-11 (aislador LRB500 con desplazamiento de diseño de 300mm) para el análisis de los Historia-tiempo de cortante de diseño. En este caso se utilizó el valor mínimo de diseño del cortante basal de NEC-11.

7.3.2. Historia-tiempo del corte de diseño para el edificio A

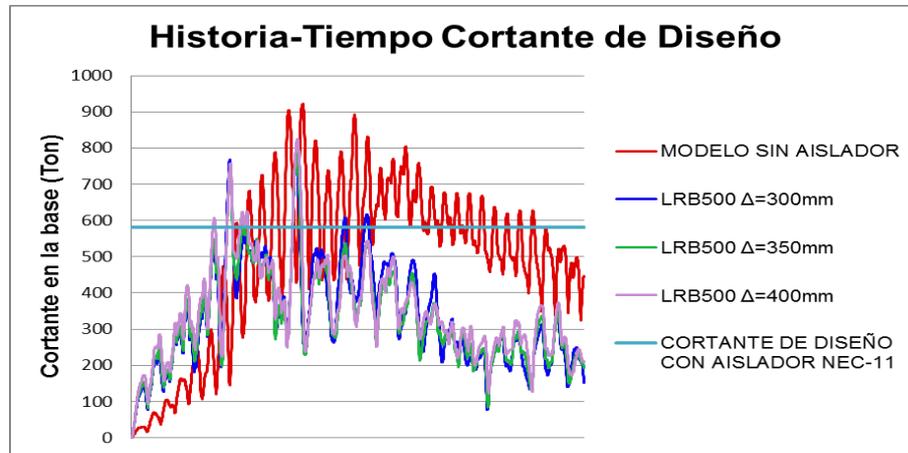


Ilustración 85: Historia-tiempo cortante de diseño

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Los valores en la gráfica son los cortantes de diseño en el tiempo de la estructura A. Se consideró un $R=6$ para la estructura sin aisladores y Reequivalente de NEC-11 para la estructura aislada y el cortante de diseño. En la ilustración 81 se puede apreciar que los valores de cortante de la estructura aislada son mayores al cortante de diseño propuesto por el NEC-11. También se puede apreciar que los cortantes de la estructura aislada son menores a los cortantes de la estructura sin aisladores. En este caso la estructura sobre el sistema de aislamiento va a ser de dimensiones menores a la estructura sin aisladores.

Si se considera al R equivalente de las tablas 45-48 para reducir los cortantes de las estructuras aisladas, los valores de cortante diseño de la estructura sin aisladores serían los mismos que los valores de cortante de las estructuras aisladas.

7.3.3. Historia-tiempo del corte de diseño para el edificio B

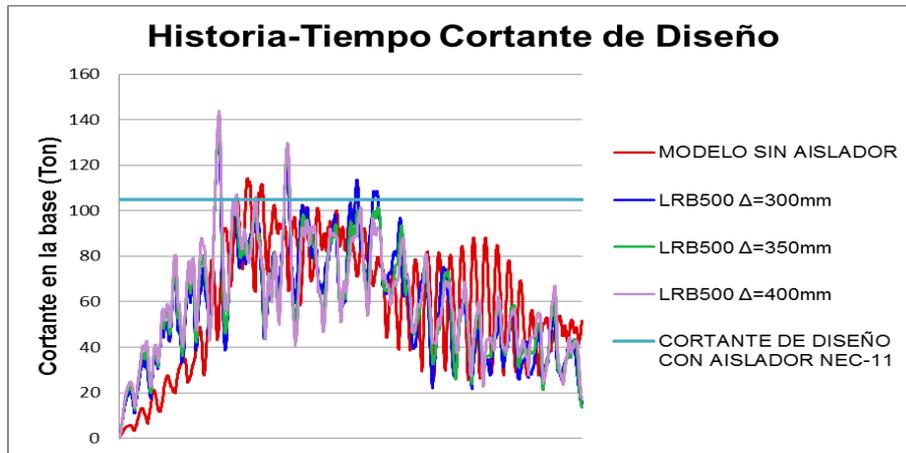


Ilustración 86: Historia-tiempo cortante de diseño

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Los valores en la gráfica son los cortantes de diseño en el tiempo de la estructura B. Se consideró un $R=6$ para la estructura sin aisladores y Reequivalente de NEC-11 para la estructura aislada y el cortante mínimo. En la ilustración 82 se puede apreciar que los valores de cortante de la estructura aislada son mayores que el cortante de diseño. Los cortantes de la estructura aislada son mayores a los cortantes de la estructura sin aisladores. En este caso la estructura sobre el sistema de aislamiento va a ser de dimensiones mayores a la estructura sin aisladores.

7.3.4. Historia-tiempo desplazamiento de control edificio A

Los valores de los desplazamiento mostrados en las ilustraciones 87 y 88 son totales o absolutos, y corresponden al cortante elástico de diseño ($R=1$).

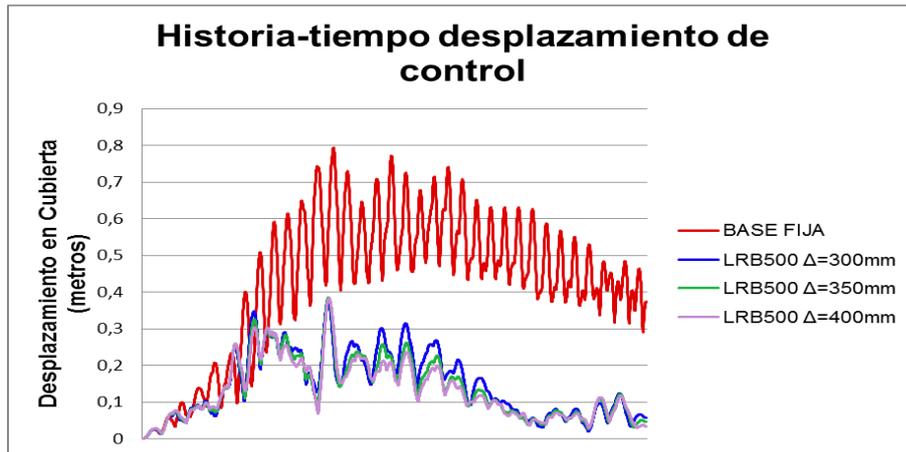


Ilustración 87: Historia-tiempo desplazamiento de control

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

7.3.5. Historia-tiempo desplazamiento de control edificio B

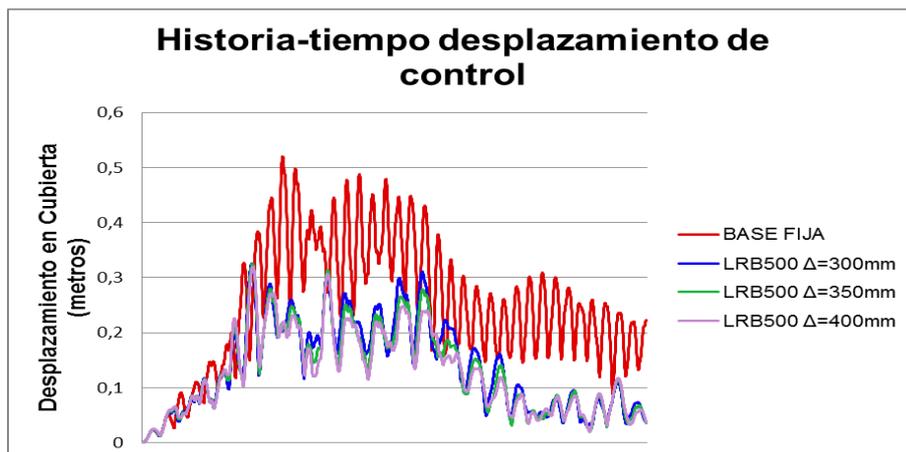


Ilustración 88: Historia-tiempo desplazamiento de control

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE COSTOS

8.1. Análisis contable

En la siguiente tabla se puede encontrar el costo de la inversión inicial requerida para las estructuras de los edificios A y B, con y sin aisladores. El costo de las estructuras sin aisladores es el calculado en el capítulo IV. El costo de inversión inicial por aislador se consideró de 1000 dólares, más el costo incrementado de cimentación.

INCREMENTO DE COSTOS EN INVERSIÓN INICIAL		
	EDIFICIO A	EDIFICIO B
SIN AISLADORES	\$ 512.446,61	\$ 100.792,91
CON AISLADORES	\$ 574.938,67	\$ 114.892,91
INCREMENTO	12,19%	13,99%

Tabla 49: Resumen de incremento de costos de inversión inicial para los edificios A y B, con y sin aisladores.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En la tabla 49 se puede apreciar que el incremento en costos de inversión inicial para una estructura con aisladores en su base en relación a una estructura sin aisladores es de aproximadamente 13%. Se consideró un costo extra por vigas a nivel de planta baja para los edificios con aisladores.

8.2. Análisis financiero

El fin del análisis financiero es el de averiguar si la inversión hecha en aisladores para una estructura determinada, tanto costo de los aisladores como mantenimiento, es recuperada a largo plazo en forma de ahorro en daños a la estructura por la ocurrencia del sismo de diseño o el sismo ocasional. La probabilidad de que una estructura experimente un sismo de diseño u ocasional son muy elevadas, por lo cual el asumir que una estructura va a experimentar un sismo de este tipo durante toda su vida no es errada.

8.2.1. Estimación de daños usando funciones de vulnerabilidad

8.2.1.1. Estimación de daños edificio A

PROYECTO RADIUS DE GUAYAQUIL – ECUADOR
VOLUMEN I: REPORTE FINAL A LA SECRETARÍA DEL IDNDR DE LAS NACIONES UNIDAS

Tabla I.5. Funciones de Vulnerabilidad de las edificaciones de Guayaquil

Tipo de Edificio	% promedio de daño para la intensidad sísmica especificada			
	I = VI	I = VII	I = VIII	I = IX
A	0.5	2.5	7.5	15
B	1.5	6	18	40
C	5	15	36	75
D	7.5	20	45	90
E	0.05	1	4.1	8
F	0.05	1.4	6	16
G	0.2	2.5	7	16
H	0.2	3.5	13	33
I	1.5	7	22	52
J	0.6	2.5	7	17
K	0.4	2	7	21
L	1.8	5.5	18	42

Ilustración 89: Funciones de vulnerabilidad de las edificaciones de Guayaquil

Fuente: (Argudo, Villacrés, & Mera, 1999)

El tipo de edificio del edificio A es el tipo I que corresponde a “Edificios de hormigón de 7 a 13 pisos, de uso comercial” Los valores de % de daño deben ser interpolados de la Ilustración 87.

Se considera que una estructura sin aislamiento se comporta con un $R=6$ equivalente a daños por intensidad VIII para el sismo de diseño, y con un $R=3$ equivalente a daños por intensidad VII para el sismo ocasional.

Por otro lado se considera que una estructura aislada se comporta con un R equivalente para el sismo de diseño (hay que interpolar entre intensidades),

y completamente elástica con $R=1$ para el sismo ocasional, con daños por intensidad VI.

El R equivalente se lo calculó en el capítulo anterior, se decidió usar el $R=1.609$ del NEC-11 para el aislador LRB500 con desplazamiento de diseño de 300mm.

ESTRUCTURA	SISMO	Requivalente	INTENSIDAD	% DAÑO
SIN AISLADORES	DISEÑO	6	VIII	22
SIN AISLADORES	OCASIONAL	3	VII	7
CON AISLADORES	DISEÑO	1,609	ENTRE VI & VII	3,2
CON AISLADORES	OCASIONAL	1	VI	1,5

Tabla 50: Estimación de daños en base al R equivalente.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

8.2.1.2. Estimación de daños edificio B

El tipo de edificio del edificio B, al igual que el edificio A, es el tipo I que corresponde a “Edificios de hormigón de 7 a 13 pisos, de uso comercial” Los valores de % de daño deben ser interpolados de la Ilustración 87.

Se considera que una estructura sin aislamiento se comporta con un $R=6$ equivalente a daños por intensidad VIII para el sismo de diseño, y con un $R=3$ equivalente a daños por intensidad VII para el sismo ocasional.

Por otro lado se considera que una estructura aislada se comporta con un R equivalente para el sismo de diseño (hay que interpolar entre intensidades), y completamente elástica con $R=1$ para el sismo ocasional, con daños por intensidad VI.

El R equivalente se lo calculó en el capítulo anterior, se decidió usar el $R=2.087$ del NEC-11 para el aislador LRB500 con desplazamiento de diseño de 300mm.

ESTRUCTURA	SISMO	Requivalente	INTENSIDAD	% DAÑO
SIN AISLADORES	DISEÑO	6	VIII	22
SIN AISLADORES	OCASIONAL	3	VII	7
CON AISLADORES	DISEÑO	2,087	ENTRE VI & VII	4,5
CON AISLADORES	OCASIONAL	1	VI	1,5

Tabla 51: Estimación de daños en base al R equivalente.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

8.2.2.Cálculo de valor actual neto (VAN) de daños e inversión

Para el cálculo del VAN se considera que a los 25 años de vida de las estructuras ocurre el sismo de diseño o el sismo ocasional. Se realizó un flujo de caja a 50 años para comparar el VAN de la inversión con el VAN de los daños que ocurren a los 25 años de vida de las estructuras. Se considera una tasa de inflación de 3.5% y un precio de venta en el mercado inmobiliario por metro cuadrado de 1500 dólares, que corresponde a un edificio de lujo. También se considera que los aisladores tienen un costo de 1000 dólares cada uno, que el costo anual de mantenimiento por aislador es de 100 dólares y se considera un costo por vigas adicionales en planta baja, a nivel de los aisladores.

El sismo de diseño tiene una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años lo que equivale aproximadamente a un periodo de retorno de 475 años. El sismo ocasional tiene una probabilidad de ocurrencia del 39% en 50 años lo que equivale aproximadamente a un periodo de retorno de 100 años.

8.2.2.1.VAN de daños e inversión edificio A

EDIFICIO A	SISMO	% DAÑO	VAN DE DAÑOS	VAN DE INVERSION	VAN TOTAL	% INVERSION RECUPERADA
SIN AISLADORES	DISEÑO	22	\$ 1.394.928,00	\$ 0,00	\$ 1.394.928,00	0
SIN AISLADORES	OCASIONAL	7	\$ 443.841,00	\$ 0,00	\$ 443.841,00	0
CON AISLADORES	DISEÑO	3,2	\$ 202.899,00	\$ 234.292,00	\$ 437.191,00	319%
CON AISLADORES	OCASIONAL	1,5	\$ 95.109,00	\$ 234.292,00	\$ 329.401,00	135%

Tabla 52: Porcentaje de inversión recuperada, utilizando el concepto de valor actual neto (VAN) para el edificio A.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

En la tabla 52 se pueden ver los valores actuales netos de los daños causados por los eventos sísmicos de diseño y ocasional en el edificio A con y sin aisladores. También se pueden ver los valores actuales netos de la inversión en los aisladores sísmicos, las vigas adicionales a nivel de los aisladores y el mantenimiento de los aisladores durante los 50 años. Finalmente se llega a un porcentaje de inversión recuperada, que es la relación entre el valor de daños sufridos por el edificio sin aisladores y el valor total pagado por los aisladores (VAN de inversión + VAN de daños).

Según los resultados obtenidos, en el caso que ocurra el sismo de diseño durante la vida del edificio A, no solo se recuperaría la inversión total en los aisladores, sino que se tendría una ganancia importante. En el caso de que ocurra un sismo ocasional durante la vida del edificio A, se recuperaría aproximadamente la inversión en los aisladores.

8.2.2.2.VAN de daños e inversión edificio B

EDIFICIO B	SISMO	% DAÑO	VAN DE DAÑOS	VAN DE INVERSION	VAN TOTAL	% INVERSIÓN RECUPERADA
SIN AISLADORES	DISEÑO	22	\$ 223.188,00	0	\$ 223.188,00	0
SIN AISLADORES	OCASIONAL	7	\$ 71.014,00	0	\$ 71.014,00	0
CON AISLADORES	DISEÑO	4,5	\$ 45.652,00	\$ 57.101,00	\$ 102.753,00	217%
CON AISLADORES	OCASIONAL	1,5	\$ 15.217,00	\$ 57.101,00	\$ 72.318,00	98%

Tabla 53: Porcentaje de inversión recuperada, utilizando el concepto de valor actual neto (VAN) para el edificio B.

Fuente: Elaborado por Game, D.(2013)

Al igual que en la sección 8.2.2.1. en la tabla 53 se llega a un porcentaje de inversión recuperada, que es la relación entre el valor de daños sufridos por el edificio sin aisladores y el valor total pagado por los aisladores (VAN de inversión + VAN de daños), para el edificio B.

Según los resultados obtenidos, en el caso que ocurra el sismo de diseño durante la vida del edificio B, no solo se recuperaría la inversión total en los aisladores, sino que se tendría una ganancia importante. En el caso de que ocurra un sismo ocasional durante la vida del edificio B, se recuperaría aproximadamente la inversión en los aisladores.

En el análisis financiero de los edificios A y B a 50 años se dio a conocer, basándose en el método de estimación de daños utilizado funciones de vulnerabilidad (Proyecto Radius de Guayaquil-Ecuador), que la inversión en los aisladores se recupera en su mayor parte por sí sola, con la ocurrencia tanto del sismo de diseño como del sismo ocasional.

CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

En el alcance de esta investigación se propone cuantificar la economía en los costos de construcción resultante de utilizar aisladores sísmicos. En el desarrollo del trabajo se pudo conocer que los beneficios económicos por el uso de aisladores se ven limitados por los códigos de diseño, ya que estos ponen límites al valor de corte mínimo y la ductilidad ($R=2$) FEMA 450.

El análisis financiero a 50 años, demostró que la inversión en los aisladores (tanto el costo de compra de los dispositivos como su mantenimiento), se recuperaría en el tiempo por los beneficios que los aisladores le brindan a la estructura mediante el ahorro de las reparaciones a daños probables. En tal contexto los principales beneficios que se obtienen del uso de aisladores sobre estructuras son:

- a) Reducir el nivel de daño esperado como consecuencia del uso de $R \leq 2$ con lo cual la economía es de valor financiero, mas no de la inversión inicial.
- b) Mejorar el desempeño sísmico permitiendo que una estructura aislada pueda operar inmediatamente después de un sismo.

Otro punto a considerar a favor de los aisladores es el que disminuyen los desplazamientos de la estructura, concentrando la mayor parte de los desplazamientos a nivel de los aisladores. Esto puede ser considerado un beneficio ya que brinda una mayor comodidad (menor percepción del movimiento) para los ocupantes de la estructura en el caso de un movimiento sísmico.

A lo largo del trabajo se pudo ver también de forma notoria como los aisladores beneficiaron más a la estructura con más vanos (Edificio A) que a la estructura con menos vanos (Edificio B), tanto en el ámbito económico como en su desempeño.

En conclusión, los aisladores sísmicos si brindan beneficios al ser aplicados a estructuras sobre suelos blandos como el de Guayaquil, a pesar de que muchas veces estos beneficios se ven limitados debido a que hay una meseta “Sa” (máxima aceleración del espectro), extendida a $T \leq 1.5$ segundos que hace que solo los edificios muy flexibles (7 o más pisos), puedan aprovechar dichos beneficios.

9.2.Recomendaciones

La primera recomendación, en base a las conclusiones, es la de utilizar aisladores sísmicos para estructuras esenciales, ya que se logra un desempeño consistente con la filosofía de preservar función y operación en estructuras esenciales, usando $R \leq 2$ en el diseño. Las estructuras aisladas se diseñan para comportarse de forma casi elástica, por lo cual sufren daños leves ante eventos sísmicos y pueden operar inmediatamente después de un sismo.

Otra recomendación es la de utilizar aisladores sísmicos para estructuras redundantes (con más vanos), ya que a pesar de una inversión inicial más grande por los costos de los aisladores, la inversión se recupera más rápidamente.

También, se recomienda el uso de aisladores sísmicos para edificios de más de siete pisos, ya que se espera mayor eficiencia de los aisladores en edificios más altos.

Finalmente, se recomienda su uso en edificaciones históricas sin diseño sísmico, para asegurar su protección en caso de terremoto, evitando de esta forma pérdidas irreparables al patrimonio histórico del país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argudo, J. F. (2011). *Tareas pruebas y exámenes*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Jaime Argudo: <http://jaimeargudo.com/ing-sismica-ucsg/tareas-y-examenes/>
- Argudo, J., Villacrés, A., & Mera, W. (1999). *Volumen I y III: Proyecto Radius*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil-Instituto de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería (IIFIUC), M.I. Municipalidad de Guayaquil, Naciones Unidas, GeoHazards International, Guayaquil, Ecuador.
- Arriagada, J. A. (2005). *Aislación sísmica de un edificio de oficinas de siete pisos (análisis comparativo de comportamiento y costos con un edificio tradicional)*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Calvi, G. M., Kawashima, K., Billings, I., Elnashai, A., Nutti, C., Pecker, A., y otros. (2007). *Seismic bridge design and retrofit-structural solutions*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete.
- Cámara de la Construcción de Guayaquil. (2013). *Precios unitarios promedio - Referenciales*. Guayaquil, Ecuador: Cámara de la Construcción de Guayaquil.
- Cando, F. A., Monroy, C. M., Ortega, J. C., & Puerres, O. A. (2012). *Aislación sísmica de un edificio (análisis comparativo de comportamiento y costos con un edificio tradicional)*. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Earthquake Protection Systems. (2011). *Friction Pendulum Bearings*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Earthquake Protection Systems: <http://www.earthquakeprotection.com/pdf/EPSPProductBrochure4PageVersionE.pdf>

- Earthquake Protection Systems. (2011). *Single Pendulum Bearing*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Earthquake Protection Systems:
http://www.earthquakeprotection.com/single_pendulum_bearing.html
- FEMA. (2004). *NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures - FEMA 450*.
- FIP-Group. (s.f.). *Lead Rubber Bearings*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de FIP Industriale: http://www.fip-group.it/fip_ind_eng/prodotti.html
- Guerrero, J. R. (2011). *Reducción de la demanda sísmica en estructuras aporricadas empleando aisladores de base*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Maurer Söhne Group. (2005). *Apoyos con núcleo de plomo*. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de Maurer Söhne: http://www.maurer-soehne.es/sistemas_de_proteccion_estructural/dispositivos_sismicos/aisladores/apoyos_con_nucleo_de_plomo/
- NEC-11. (2011). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito, Ecuador.
- Villareal, G. (10 de Enero de 2012). *Curso SAP2000 - Tema: Análisis sísmico dinámico Tiempo-Historia de edificio aporricado*. Recuperado el 12 de Agosto de 2013, de YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=-ECQ7jIRrak>
- Villareal, G. (10 de Enero de 2012). *Curso SAP2000 - Tema: Análisis Tiempo-Historia de edificio aporricado con disipadores de energía*. Recuperado el 12 de Agosto de 2013, de YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=-016O4dqrew>