

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS PROFESIONAL

**“ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE
ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN PARA
EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR LA BACHILLER:
YAZMIN ISABEL ROMERO URRUNAGA**

ASESOR:

Dr. Ing. ROBERTO MOSQUEIRA RAMÍREZ

CAJAMARCA - PERÚ

2014

DEDICATORIA

A Dios que siempre ilumina mis pasos.

*A mis padres, verdaderos ángeles en la tierra, pues
siempre me han guiado, protegido, brindado su
confianza, tiempo y amor incondicional*

A mi hermana, por ser una amiga única y especial

Yazmin

AGRADECIMIENTO

A mi familia, que siempre depositó su confianza en mí para así lograr cada meta trazada.

A mi asesor por brindarme la información necesaria para la realización de dicha tesis.

A mis amigos más cercanos por su apoyo y tiempo.

Yazmin

CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO.....	II
CONTENIDO	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS.....	XI
RESUMEN	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. EL CONTEXTO Y EL PROBLEMA	2
1.1.1. PREGUNTA PRINCIPAL	2
1.1.2. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	2
1.1.2.1. Hipótesis.....	2
1.1.2.2. Variables.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.4. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.5. OBJETIVOS	6
1.5.1. Objetivo General	6
1.5.2. Objetivos Específicos	6
1.6. DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS.....	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.1.1. Internacionales.....	8
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	10
2.1.3. Antecedentes Locales	11
2.2. BASES TEÓRICAS.....	12

2.2.1.	PISO BLANDO.....	12
2.2.1.1.	Descripción del Problema.....	12
2.2.1.2.	Concepto según la norma NTE-E.030,2003.....	12
2.2.1.3.	Normas de otros países con respecto a Irregularidad de Rigidez-Piso Blando 14	
2.2.1.4.	Causas Principales que generan piso blando.....	17
2.2.1.5.	Comportamiento de Piso Blando ante los sismos.....	18
2.2.2.	AISLAMIENTO SÍSMICO. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS	20
2.2.2.1.	Clasificación de los sistemas de control de respuesta sísmica.....	20
2.2.2.2.	Concepto y componentes de un sistema de aislación sísmica.	23
A)	Concepto.....	23
B)	Componentes de un Sistema de Aislamiento	23
2.2.2.3.	Aisladores Elastoméricos.....	24
2.2.2.4.	Teoría Lineal de la Aislación sísmica.....	27
A)	Ecuaciones de Movimiento de Sistemas con un grado de Libertad.....	29
B)	Ecuaciones de Movimiento de Sistemas con Múltiples Grados de Libertad...32	
2.2.2.5.	Modelos que representan el Comportamiento Dinámico de la Aislación sísmica 38	
A)	Modelo Lineal	38
B)	Modelo No Lineal.....	39
2.2.2.6.	Pandeo Crítico de Aisladores Elastoméricos.....	49
2.3.	ECUACIONES DE MOVIMIENTO PARA ESTRUCTURAS CON AISLADORES EN PISOS INTERMEDIOS.....	50
2.4.	PROPUESTA PLANTEADA EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.....	55
2.5.	EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES CON IRREGULARIDAD DE PISO BLANDO	56
2.6.	GLOSARIO DE TÉRMINOS	58
CAPITULO III: REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS AISLADOS Y SUS DISPOSITIVOS		61

3.1. NORMAS TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA AISLADO	61
3.2. ASPECTOS A TOMAR EN CUENTA SEGÚN NORMA ASCE 7 – 10	65
3.2.1. Movimiento del suelo para sistemas aislados	65
3.2.2. Selección del procedimiento de Análisis	68
3.2.2.1. Procedimiento de la Fuerza Lateral Equivalente	68
A. Desplazamientos Mínimos Laterales:	69
B. Fuerzas Mínimas Laterales:	73
C. Distribución Vertical de la Fuerza:	76
D. Límite de Deriva:	76
3.2.2.2. Procedimiento del Análisis Dinámico	77
A. Requisitos para realizar un Análisis Dinámico	77
B. Procedimiento de la Respuesta Espectral	78
C. Procedimiento de la Respuesta en la Historia	79
3.3. RECOMENDACIONES PARA LA UTILIZACIÓN DE AISLADORES	81
A. Nivel de Desempeño de la edificación	81
B. Esbeltez de la Edificación	87
C. Espacio para desplazamiento	87
D. Periodo de la Estructura	88
E. Recomendaciones para la colocación de aisladores en escaleras, ascensores e instalaciones	88
3.4. SÍNTESIS DEL PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA ANALIZAR LAS PROPUESTAS PLANTEADAS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN	90
CAPITULO IV: ANÁLISIS DINÁMICO DE LA EDIFICACIÓN. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS	92
4.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO TRADICIONAL	92
4.1.1. Metrado de Cargas por Sismo	94
4.1.2. Análisis Tiempo- Historia	95
4.1.2.1. Masas asociadas a los niveles y ubicación de los centros de masas	95

4.1.2.2.	Registro sísmico	95
4.2.	MODELAMIENTO DEL EDIFICIO CONVENCIONAL.....	97
4.2.1.	Evaluación Estructural de la Edificación con Irregularidad por Piso Blando.....	97
4.2.2.	Modelo del Edificio Convencional	99
4.2.3.	Calificación de falla por piso blando. Cálculos y Resultados	100
4.2.3.1.	Cálculo según la norma E-030	100
4.2.3.2.	Cálculo según otras normas	101
4.3.	MODELAMIENTO DEL EDIFICIO AISLADO.....	110
4.3.1.	Evaluación de las Condiciones de la Edificación para el uso de Aisladores.	110
4.3.2.	Refuerzo de la Edificación con Placas	113
4.3.3.	Diseño de Muros de Corte y de los Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento	117
A)	Diseño de Muros de Corte	117
B)	Diseño de Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento	119
B.1.	Diseño de Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento según norma ASCE 7-10	121
B.2.	Diseño de Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento según Norma Chilena	128
C)	Diseño de la Subestructura	135
C.1.	Podios para los Aisladores ubicados en Base	135
C.2.	Podios para los Aisladores ubicados en Entrepiso	140
4.3.4.	Modelo de la Estructura Aislada.....	142
4.4.	RESULTADOS. VARIABLES DEPENDIENTES.....	146
4.4.1.	Vibraciones del Comportamiento sísmico. Flexibilización horizontal.....	146
A.	Modos y Periodos de la Estructura Convencional.....	147
B.	Modos y Periodos de la Estructura con Aisladores en la Base.....	148
C.	Modos y Periodos de la Estructura con Aisladores en Entrepiso	149
4.4.1.1.	Desplazamientos y Derivas.....	150

4.4.1.2.	Disipación de Energía.....	159
A.	Balance de Energía.....	159
B.	Curva de Histéresis.....	167
4.4.1.3.	Otras Variables.....	169
A.	Cortante Basal en el Tiempo y en Entrepisos.....	169
4.5.	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	181
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		182
5.1.	CONCLUSIONES.....	182
5.2.	RECOMENDACIONES.....	183
REFERENCIAS.....		184
CAPITULO VI: ANEXOS.....		187
ANEXO A:.....		187
ANEXO B:.....		188
ANEXO C:.....		189
ANEXO D:.....		191
ANEXO E:.....		192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Esquematzación de la hipótesis planteada.....	2
Figura 1. 2: Esquematzación de las variables utilizadas	3
Figura 1. 3: Colapso del Hotel Embassy por falla por piso blando (Pisco).....	4
Figura 1. 4: Colapso de una Edificación en Pisco por problema de piso blando.....	5
Figura 2. 1: Esquema representativo para la interpretación de la norma	13
Figura 2. 2: Esquema adaptado de la ref. (14) que explica la calificación de piso blando	17
Figura 2. 3: Gráficas que representan las Causas Principales de la Falla por Piso Blando	18
Figura 2. 4: Piso Blando o Problema de $P- \Delta$ (Adaptado de la ref. 15).....	19
Figura 2. 5: Idealizaciones de los sistemas de control de respuesta sísmica	21
Figura 2. 6: Comportamiento de un edificio ante una sollicitación sísmica con aisladores sísmicos y sin aisladores sísmicos.....	23
Figura 2. 7: Elementos de un Sistema de Aislamiento (Cheng y colaboradores, 2008).....	24
Figura 2. 8: Aislador Elastomérico de Bajo Amortiguamiento.....	25
Figura 2. 9: Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo.....	25
Figura 2. 10: Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento	26
Figura 2. 11: Parámetros del Sistema de Aislación de Dos Grados de Libertad (Adaptado de la ref. 17).....	27
Figura 2. 12: Sistema idealizado de masa rígida con sistema de resorte (Adaptado de la ref.18).	29
Figura 2. 13: Sistema de Múltiples Grados de Libertad (Adaptado de la ref. 18).....	32
Figura 2. 14: Sistema Idealizado para Múltiples Grados de Libertad (Adaptado de la ref. 18).....	32
Figura 2. 15: Modelo Dinámico Lineal (Adaptado de la ref. 19).....	39
Figura 2. 16: Modelo Bilineal de un Aislador (Adaptado de la ref. 18).....	40
Figura 2. 17: Figura de apoyo para la deducción de fórmulas	41
Figura 2. 18: Ilustración de los términos ED y ESO para la deducción del amortiguamiento viscoso equivalente (Adaptado a la ref. 32).....	43
Figura 2. 19: Derivación de la Energía Disipada por Amortiguamiento (Adaptado de ref.32).....	44
Figura 2. 20: Esquema representativo para deducir la fórmula de rigidez	48
Figura 2. 21: Idealización de sistema de Aislación en entrepiso (Adaptado de ref. 20).....	51
Figura 2. 22: Propuesta de solución para la irregularidad de piso blando de una edificación, planteada en la presente investigación.....	56
Figura 3. 1: Respuesta Espectral de Sismo de Diseño y de MCE (Adaptado de la Ref. 12).....	68
Figura 3. 2: Determinación del Desplazamiento Total de Diseño (Adaptado de la Ref. 12).....	72

Figura 3. 3: Determinación de factores de escala para movimientos de suelo (Adaptado de la Ref. 12)	80
Figura 3. 4: Detalle del encuentro de las escaleras con el edificio aislado en el Residencial Universitario de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina (Ref. 29)	89
Figura 3. 5: Paso de la estructura de una escalera por la interfaz de aislación y su solución (Ref. 30).....	89
Figura 3. 6: Figura que muestra las conexiones flexibles en una edificación [Muñoz Peláz, 2013 (31)]	90
Figura 4. 1: Vista de la Planta Típica de la Edificación.....	92
Figura 4. 2: Corte Longitudinal de la Edificación	93
Figura 4. 3: Corte Transversal de la Edificación	93
Figura 4. 4: Acelerograma del Sismo de Lima 1966	96
Figura 4. 5: Acelerograma del Sismo Chimbote 1970.....	96
Figura 4. 6: Acelerograma del Sismo Lima 1974.....	96
Figura 4. 7: Detalle de Aislación de la escalera cuando los Aisladores se ubican en la base del Edificio en estudio.....	98
Figura 4. 8: Detalle de Aislamiento de Escalera cuando los Aisladores se ubican en Entrepiso del Edificio en estudio.....	99
Figura 4. 9: Modelo tridimensional del Edificio Convencional.....	100
Figura 4. 10: Sobreesfuerzo en columnas del primer nivel en la Estructura Convencional	110
Figura 4. 11: Periodo de Edificio utilizando placas	114
Figura 4. 12: Acero requerido para el Diseño de Placas	118
Figura 4. 13: Acero longitudinal requerido para el Diseño de Placas	119
Figura 4. 14: Dimensiones de los Podios Superiores.....	136
Figura 4. 15: Dimensiones de Vigas de Conexión Superiores.....	136
Figura 4. 16: Acero Longitudinal para los Podios Superiores y sus Vigas de Conexión	137
Figura 4. 17: Acero Longitudinal del eje 1A, para Vigas de Conexión y Podios Superiores....	137
Figura 4. 18: Podio Inferior tipo 1 (0.9x0.9 m)	138
Figura 4. 19: Dimensiones de Podios ubicados encima del primer piso	140
Figura 4. 20: Acero Longitudinal para los Podios ubicados encima del primer piso y sus Vigas de Conexión	141
Figura 4. 21: Acero Longitudinal de las Vigas de Conexión y Podios del eje 8A	141
Figura 4. 22: Datos de Entrada para el Modelamiento de la Edificación con Aisladores en la Base en el programa ETABS v.9.7.0.....	142

Figura 4. 23: Datos de Entrada para el Modelamiento de la Edificación con Aisladores en Entrepiso	143
Figura 4. 24: Estructura con Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento ubicado en la Base.....	144
Figura 4. 25: Estructura con Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento ubicado en Entrepiso	145
Figura 4. 26: Desplazamientos en la Dirección "X" debido al Sismo Lima66	152
Figura 4. 27: Desplazamientos en la Dirección "Y" debido al Sismo Lima66	152
Figura 4. 28: Desplazamientos en la Dirección "X" debido al Sismo Chimbote70	152
Figura 4. 29: Desplazamientos en la Dirección "Y" debido al Sismo Chimbote70	153
Figura 4. 30: Desplazamientos en la Dirección "X" debido al Sismo Lima74	153
Figura 4. 31: Desplazamientos en la Dirección "Y" debido al Sismo Lima74	153
Figura 4. 32: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "X" debido al Sismo Lima 66	156
Figura 4. 33: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "Y" debido al Sismo Lima 66	156
Figura 4. 34: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "X" debido al Sismo Chimbote 70.....	157
Figura 4. 36: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "X" debido al Sismo Lima 74	158
Figura 4. 37: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección en "Y" debido al Sismo Lima 74	158
Figura 4. 38: Curva de Histéresis del Aislador en Base debido al Sismo de Lima 74	168
Figura 4. 39: Curva de Histéresis del Aislador en Entrepiso debido al Sismo de Lima 74.....	168
Figura 6. 1: Representación de los pasos 2 y 3 para la colocación de los aisladores	190
Figura 6. 2: Representación del paso 4 para la colocación de los aisladores	191

ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro 2. 1: Normas que explican la irregularidad de Rigidez- Piso Blando.....	14
Cuadro 2. 2: Clasificación de los sistemas de control de respuesta sísmica	22
Cuadro 2. 3: Clasificación de los Aisladores Elastoméricos de Base	25
Cuadro 3. 1: Normas utilizadas para el Análisis de una Estructura Aislada	63
Cuadro 3. 2: Aplicabilidad de Aislamiento y Sistemas de Disipación de Energía (Adaptado de ASCE/SEI 41-06, 2007).....	81
Cuadro 3. 3: Importancia de la Edificación (Adaptado de Comité VISION 2000).....	82
Cuadro 3. 4: Nivel de Desempeño Sísmico de acuerdo al tipo de sismo y tipo de edificación ..	83
Cuadro 3. 5: Desempeño esperado para edificios comunes en la costa peruana	83
Cuadro 3. 6: Descripción de daño para cada nivel de desempeño (SEAOC VISION 2000).....	84
Cuadro 3. 7: Relación Daño-Deriva según el tipo de la estructura ("Multihazard Loss Estimation Methodology-HAZUS").....	85
Cuadro 4. 1: Cuadro Resumen de cálculos para calificación de falla por piso blando.....	104
Cuadro 4. 2: Cuadro comparativo entre las normas: Chilena y de EE.UU. en cuanto a los parámetros de Diseño.....	134
Tabla 2. 1: Factor de Forma "S" y Módulo de Compresión E_c según la geometría del aislador [Naeim y Kelly, 1999(17)].....	47
Tabla 2. 2: Ecuaciones para el cálculo de la Estabilidad de Aisladores Elastoméricos (Adaptado de ref. 33).....	49
Tabla 3. 1: Coeficiente de Sitio F_a (Adaptado de la Ref. 12).....	66
Tabla 3. 2: Coeficiente de Sitio F_v (Adaptado de la Ref. 12).....	66
Tabla 3. 3: Ecuación de la aceleración de diseño de respuesta espectral en función del periodo (Adaptado de la Ref. 12).....	67
Tabla 3. 4: Valores de los parámetros C_t y x para el cálculo del periodo aproximado usando ecuación (3.9) (Adaptado de la Ref. 12).....	69
Tabla 3. 5: Fórmulas para los Desplazamientos Mínimos Laterales (Adaptado de la Ref. 12)...	70
Tabla 3. 6: Coeficiente de Amortiguamiento BD o BM (Adaptado de la Ref. 12).....	71
Tabla 3. 7: Selección de Ω_0 , R , R_1 , C_d (Adaptado de la Ref. 12).....	74
Tabla 3. 8: Valores de Factor de Importancia (Adaptado de la Ref. 12).....	75
Tabla 3. 9: Valores límites e intervalos para el coeficiente sísmico (Adaptado de la Ref. 12) ...	75
Tabla 3. 10: Fórmulas para hallar la fuerza cortante en un Sistema con Aislamiento (Adaptado de la Ref. 12).....	76
Tabla 4. 1: Características arquitectónicas de la edificación	94
Tabla 4. 2: Cargas consideradas para los metrados	94

Tabla 4. 3: Masas y ubicación de centros de masas del Edificio Convencional.....	95
Tabla 4. 4: Descripción de Sismos de Diseño (Acelerogramas brindados por el Instituto Geofísico del Perú).....	96
Tabla 4. 5: Cálculo de las áreas transversales de los elementos verticales de la Edificación por piso.....	100
Tabla 4. 6: Desplazamientos y Derivas por piso debido al Sismo Lima66	101
Tabla 4. 7: Desplazamientos y Derivas por piso debido al Sismo Chimbote70	102
Tabla 4. 8: Desplazamientos y Derivas por piso debido al Sismo Lima74	102
Tabla 4. 9: Áreas transversales según el tipo de elemento.....	102
Tabla 4. 10: Rigidez en Dirección "X" del Edificio Convencional.....	103
Tabla 4. 11: Rigidez en Dirección "Y" del Edificio Convencional.....	103
Tabla 4. 12: Derivas máximas tanto en la dirección "X" como en "Y" debido a las máximas combinaciones de cargas.....	107
Tabla 4. 13: Cálculo del índice de flexibilidad en ambas direcciones	109
Tabla 4. 14: Derivas máximas del Edificio con placas debido a las máximas combinaciones de carga.....	115
Tabla 4. 15: Espesor de Placas según el número de pisos (Villarreal, 2013).....	117
Tabla 4. 16: Parámetros para encontrar la cortante basal estática tanto en la dirección "X" como en "Y"	117
Tabla 4. 17: Pesos sísmicos por nivel del Edificio con Placas para Diseño de Aisladores en Base	120
Tabla 4. 18: Pesos sísmicos por nivel del Edificio con Placas para Diseño de Aisladores en Entrepiso	120
Tabla 4. 19: Coeficiente sísmico para hallar desplazamientos según el tipo de suelo.....	128
Tabla 4. 20: Factor Z de acuerdo a la zonificación sísmica	128
Tabla 4. 21: Factor BD O BM de acuerdo al amortiguamiento	129
Tabla 4. 22: Factor de Amplificación para el Sismo Máximo Posible.....	129
Tabla 4. 23: Comparación entre el Periodo objetivo Diseñado y del Programa.....	149
Tabla 4. 24: Resultados de los desplazamientos en "X" y en "Y" debido al Sismo Lima 66 ...	150
Tabla 4. 25: Resultados de los desplazamientos en "X" y en "Y" debido al Sismo Chimbote70	151
Tabla 4. 26: Resultados de los desplazamientos en "X" y en "Y" debido al Sismo Lima 74 ...	151
Tabla 4. 27: Comparación porcentual del desplazamiento relativo en la dirección "X" sin considerar el desplazamiento del aislador	154

Tabla 4. 28: Comparación porcentual del desplazamiento absoluto en la dirección "Y" sin considerar el desplazamiento del aislador	155
Tabla 4. 29: Derivas en la dirección "X" debido al Sismo Lima 66	156
Tabla 4. 30: Derivas en la dirección "Y" debido al Sismo Lima 66	156
Tabla 4. 31: Derivas en la dirección "X" debido al Sismo Chimbote 70	157
Tabla 4. 32: Derivas en la dirección "Y" debido al Sismo Chimbote 70	157
Tabla 4. 33: Derivas en la dirección "X" debido al Sismo Lima 74	158
Tabla 4. 34: Derivas en la dirección "Y" debido al Sismo Lima 74	158
Tabla 4. 35: Porcentajes de reducción de la Energía de Entrada debido a los Aisladores.....	167
Tabla 4. 36: Cuadro comparativo entre las Cortantes del Edificio Convencional y el Aislado en la dirección "X" debido al sismo Lima74	178
Tabla 4. 37: Cuadro comparativo entre las Cortantes del Edificio Convencional y el Aislado en la dirección "Y" debido al sismo Lima74	179
Tabla 4. 38: Porcentaje de reducción entre las cortantes en los pisos de la edificación convencional y aislada	179

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata de dar una alternativa de solución a una de las muchas fallas existentes, pero quizá la más peligrosa, la falla por irregularidad de piso blando en edificaciones, mediante el uso de unos dispositivos denominados aisladores de tipo elastoméricos; aprovechando sus propiedades, es decir su elevada rigidez ante cargas verticales y flexibilidad frente a sollicitaciones laterales, para así mejorar de una manera óptima la respuesta de los edificios y por ende reducir o eliminar dicha falla.

Para iniciar este estudio; se toma como muestra una edificación destinada a viviendas multifamiliares, cuya característica principal es que la altura de su primer nivel es mayor comparada con los demás niveles, así mismo presenta escasez de muros, ya que este nivel es destinado para estacionamientos, la cual es modelada y analizada (análisis dinámico lineal tiempo-historia) con la ayuda del programa ETABS v.9.7.0. Luego, con los resultados obtenidos en el programa, se ha realizado la evaluación de "irregularidad por piso blando", basándonos tanto de nuestra norma NTE-E.030, 2003 como de otras normas: NCh 433 1996 Modificada en 2009, NCh2745 2003, COVENIN1756-1:2001, ASCE 7-10, etc.

Los principales parámetros que se tienen en cuenta para este caso de irregularidad, fueron los desplazamientos y derivas, ya que estos reflejan claramente si existe o no una falla por piso blando.

Una vez realizada la evaluación de irregularidad por piso blando, se ha modelado nuevamente dicha edificación pero con la solución propuesta; aisladores elastoméricos ubicados en un primer modelo en la base de la edificación y, en un segundo modelo ubicados encima de las columnas del primer piso, donde ocurre la falla; para así poder realizar la comparación de los resultados obtenidos y verificar la hipótesis planteada.

En cuanto al análisis y el diseño de los aisladores elastoméricos, nos hemos basado en la norma ASCE7-10, capítulo 17. Pero, como un aporte a la investigación, también se ha realizado el diseño de dichos aisladores utilizando la norma chilena, ya que en este país en los últimos años se ha desarrollado esta tecnología obteniendo buenos resultados.

Palabras Clave: Piso Blando, Aislación Sísmica, Aislador tipo HDR, Rigidez, Deriva.

ABSTRACT

This work of investigation tries to give an alternative solution to one of the many existing faults, but perhaps the most dangerous, failure by irregular soft floor in buildings, using devices called elastomeric isolators; taking advantage of its properties, high stiffness to vertical loads and flexibility to lateral stresses, in order to optimally improve the response of buildings and therefore reduce or eliminate such failure.

To start this study; is sampled a building destined to multifamily housing, whose main characteristic is that the first level is higher compared to the other levels, also presents shortage of walls, as this level is destined for parking, which is modeled and analyzed (dynamic linear time-history analysis) using v.9.7.0 of ETABS program. Then with the results of the program, has made the evaluation of "irregularity soft storey", based both our standard NTE-E.030, 2003 and other standards: NCh 433 1996, modified in 2009, NCh2745 2003 COVENIN1756-1: 2001, ASCE 7-10, etc.

The main parameters are taken into account in this case of irregularity, were the displacements and drifts, as these clearly show whether there is a failure for soft floor.

Once the assessment irregularity on soft floor, is modeled again this building but the proposed solution; elastomeric isolators located in a first model at the base of the building and in a second model located above the columns of the first floor where the failure occurs; so as to allow comparison of results and verify hypothesis.

For the analysis and design of elastomeric isolators, we have based on the standard ASCE7-10 Chapter 17. But, as a contribution to research, has also been made the design of such insulators using the Chilean standard because in this country in recent years has developed this technology with good results.

Key words: Soft Story, Seismic Isolation, Isolator type HDR, Stiffness, Drift.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han venido suscitando eventos sísmicos, los cuales han generado un daño devastador, evidencia de ello son las pérdidas humanas y materiales. Así mismo, si bien es cierto que la mayoría de las construcciones en el Perú se lo realiza de manera informal ya sea por los escasos recursos económicos de la población o la falta de interés de las autoridades, se da el caso que algunas edificaciones construidas con asesoramiento técnico, tales como condominios, edificaciones de varios niveles destinadas a departamentos, oficinas, etc., diseñadas según el reglamento, fallan; esto es debido a que muchas veces no se toma en cuenta la forma de la edificación, el tamaño, naturaleza, interacción tabique-pórtico, localización de elementos resistentes y elementos no estructurales como las divisiones interiores.

Se ha demostrado a través de los años y con los eventos sísmicos ocurridos, que varios de los detalles arquitectónicos, unidos a la técnica constructiva han sido causantes de daños en las edificaciones, así por ejemplo la falla por columna corta, torsión, falla por piso blando, etc.

El ingeniero civil siempre ha estado en la constante búsqueda de encontrar soluciones óptimas a muchos de los problemas estructurales que se presentan después de ocurrido un sismo, con la finalidad de proteger tanto los elementos estructurales como no estructurales. Es por ello que, en los últimos años se viene utilizando una nueva tecnología, que mejora el comportamiento de la estructura, disminuyendo muchos de los problemas estructurales y posibles daños que generan los sismos; denominada Aislación Sísmica.

Esta tecnología de Aislación Sísmica está siendo utilizada por diversos países tal como: Estados Unidos, Japón, Chile, etc.; corroborando su eficiente.

Por lo tanto si nosotros combinamos la aislación sísmica con un buen diseño antisísmico podremos evitar diversas fallas estructurales e irreparables; es por ello que la presente investigación utiliza la aislación sísmica para dar solución a uno de los problemas estructurales conocido como piso blando.

1.1. EL CONTEXTO Y EL PROBLEMA

1.1.1. PREGUNTA PRINCIPAL

¿Son los aisladores elastoméricos una alternativa de solución para evitar la falla en edificaciones con irregularidad por piso blando?

1.1.2. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.1.2.1. Hipótesis

El uso de aisladores elastoméricos situados en entrepiso o en la base de edificaciones que presentan irregularidad por piso blando, aumentan los periodos, reducen los desplazamientos relativos, por ende las derivas en un porcentaje significativo, en consecuencia reduce la posibilidad de dicha falla. La hipótesis, ya descrita, se puede representar mediante la Figura 1.1 y la ecuación (1.1).

La Ecuación (1.1) representa la hipótesis planteada H_0 , $\frac{\Delta_1}{h}$ representa la deriva de la edificación convencional, $\frac{\Delta_{A1}}{h}$ representa la deriva de la edificación aislada en su base y por último $\frac{\Delta_{E1}}{h}$ representa la deriva de la edificación aislada en entrepiso, es decir encima de las columnas del primer piso donde existe la irregularidad por piso blando.

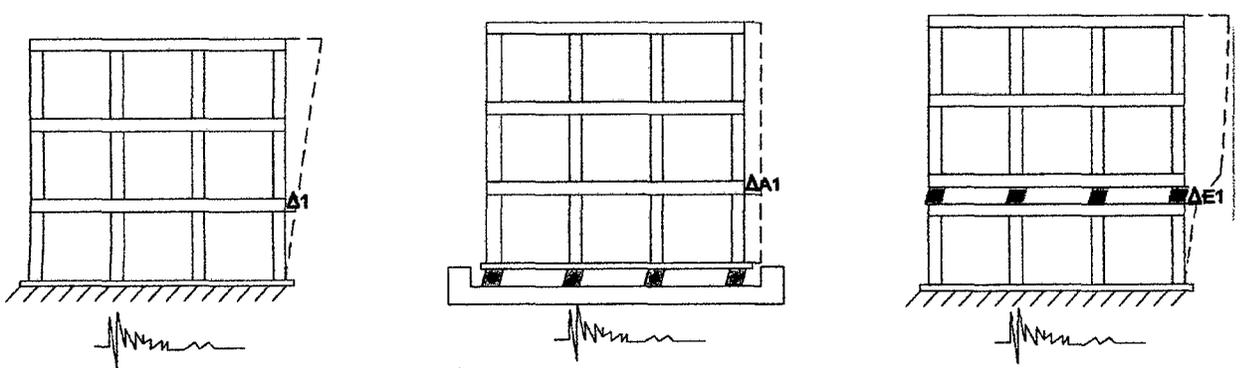


Figura 1. 1: Esquematzación de la hipótesis planteada

$$H_0: \frac{\Delta_1}{h} > \frac{\Delta_{A1}}{h} > \frac{\Delta_{E1}}{h} \quad (1.1)$$

1.1.2.2. Variables

De acuerdo a la presente investigación, estamos hablando de variables cualitativas dicotómicas. Como haremos tres modelamientos, es decir el edificio sin aisladores sísmicos (V1), el edificio con aisladores sísmicos en la base (V2) y por último el edificio con aisladores sísmicos en entrepiso (V3), tendremos dos esquemas que relacionan las variables independientes anteriormente descritas con las dependientes que son: los desplazamientos y las deformaciones, es decir su respuesta sísmica (RS) de la edificación, tal como mostramos a continuación:

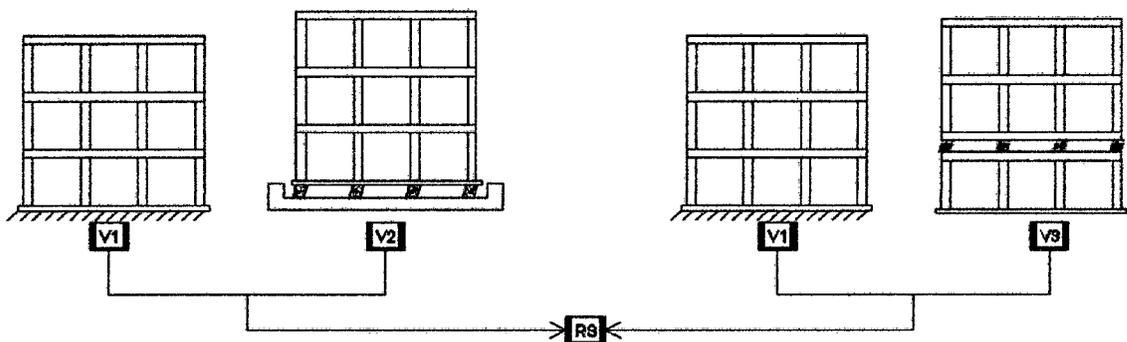


Figura 1. 2: Esquematización de las variables utilizadas

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a que, en los últimos años en la ciudad de Cajamarca se ha observado el crecimiento poblacional, por ende el crecimiento de edificaciones destinadas tanto para uso habitacionales como para oficinas, siendo la mayoría de estas construcciones basadas en un sistema estructural aporricado, que por su concepción estructural, es decir presentar escasa densidad de muros en su primer nivel, destinado generalmente a estacionamientos, o presentar este nivel mayor altura comparada con los demás niveles, genera la irregularidad por piso blando (resaltando que es considerada como la falla más perjudicial ya que implica una gran concentración de fuerzas internas y deformaciones, por tanto daño concentrado que puede terminar en un colapso ya sea parcial o total (8)), que ante un sismo severo e incluso moderado no soportarían; se tiene la necesidad de plantear soluciones que mejoren el comportamiento de estas edificaciones ante un sismo. Es por ello, que en la presente investigación se plantea el utilizar los

aisladores sísmicos como una posible solución para evitar la falla por piso blando, ya que los antecedentes de su uso de estos dispositivos han sido positivos, debido a que genera una disminución de la energía de entrada del sismo a la estructura, con lo cual se debe disminuir así también, notablemente los momentos en cabeza y pie de columna en la base de la estructura; es decir, permitirá mejorar la construcción de edificios destinados a departamentos o viviendas, no cambiando su diseño inicial sino brindando una solución que genere mayor seguridad y se continúe aprovechando espacios (destinados a estacionamientos, negocios, etc.). Así mismo, esta investigación se realiza para tener en cuenta, en adelante, al momento de diseñar las edificaciones, la irregularidad por piso blando, pues no debemos olvidar que nos ubicamos en una zona considerada de alta sismicidad y no debemos esperar que ocurran desgracias, como lo sucedido en la ciudad de Pisco e Ica, que debido al sismo del 15 de agosto del 2007, muchas edificaciones colapsaron principalmente porque no se tomó en cuenta la irregularidad de piso blando, observándose esto claramente en las siguientes figuras:



Figura 1. 3: Colapso del Hotel Embassy por falla por piso blando (Pisco)

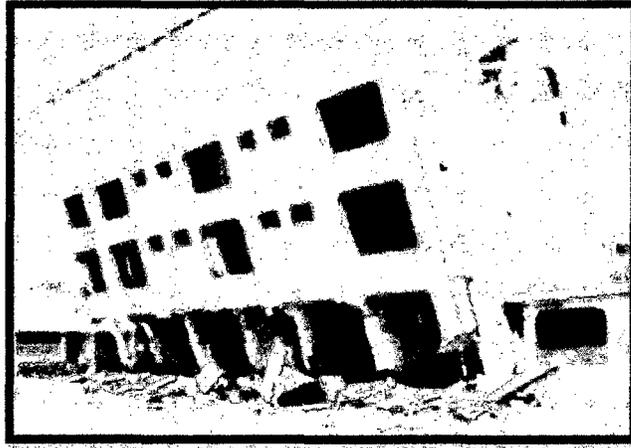


Figura 1. 4: Colapso de una Edificación en Pisco por problema de piso blando

1.3. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia de esta investigación radicará en el planteamiento de soluciones nuevas para problemas estructurales, como irregularidad de piso blando, que puedan incentivar a una mayor investigación.

1.4. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se planteará una solución ante la irregularidad por piso blando, utilizando como muestra una edificación, con la característica peculiar de presentar escasez de muros en su primer nivel y con una altura mayor comparada con los demás niveles, como en la mayoría de viviendas multifamiliares. Para tal fin, se realiza primero una recopilación de datos del edificio en estudio, tal como planos, inspección de los elementos estructurales (pórticos y su coincidencia con los planos), resistencia del concreto, sólo en base a la información dada en planos, etc., ya que por falta de permisos no se podrá realizar ensayos para medir la resistencia del concreto in situ. Segundo, utilizaremos una adecuada metodología para la evaluación de irregularidad por piso blando, basándonos en la norma ASCE 7-10 (12), nuestra norma E.030 (9), y otras normas explicadas en la presente investigación.

Luego se plantean dos alternativas para colocar los aisladores, la primera es ubicar estos dispositivos en la base de la edificación y la segunda es ubicarlos encima de las columnas del primer piso, para así saber la manera que influyen estos

dispositivos en la irregularidad por piso blando, en diferentes ubicaciones. Todo el análisis se realizará ayudándonos del programa computacional ETABS v.9.7.0. No se podrá realizar en la presente investigación, un estudio por desempeño, explicado en la sección 3.3 pág. 81, debido a que, sería otro tema de investigación; tampoco se realizará un estudio real para la evaluación estructural de irregularidad por piso blando, debido a falta de permisos ya mencionado.

Pretendiendo de esta manera sea beneficiosa la presente tesis para la investigación en ingeniería, ya que dará algunas pautas para poder diseñar y analizar de una manera más rigurosa las edificaciones y así se tome en cuenta las irregularidades, como la de piso blando, a la vez plantear mejores soluciones a las edificaciones ya construidas o que están en proyecto.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

- ❖ Realizar el análisis dinámico de una Edificación con presencia de falla por piso blando, usando aisladores elastoméricos para mitigar dicha falla.

1.5.2. Objetivos Específicos

- ❖ Realizar la calificación y el análisis de la irregularidad por piso blando a una edificación existente.
- ❖ Realizar el análisis dinámico de la estructura con irregularidad de piso blando sin aisladores elastoméricos.
- ❖ Realizar el análisis dinámico de la estructura con irregularidad de piso blando, utilizando aisladores elastoméricos, ubicados en un primer modelo en la base de la edificación en estudio, y en un segundo modelo, ubicados por encima del primer piso (entrepiso) de dicha edificación.
- ❖ Evaluar las ventajas estructurales que genera el uso de los aisladores elastoméricos en las edificaciones.
- ❖ Realizar el diseño del Sistema de Aislación considerado; es decir diseñar los Aisladores Elastoméricos, podios y vigas de conexión.

1.6. DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS

El Capítulo I denominado Introducción, hace referencia al problema y su contexto, realizando la pregunta principal y la hipótesis. Así mismo, se realiza la justificación de la investigación, los alcances y objetivos.

El Capítulo II: Marco Teórico se divide en seis partes; la primera hace referencia a los antecedentes teóricos que se han realizado sobre el tema en cuestión a lo largo de los años a nivel internacional, nacional y local; la segunda parte consta de las bases teóricas, es decir todos aquellos conceptos que utilizaremos para el desarrollo de la presente investigación como por ejemplo, irregularidad de piso blando, aislación sísmica y las ecuaciones del movimiento que rigen este sistema, considerando en una tercera parte las ecuaciones de movimiento para estructuras con aisladores en pisos intermedios ya que es un tema nuevo de interés. En la cuarta parte, plantaremos nuestra propuesta, para mitigar la irregularidad de piso blando, mediante la utilización de aisladores elastoméricos. En la quinta parte se da algunas pautas para la evaluación estructural de edificaciones con irregularidad por piso blando. Y, por último en la parte seis se definen los términos básicos utilizados en la presente investigación.

El Capítulo III: Requerimientos Mínimos de Diseño de los Sistemas Aislados y sus Dispositivos. Se realiza una explicación de la norma ASCE 7-10, utilizada para diseñar los aisladores sísmicos. Así, también se da algunas recomendaciones para su uso. Por último, se plantea un esquema, el cual describe paso a paso el procedimiento a seguir en la presente investigación.

El Capítulo IV: Análisis Dinámico de la Edificación. Análisis y Comparación de los Resultados. Como su mismo nombre lo explica, se realizará un análisis dinámico lineal (análisis tiempo-historia) de una edificación que presenta la irregularidad de piso blando, para luego realizar el análisis de las propuestas planteadas en el capítulo II, para la solución de dicha irregularidad, es decir utilizando aisladores sísmicos. Finalmente, mediante tablas y gráficos se hace un análisis y discusión de los resultados obtenidos.

El Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones. Para cada objetivo planteado se establece las conclusiones más pertinentes. Así mismo, para poder ampliar los conocimientos sobre este tema se realiza algunas recomendaciones.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacionales

El piso blando o flexible es muy utilizado por los arquitectos debido a la necesidad de espacios amplios, aún más el gran arquitecto Le Corbusier en 1926 lo estableció como uno de los cinco puntos fundamentales de su arquitectura, denominado pilotis (para Le Corbusier la planta baja de la vivienda al igual que la calle pertenecía al automóvil). Pero después de haber pasado sismos severos, este sistema de piso blando, fue identificado como un problema estructural; por ejemplo, Freeman (1932) publicó en su libro titulado *Earthquake Damage and Earthquake Insurance* (1), un capítulo llamado lecciones estructurales de otros sismos americanos, relata los daños a un edificio con piso blando en planta baja durante el terremoto de 1925 en Santa Bárbara, California. El relato se resume así: "Hotel Carrillo. Este fue de particular interés debido a la altura de las columnas en el primer piso, las cuales sirvieron como soporte semi- flexible y fueron dobladas por la resistencia a la inercia de la superestructura, la que sufrió relativamente poco daño, mientras las paredes y pisos de la porción baja fueron severamente destruidos,..." (1). Aquí nos explica una de las causas más importantes por las que se da este problema de piso blando, las altas columnas que generalmente se presentan en el primer nivel (irregularidad en altura), generando daños importantes.

Como dato curioso, A.K. Chopra, D.P. Clough y R.W. Clough en 1972, publicaron en la revista *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* el artículo titulado *Earthquake resistance of buildings with a "soft" first Storey* (2) cuyo objetivo principal fue el de determinar el efecto de la reducción en la resistencia de fluencia del primer nivel sobre las deformaciones y fuerzas desarrolladas en los pisos superiores; siendo el factor más significativa la excedencia, o no, de la deformación relativa de fluencia. Pero la peculiaridad de esta publicación radica en el enfoque positivo que se le da al problema de piso

blando, ya que se presentó como alternativa para disminuir las aceleraciones de los pisos superiores, lo que hoy en día cumplen esa función los aisladores.

Pero hay que tomar en cuenta que los dispositivos conocidos hoy en día como aisladores están sometidos a una serie de pruebas que no les permiten deformarse de manera excesiva ni generar pandeo, como lo que si se generaría al utilizar columnas demasiado esbeltas o escasez de muros en la primera planta, es decir irregularidad de piso blando.

Dada la importancia de este problema estructural, piso blando, se vienen realizando muchas investigaciones sobre cómo se puede solucionar, destacando por ejemplo la propuesta de Chen y Constantinou (1988), los cuales establecieron un concepto modificado de piso blando en el primer nivel. Su disposición fue incluir dispositivos deslizantes de teflón colocados en la parte superior de algunas columnas del primer piso. Estas columnas están unidas entre sí con vigas de atado y están diseñados para llevar a una parte importante de la carga vertical mientras que las cargas laterales son soportadas por los dispositivos deslizantes (3). Otra variación del concepto de piso blando en primer nivel es propuesto por Todorovska (1999) usando aisladores de caucho inclinados o columnas inclinadas en piso blando del primer nivel (4). El sistema se comporta como un péndulo físico, pivotando alrededor del centro de masa y es más estable que un sistema estándar. Otra ventaja de la inclinación es que las fuerzas de inercia alrededor del punto pivote cancelan en cierta medida las fuerzas de inercia debido a la traslación de la base. En consecuencia se puede obtener deformaciones relativas más pequeñas de la edificación y fuerzas inerciales más pequeñas.

Otros estudios realizados sobre el problema de piso blando y con propuestas para su solución, similares a las planteadas en la presente tesis, fueron: El trabajo realizado por Pinarbasi, Konstantinidis y Kelly (2007), los cuales presentaron una investigación denominada "Seismic Isolation for Soft -Story Buildings" (5), en la cual proponen utilizar aisladores de núcleo de plomo en la base de la edificación para solucionar así el problema de piso blando y; el trabajo de Mo y Chang (1997) (6), en cuya investigación también proponen el uso de los aisladores como alternativa de solución para edificios con fallas por piso blando, pero ubicando a estos dispositivos encima de un muro de corte, del primer piso de una edificación.

En base a estas y muchas otras investigaciones, es que el Dr. Roberto Aguiar Falconí, ha desarrollado una idea que relaciona a los aisladores elastoméricos con las fallas por piso blando, colocando estos dispositivos en pisos intermedios con la finalidad de absolver dicha falla.

Ahora bien todas las ideas e investigaciones realizadas fueron desarrolladas sólo teóricamente.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En el Perú, nuestra norma NTE-E.030, 2003 conceptualiza a la irregularidad por piso blando, sin embargo no se ha tomado la importancia debida sino hasta después del sismo ocurrido el 15 de agosto del 2007 en Pisco e Ica. Constancia de ello es una tesis realizada por Carrillo Trujillo, 2008 denominada Comparación de la Respuesta Sísmica incorporando y desacoplando la mampostería y técnicas de reforzamiento (7), cuyo objetivo principal de dicha investigación fue conocer la influencia del uso o no de mampostería para contribuir al daño estructural ante un sismo, utilizando como modelo el sismo ocurrido en Pisco e Ica, evaluando así los daños y posibles causas. Así mismo en el capítulo IV, de la tesis antes descrita, relata los principales problemas debido a la interacción tabique-pórtico (mampostería trabaja como elemento estructural generando mayor rigidez en pisos superiores) ante solicitaciones sísmicas, destacando como uno de los más importantes la falla por piso blando, indicando de esta manera soluciones a través de reforzamientos en la mampostería.

En otra tesis, desarrollada por Schenone Cano y Urteaga Magán (2011) denominada: Evaluación del criterio de calificación de irregularidad por piso blando según la norma E.030 y propuesta de modificación (8), nos presenta los diferentes conceptos que se dan sobre irregularidad por piso blando de acuerdo a las normas de Chile, Venezuela, México, EE.UU y Ecuador. Realizando un análisis profundo de nuestra norma y planteando propuestas para la mejor calificación de irregularidad por rigidez-piso blando.

Cabe resaltar que el Ing. Ángel San Bartolomé en su blog de investigaciones de concreto armado habla sobre este problema de piso blando, indicando las causas principales y algunas posibles soluciones.

Sin embargo, las investigaciones hechas a este problema de irregularidad por piso blando es muy escasa en nuestro país y las propuestas de solución, en la mayoría de los casos como San Bartolomé lo indica es la colocación de mampostería, no importando la pérdida de espacios o de por sí evitar la falla desde la concepción del edificio.

En cuanto al uso de aisladores sísmicos en el Perú para solucionar estas fallas no se ha tomado en cuenta, ya que tan sólo hace un par de años atrás se viene conociendo sobre esta tecnología, pero que ya ha sido utilizada en edificios tales como el Atlantik Ocean Tower, realizado por el grupo inmobiliario Labok o el edificio corporativo de GYM, ubicados los aisladores en ambos casos a nivel subterráneo.

2.1.3. Antecedentes Locales

En Cajamarca no se ha presentado ningún registro de investigaciones hechas sobre el tema de falla por piso blando y su solución, es por ello que podemos encontrar edificaciones ya construidas que presentarían este problema ante un evento sísmico. Pero cómo identificamos esto, observando la característica peculiar de: escasa densidad de muros en el primer nivel de las edificaciones o la altura de este nivel es mayor que las demás, ya que son destinadas para estacionamientos.



Fotografía 2. 1: Edificios en Cajamarca cuyo primer nivel no tiene continuidad de muros

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. PISO BLANDO

2.2.1.1. Descripción del Problema

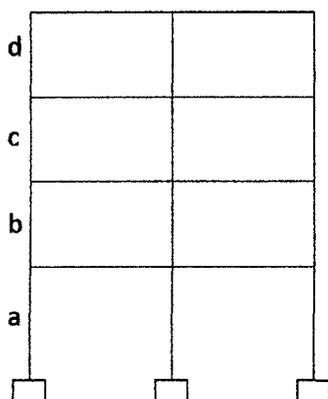
San Bartolomé explica que, el problema de "Piso Blando" surge en aquellos edificios aporticados (compuestos predominantemente en su estructura por vigas y columnas), donde el piso en mención presenta alta flexibilidad por la escasa densidad de muros que impide controlar los desplazamientos laterales impuestos por los terremotos, en tanto que los pisos adyacentes son relativamente más rígidos por contener una mayor cantidad de muros (15).

Por ejemplo aquí podemos citar aquellos edificios que presentan en su primer piso cocheras, tiendas o restaurantes (fotografía 2.1), donde por el uso que se le da, tienen pocos muros, mientras que los pisos superiores, generalmente destinados a vivienda, contienen muchos tabiques de albañilería que los rigidizan lateralmente.

2.2.1.2. Concepto según la norma NTE-E.030,2003

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones, norma E.030 considera piso blando cuando en cada dirección la suma de las áreas de las secciones transversales de los elementos verticales resistentes al corte en un entrepiso, columnas y muros, es menor que 85% de la correspondiente suma para el entrepiso superior, o es menor que el 90% del promedio para los tres pisos superiores, no es aplicable en sótanos. Para pisos de altura diferente se multiplica los valores anteriores por (h/h_d) donde h_d es la altura diferente de entrepiso y h es la altura típica de piso. (9)

Interpretación matemática de la norma



$$K_a < 0.85 K_b$$

$$K_a < 0.90 (K_b + K_c + K_d)/3$$

Para pisos con diferente altura

Siendo "a" diferente altura, entonces:

$$K_a \times \frac{h}{h_d} < 0.85 K_b$$

$$K_a \times \frac{h}{h_d} < 0.90 (K_b + K_c + K_d)/3$$

Figura 2. 1: Esquema representativo para la interpretación de la norma

Donde:

K_a = Suma de las áreas de las secciones transversales de los elementos verticales resistentes al corte en el piso a.

K_b = Suma de las áreas de las secciones transversales de los elementos verticales resistentes al corte en el piso b.

K_c = Suma de las áreas de las secciones transversales de los elementos verticales resistentes al corte en el piso c.

K_d = Suma de las áreas de las secciones transversales de los elementos verticales resistentes al corte en el piso d.

h = altura típica de piso

h_d = altura diferente de piso

2.2.1.3. Normas de otros países con respecto a Irregularidad de Rigidez-Piso Blando

Cuadro 2. 1: Normas que explican la irregularidad de Rigidez- Piso Blando

Norma	Aspectos de Irregularidad de Rigidez	Método y/o Sanción	Observación
<p>NORMA CHILENA: NCh 433.0f1996 Modificada en 2009</p>	<p>Se debe verificar que los diafragmas tienen la rigidez y la resistencia suficiente para lograr la distribución de las fuerzas inerciales entre los planos o subestructuras verticales resistentes.</p>	<p>Si existen dudas sobre la rigidez del diafragma, se debe tomar en cuenta su flexibilidad agregando los grados de libertad que sea necesario o introduciendo separaciones estructurales.</p>	<p>No define el término piso blando en la primera norma mencionando, solamente la rigidez en el diafragma, pero en la segunda norma los describe de manera similar a nuestra norma.</p>
	<p>NCh2745 2003(10)</p> <p>Irregularidades verticales estructurales: irregularidad de rigidez piso blando, un piso blando es aquel cuya rigidez lateral es menor del 70% de la rigidez del piso superior o menos del 80% de la rigidez promedio de los tres pisos superiores al piso blando</p>	<p>No se recomienda ningún método</p>	
<p>NORMA VENEZOLANA: COVENIN1756-1:2001(11)</p>	<p><u>Irregularidades verticales:</u> Entrepiso blando: La rigidez lateral de algún entrepiso, es menor que 0.70 veces la del entrepiso superior, o 0.80 veces el promedio de las rigideces de los tres entrepisos</p>	<p>➤ Requiere el cumplimiento del nivel de diseño ND3 (nivel de diseño 3, mayor información en ref. (11)) en todos los componentes del</p>	<p>Tiene un concepto similar a nuestro código, difieren en los porcentajes considerados, además toma en cuenta la tabiquería, lo cual no</p>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
 "ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
 PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

<p style="text-align: center;">NORMA VENEZOLANA: COVENIN1756- 1:2001(11) (Continuación)</p>	<p>superiores. En el cálculo de las rigideces se incluirá la contribución de la tabiquería; en el caso de que su contribución sea mayor para el piso inferior que para los superiores, esta se podrá omitir.</p>	<p>entrepiso y de los dos entrepisos adyacentes.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Se debe realizar, adicionalmente, como mínimo un análisis dinámico espacial. ➤ Las solicitaciones obtenidas serán multiplicadas por 1.3 con fines de diseño en todos los elementos del entrepiso donde se encuentre la irregularidad y los de los entrepisos inferiores. 	<p>se considera en nuestra norma.</p>
<p style="text-align: center;">EE.UU: ASCE 7-10 (12)</p>	<p><u>Irregularidad en Elevación</u> Piso blando la rigidez lateral total de un entrepiso es menor que el 70% del entrepiso superior o menor que el 80% del promedio de los 3 pisos superiores.</p> <hr/> <p>Piso blando extremo: La rigidez lateral total de un entrepiso es menor que el 60% del entrepiso superior o menor que el 70% del promedio de los 3 pisos superiores.</p>	<p>Permite libertad de elegir el método.</p> <hr/> <p>Estructuras de categoría E o F con este tipo de irregularidad, no son permitidas.</p>	<p>En esta norma considera el piso blando de acuerdo a su magnitud: extrema y no extrema.</p> <p>Cabe resaltar el manual "Seismic Design Manual" del Structural Engineers Association (SEA); puesto que explica aquí de manera detallada la norma.</p>

<p>Ecuador: Código Ecuatoriano de la Construcción 2002(13)</p>	<p>Piso blando (irregularidad en rigidez) La estructura se considera irregular cuando la rigidez lateral de un piso es menor que el 70% de la rigidez lateral del piso superior o menor que el 80 % del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos superiores. Si la deriva máxima de cualquier piso es menor de 1,3 veces la deriva del piso inmediato superior, puede considerarse que no existe irregularidad.</p>	<p>➤ El factor de reducción de resistencia sísmica (R) se multiplicará por 0.9 en el caso de pórticos espaciales y pórticos con vigas de banda. Se multiplicará por 1 en el caso de sistemas duales o con diagonales. ➤ Se utilizará el procedimiento de cálculo dinámico.</p>	<p>En esta norma además de considerar la rigidez, considera también las derivas de entrepisos.</p>
---	---	--	--

Aquí cabe resaltar el Manual "Seismic Design Manual" volumen I desarrollado por la Asociación de Ingenieros Estructurales (SEA) publicado por el SEAOC (14), con el propósito de proporcionar orientación sobre la interpretación y el uso de los requisitos sísmicos dados en el código UBC(1997)(27), ilustrando cómo se utilizan las disposiciones del código. La definición que presenta este manual es la siguiente:

Si:

$$\frac{0.7\Delta S_i}{h_i} > \frac{\Delta S_{i+1}}{h_{i+1}} \quad \text{ó} \quad \frac{0.8\Delta S_i}{h_i} > \frac{\left(\frac{\Delta S_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{\Delta S_{i+2}}{h_{i+2}} + \frac{\Delta S_{i+3}}{h_{i+3}}\right)}{3} \quad (2.1)$$

(Ecuación (2.1) véase en el ejemplo 4 del Seismic Design Manual(14))

Entonces califica como piso blando.

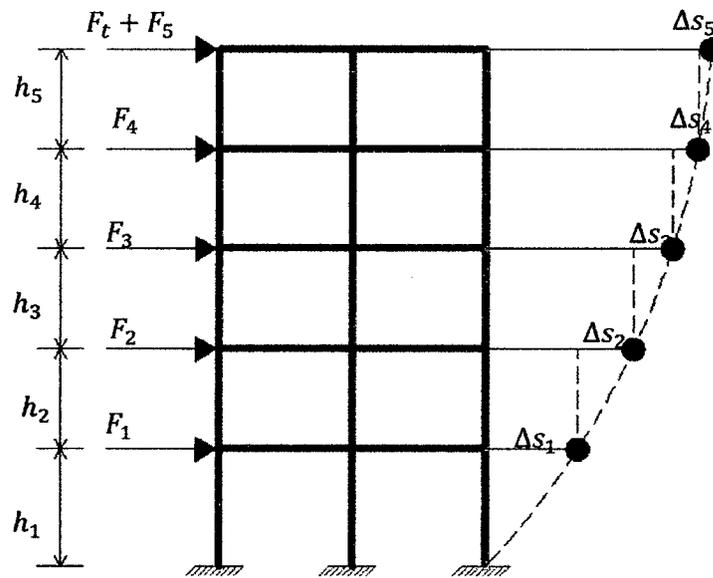


Figura 2. 2: Esquema adaptado de la ref. (14) que explica la calificación de piso blando

2.2.1.4. Causas Principales que generan piso blando

Dentro de las causas principales que generan los pisos blandos en las estructuras podemos citar:

1. Una estructura en la que cualquier piso, presenta columnas más esbeltas con respecto a los demás pisos, provocando mayor deflexión en este nivel.
2. Un cambio abrupto de la rigidez en un piso con respecto a otro.
3. El uso de muro de corte con una discontinuidad, en la cual las fuerzas cortantes son resistidas por muros que no llegan hasta la fundación.
4. Discontinuidad en la trayectoria de las cargas, creada por un cambio brusco vertical u horizontal en la estructura.
5. Configuración geométrica es decir:
 - Falta de simetría en la geometría global de la estructura
 - Distribución de masas a lo alto de la estructura
 - Variación de las áreas de los elementos estructurales
 - Existencia de entrantes y salientes tanto en planta como en elevación
6. Así mismo se ha señalado el problema de interacción tabique-pórtico ya que cuando no se aísla la mampostería del pórtico, al actuar un sismo, el pórtico (más flexible que el muro de albañilería) entra en contacto con el tabique en sus esquinas diagonalmente opuestas, mientras que las otras esquinas se

despegan haciendo trabajar de esta manera al tabique como panel de corte que eleva la resistencia y rigidez del conjunto. Por tanto provocando una falla por piso blando.

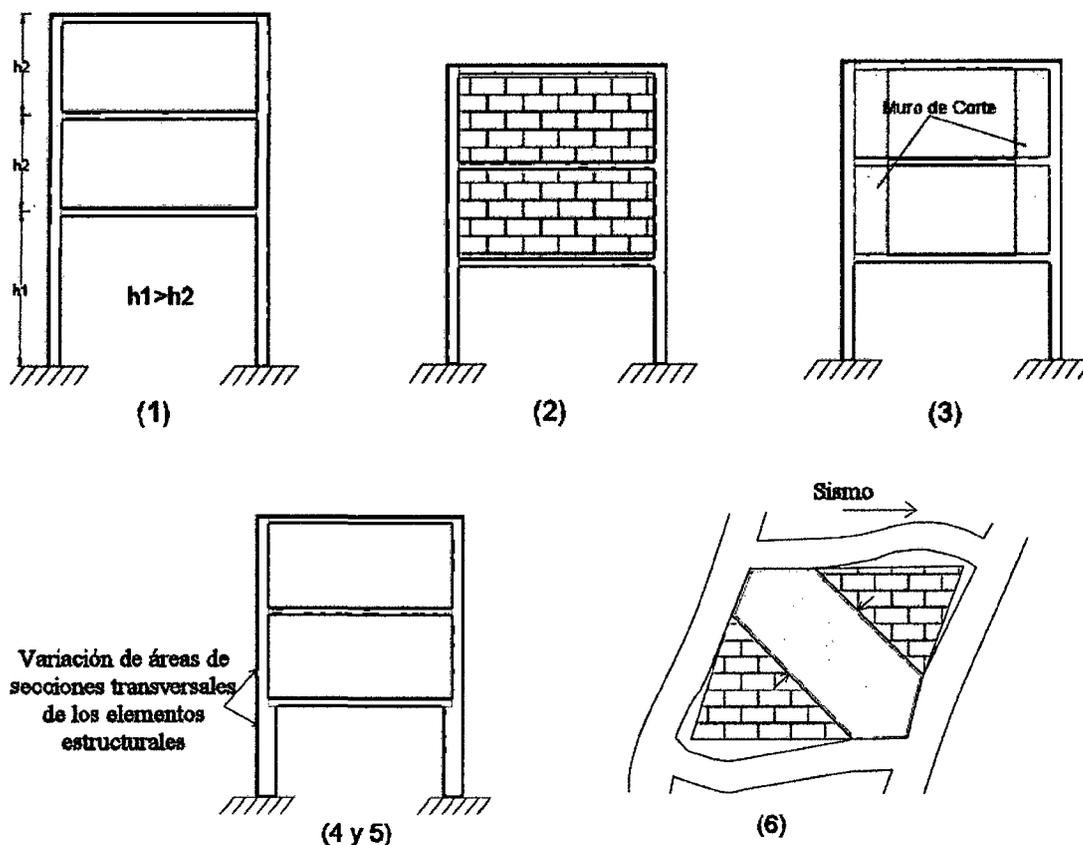


Figura 2. 3: Gráficas que representan las Causas Principales de la Falla por Piso Blando

2.2.1.5. Comportamiento de Piso Blando ante los sismos

San Bartolomé en su blog de investigaciones dijo que: “Durante los sismos severos o incluso a veces en los sismos moderados, en el “Piso Blando” se produce un gran desplazamiento lateral [Δ en la Fig (2.4)], que se traduce en una excentricidad de la carga vertical “P” proveniente de los pisos superiores rigidizados por los tabiques. Esto da lugar a un momento($P \times \Delta$) que debe ser equilibrado por los momentos flectores generados en los extremos de las columnas del piso blando ($m(\Delta)$)” (15).

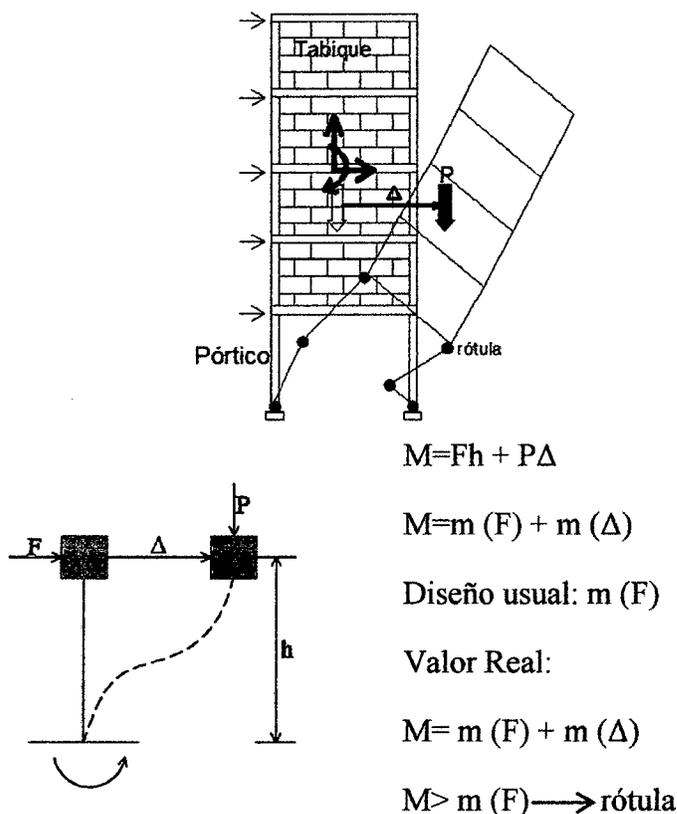


Figura 2. 4: Piso Blando o Problema de P- Δ (Adaptado de la ref. 15)

Muchas veces los ingenieros estructurales diseñan a las columnas de “piso blando” como para soportar los momentos flectores generados por la fuerza sísmica ($m(F)$ en la Fig.2.4 o “análisis de primer orden”), obviando a los producidos por el desplazamiento lateral $m(\Delta)$ (15).

Con lo cual, durante el sismo, el momento flector actuante ($M = m(F) + m(\Delta)$) supera a la capacidad resistente ($m(F)$), dando lugar a la formación de rótulas en los extremos de las columnas de “piso blando”, lo que conduce a una mayor flexibilización de piso en mención (incremento de Δ), sobreviniendo finalmente el colapso de la edificación. (15)

2.2.2. AISLAMIENTO SÍSMICO. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS

2.2.2.1. Clasificación de los sistemas de control de respuesta sísmica

Para poder entender los sistemas de control de respuesta sísmica y su clasificación tendremos que explicar la ecuación de la energía absoluta:

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_H(t) \quad [\text{Ecuación de la ref. (23)}]$$

Al lado derecho de la ecuación se encuentra la capacidad de la estructura y al lado izquierdo, la energía que demanda el sismo. Siendo $E_I(t)$, la energía de entrada; $E_K(t)$, la energía cinética; $E_D(t)$, la energía de amortiguamiento; $E_S(t)$, la energía elástica no disipada y $E_H(t)$, la energía de deformación plástica o histerética.

Ahora bien las técnicas de control de respuesta sísmica se clasificarán según la forma como el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción y disipación.

En el diseño sísmico convencional, la capacidad de la estructura se apoya en términos de deformaciones inelásticas transformando gran parte de la energía de entrada $E_I(t)$ en energía histerética $E_H(t)$. Para evitar dichas incursiones inelásticas se emplean amortiguadores, donde la capacidad de disipación de energía se da mediante la adición de energía de amortiguamiento $E_D(t)$, disminuyendo la participación de los componentes estructurales (23); en cambio, los aisladores sísmicos se enfocan en disminuir la energía de entrada del sismo ($E_I(t)$) al sistema estructural.

En la Figura 2.5 se explican los tipos de sistemas existentes para el control de respuesta sísmica. En la Figura 2.5 (a) observamos que el sistema utilizado no requiere de aporte energético para su funcionamiento y sus dispositivos se basan en elementos que responden de manera inercial a la acción sísmica, es decir reducen la respuesta sísmica por medios totalmente mecánicos; por ejemplo, los aisladores sísmicos o disipadores de energía, denominándose a este tipo sistemas de control pasivo; en cambio, los de control activo modifican la respuesta sísmica utilizando un monitor o computador captando la señal mediante sensores, requiriendo para ello una gran cantidad de energía, tal como se indica en la Figura 2.5 (b). Los sistemas semi-activos utilizan elementos que controlan a la estructura pero externamente aportando una energía mínima a esta y por último los de control

híbrido es una combinación entre ambos sistemas, es decir pasivos con activos, tal como se indica en la Figura 2.5 (c).

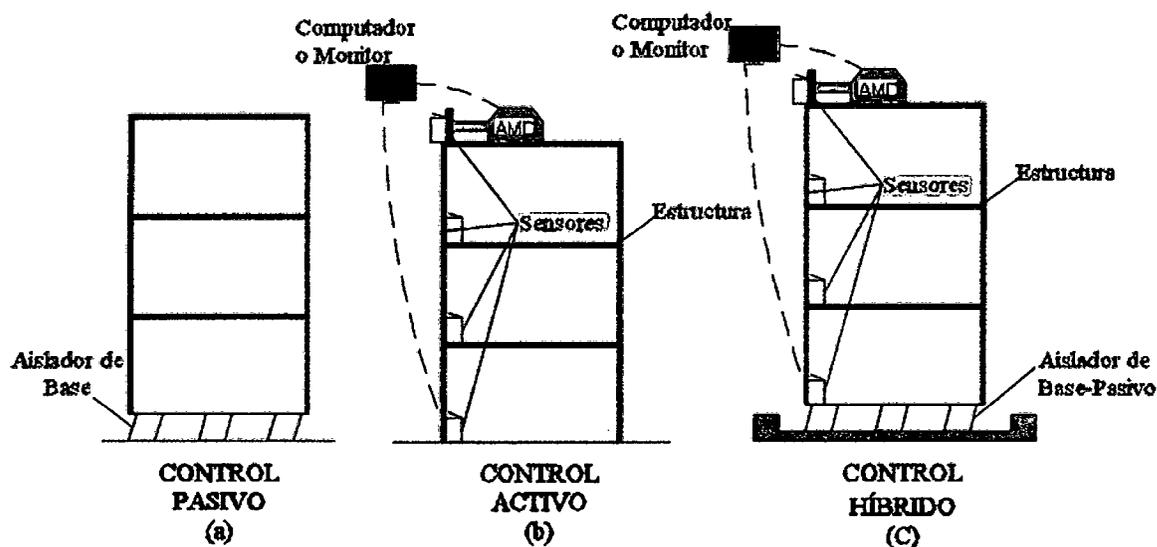
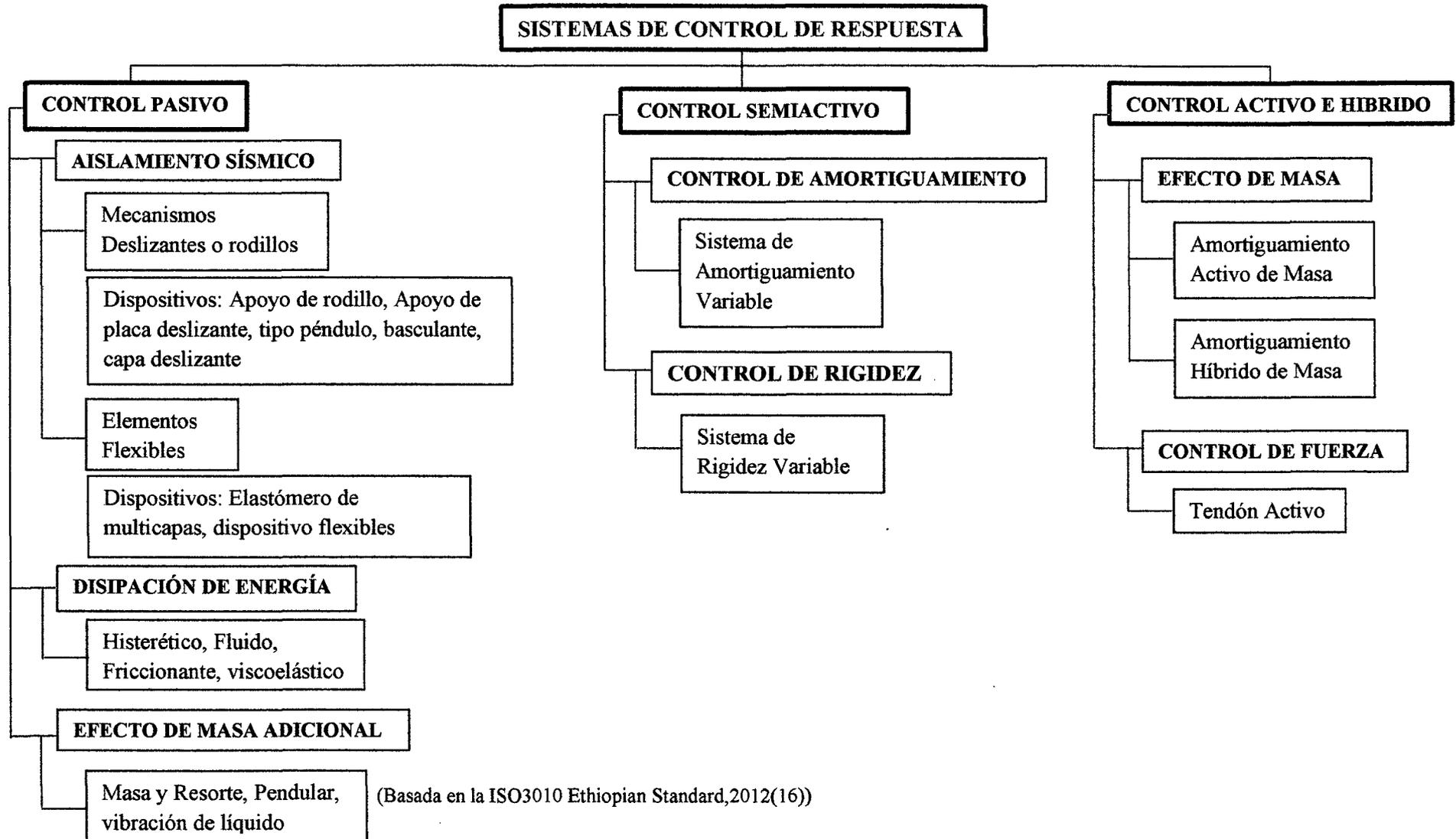


Figura 2. 5: Idealizaciones de los sistemas de control de respuesta sísmica

Los sistemas de control de respuesta sísmica se dividen en cuatro grandes grupos, resumidos en el cuadro 2.2, y en cada grupo se indica las técnicas que se utilizan. Así mismo, el sistema de control híbrido se ha agrupado con el sistema de control activo, ya que utilizan técnicas semejantes. Cabe resaltar que esta clasificación ha sido extraída del ISO3010 (16).

Cuadro 2. 2: Clasificación de los sistemas de control de respuesta sísmica



2.2.2.2. Concepto y componentes de un sistema de aislación sísmica.

A) Concepto

La aislación sísmica es un sistema que permite disminuir la energía absoluta de entrada a la fundación de la estructura, mediante dispositivos que desacoplan la superestructura de la subestructura con el objeto de lograr que la superestructura alargue su periodo.

Estos dispositivos son los llamados aisladores sísmicos, los cuales son flexibles en la dirección horizontal pero rígidos en la dirección vertical (17), lo cual permite cumplir con los principios básicos de la aislación sísmica: la flexibilización o alargamiento del periodo; en consecuencia se disminuye así las aceleraciones, reduciendo esfuerzos y deformaciones; permaneciendo en su comportamiento elástico.

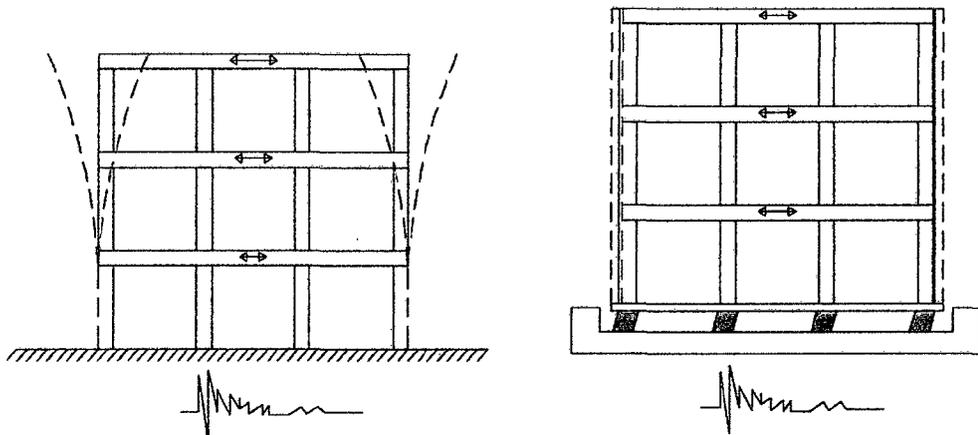


Figura 2. 6: Comportamiento de un edificio ante una sollicitación sísmica con aisladores sísmicos y sin aisladores sísmicos

Podemos visualizar en la Figura 2.6 que el edificio sin aisladores sufre grandes deformaciones, de manera ascendente en cambio un edificio con aislación presenta pequeñas deformaciones, permaneciendo en su comportamiento elástico.

B) Componentes de un Sistema de Aislamiento

Toda estructura aislada, sin importar el tipo, presenta los siguientes elementos:

- a. Unidad de Aislamiento: Es aquel dispositivo que permite la flexibilidad en la dirección horizontal y rigidez en la dirección vertical.

- b. Sistema de Aislamiento: Es el conjunto de sistemas estructurales que incluye a las unidades de asilamiento, disipadores de energía y restricción de desplazamientos.
- c. Interfaz de aislamiento: Es el límite imaginario que divide a una estructura en dos partes, desacoplándolas.

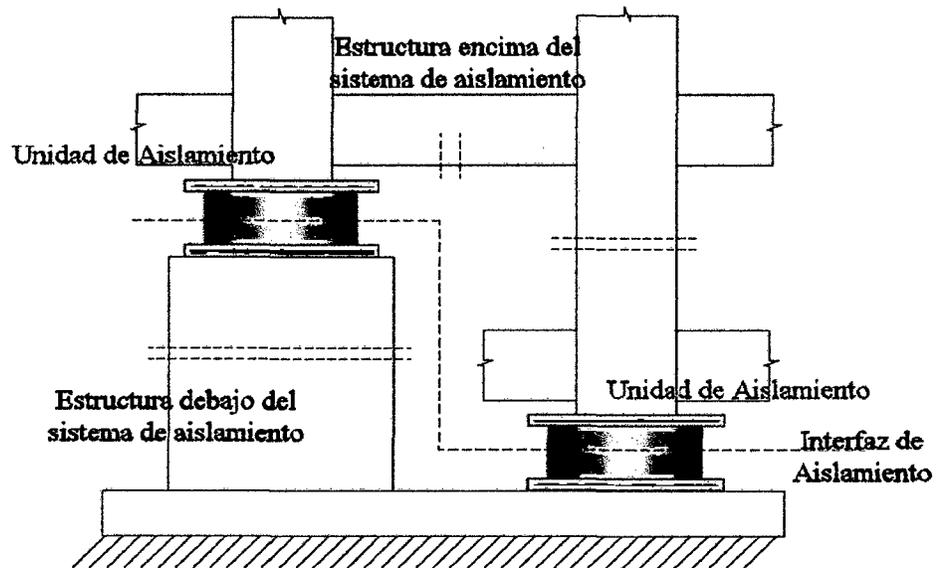


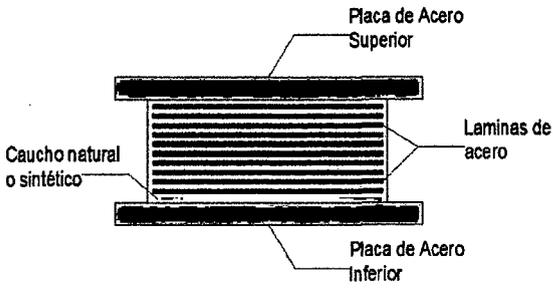
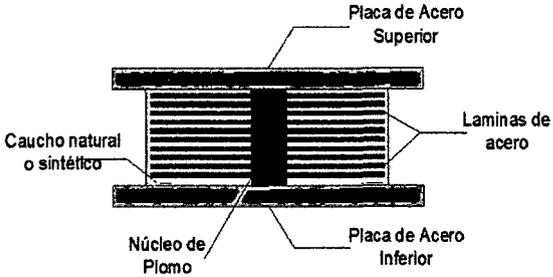
Figura 2. 7: Elementos de un Sistema de Aislamiento (Cheng y colaboradores, 2008)

En la presente investigación estudiaremos los aisladores de tipo elastoméricos; que según sus propiedades, para el diseño del edificio en estudio se elegirá el más adecuado, respecto de, la disminución de derivas, ya que es éste parámetro, el principal indicador de la existencia o no de irregularidad por piso blando.

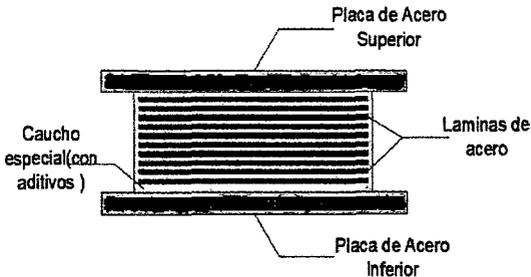
2.2.2.3. Aisladores Elastoméricos

Son aquellos dispositivos compuestos por capas alternadas de goma, con placas de acero unidas mediante un proceso de vulcanización; es por esto, que es flexible horizontalmente (por la goma) y rígido verticalmente (por las placas de acero). Existen aisladores elastoméricos cuadrados y cilíndricos, siendo estos últimos los más utilizados ya que por su geometría sus propiedades no se ven afectadas por la carga horizontal, ya que se distribuye los esfuerzos uniformemente (24). Según se vaya mejorando las propiedades de estos dispositivos se presenta la siguiente clasificación, que se muestra en el cuadro 2.3:

Cuadro 2. 3: Clasificación de los Aisladores Elastoméricos de Base

TIPO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	FIGURA
<p>Aisladores Elastoméricos de Bajo Amortiguamiento o Aisladores de Caucho Natural (LDR)</p>	<p>Fueron los primeros dispositivos de aislación utilizados. Como su nombre lo indica se usa láminas múltiples de caucho reforzado con láminas de acero entre las capas. La características más importantes son: existe una relación lineal entre la cortante y la deformación lateral, la relación de la deformación lateral entre el espesor de la lámina de caucho alcanza hasta el 100%, su amortiguamiento es entre el 2% y el 3%</p>	<p><u>Ventajas:</u> Son fáciles de modelar y no necesitan mantenimiento puesto que no son tan afectados por el tiempo, ambiente, etc. <u>Desventajas:</u> Suelen necesitar amortiguadores externos debido a su bajo amortiguamiento.</p>	 <p>Figura 2. 8: Aislador Elastomérico de Bajo Amortiguamiento</p>
<p>Aisladores de Caucho con Núcleo de Plomo</p>	<p>Similar al aislador LDR, sólo que en el centro va el núcleo de plomo. La características más importantes son: existe una relación lineal entre la cortante y la deformación lateral, la relación de la deformación lateral entre el espesor de la lámina de caucho alcanza hasta el 200%, su amortiguamiento es entre el 15% y el 35%</p>	<p><u>Ventajas:</u> A diferencia de las anteriores ya no necesitarían de amortiguamiento externo ya que el núcleo de plomo le brinda esta propiedad (le da mayor amortiguamiento).</p>	 <p>Figura 2. 9: Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo</p>

Cuadro 2. 3: Clasificación de los Aisladores Elastoméricos de Base (Continuación)

<p>Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento</p>	<p>En este caso lleva materiales especiales o el caucho contiene aditivos como aceites, resinas, polímeros; que mejoran las propiedades ante altas deformaciones.</p> <p>La características más importantes son: existe una relación lineal entre la cortante y la deformación lateral, la relación de la deformación lateral entre el espesor de la lámina de caucho alcanza hasta el 300%, su amortiguamiento es entre el 10% y el 20%</p>	<p><u>Ventajas:</u> Posee alto amortiguamiento</p> <p><u>Desventajas:</u> Algunos son sensibles con el paso del tiempo.</p>	 <p>Figura 2. 10: Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento</p>
--	--	---	---

Dada la presente clasificación podremos ver que el mejor tipo para poder diseñar en la presente tesis será el de aislador elastomérico de alto amortiguamiento debido a que presenta mayor ventaja en cuanto a soportar grandes deformaciones y disminución de las derivas en entresijos, que es lo que se requiere.

2.2.2.4. Teoría Lineal de la Aislación sísmica

Esta teoría se representa mediante un modelo estructural de dos grados de libertad, tal como se muestra en la Figura 2.11

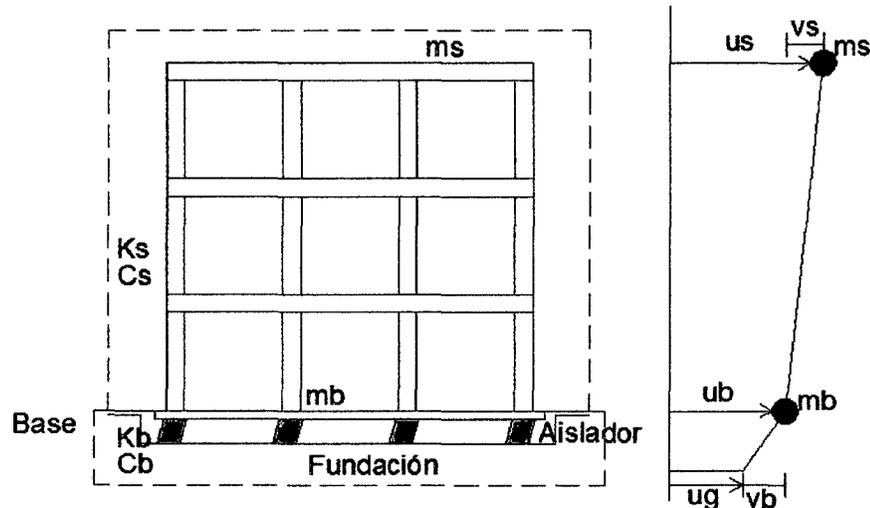


Figura 2. 11: Parámetros del Sistema de Aislación de Dos Grados de Libertad (Adaptado de la ref. 17)

Podemos observar en la imagen que está dividido en dos bloques, ya que por teoría sabemos que los aisladores trabajan desacoplando la superestructura de la subestructura. En el primer bloque los parámetros presentados pertenecen a los de la superestructura, los cuales son: la rigidez (k_s), el coeficiente de amortiguamiento (c_s) y su masa (m_s). Así mismo, en el segundo bloque los parámetros k_b y c_b son de los aisladores; y la masa m_b pertenece a la base de la edificación encima del sistema de aislamiento.

Los desplazamientos absolutos de las dos masas son u_s y u_b , pero es conveniente utilizar los desplazamientos relativos:

$$v_b = u_b - u_g \qquad v_s = u_s - u_b \qquad (2.2)$$

Donde: u_g es el movimiento del suelo. Luego en términos de estos desplazamientos las ecuaciones de equilibrio dinámico del modelo de dos grados de libertad son:

❖ Para la masa " m_s "

$$m_s \ddot{u}_s + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0 \qquad (2.3)$$

Reemplazando las expresiones (2.2) tenemos:

$$m_s \ddot{v}_s + m \ddot{v}_b + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad (2.4)$$

❖ Para la masa "m_b"

$$m_s \ddot{u}_s + m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (2.5)$$

$$(m_s + m_b) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_b + m_s) \ddot{u}_g \quad (2.6)$$

Representando las ecuaciones de equilibrio dinámico de manera matricial:

$$\begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.7)$$

Donde: $M = m_b + m_s$

Se asume los siguientes órdenes de magnitud de los parámetros estructurales:

1) $m_b < m_s$, pero del mismo orden de magnitud

$$2) \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{M}} < \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$$

3) Se asume que $\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$ [ref.(17)]

4) $\beta_b = \frac{c_b}{2M\omega_b}$ y $\beta_s = \frac{c_s}{2m\omega_s}$ siendo el mismo orden de magnitud que ε

Donde:

$$x = \frac{m_s}{m_s + m_b} = \frac{m_s}{M} \text{ Coeficiente de masa total} \quad (2.8)$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{M}} \text{ y } \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \text{ Frecuencias nominales} \quad (2.9)$$

$$\beta_b = \frac{c_b}{2M\omega_b} \text{ y } \beta_s = \frac{c_s}{2m\omega_s} \text{ Factores de Amortiguamiento} \quad (2.10)$$

En términos de las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10) las ecuaciones del movimiento son:

$$\ddot{x} v_s + \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (2.11)$$

$$\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\omega_s \beta_s \dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{u}_g \quad (2.12)$$

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales (2.11) y (2.12) se presenta en la ref. (17).

A) Ecuaciones de Movimiento de Sistemas con un grado de Libertad

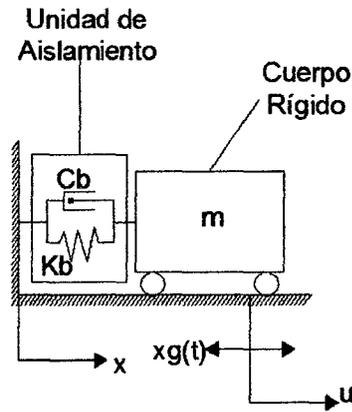


Figura 2. 12: Sistema idealizado de masa rígida con sistema de resorte (Adaptado de la ref.18).

La ecuación del movimiento que define este sistema bajo las condiciones de equilibrio dinámico son:

$$m\ddot{u} + c_b(\dot{u} - \dot{x}_g) + k_b(u - x_g) = 0 \quad (2.13)$$

Siendo: $(u - x_g) = x$ (Desplazamiento relativo)

Sabemos que:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m}}, \text{ entonces } k_b = \omega_b^2 m \quad (2.14)$$

$$c_b = \beta_b 2\omega_b m \quad (2.15)$$

Si reemplazamos las expresiones (2.14) y (2.15) en la ecuación (2.13) queda:

$$m\ddot{x} + c_b\dot{x} + k_b x = -m\ddot{x}_g \quad (2.16)$$

Como podemos observar la ecuación (2.16) es la misma ecuación del movimiento para un sistema que se somete a movimiento del terreno.

Para resolver la ecuación diferencial de segundo orden se expresa en la forma, dividiéndolo entre "m" a toda la expresión:

$$\ddot{x} + \beta_b 2\omega_b \dot{x} + \omega_b^2 x = -\ddot{x}_g \quad (2.17)$$

Aplicamos el método de variación de parámetro en la ecuación (2.17), utilizado para resolver ecuaciones diferenciales de segundo orden. La solución general será:

$$x(t) = c_1 e^{-\beta_b \omega_b t} \text{sen}(\omega_b \sqrt{(1 - \beta^2)})t + c_2 e^{-\beta_b \omega_b t} \text{cos}(\omega_b \sqrt{(1 - \beta^2)})t \quad (2.18)$$

Siendo c_1 y c_2 constantes.

La frecuencia amortiguada está representada por $\bar{\omega}_b = (\omega_b \sqrt{(1 - \beta^2)})$. Para usar el método de variación de parámetro se hace variar c_1 y c_2 respecto de t :

$$x(t) = c_1(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \text{sen} \bar{\omega}_b t + c_2(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \text{cos} \bar{\omega}_b t \quad (2.19)$$

Si derivamos la ecuación (2.19) la ecuación nos queda de la siguiente manera:

Previamente tomamos como: $y_1 = e^{-\beta_b \omega_b t} \text{sen} \bar{\omega}_b t$ y $y_2 = e^{-\beta_b \omega_b t} \text{cos} \bar{\omega}_b t$

$$\dot{x}(t) = (c_1(t) \dot{y}_1 + c_2(t) \dot{y}_2) + (\dot{c}_1(t) y_1 + \dot{c}_2(t) y_2) \quad (2.19a)$$

Para encontrar una solución particular de la ecuación (2.17), $c_1(t)$ y $c_2(t)$ son seleccionadas a propósito del segundo miembro de la ecuación (2.19a), para que se cumple la siguiente condición, ya que se desea que sean soluciones de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\dot{c}_1(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \text{sen} \bar{\omega}_b t + \dot{c}_2(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \text{cos} \bar{\omega}_b t = 0 \quad (2.20)$$

Derivando la ecuación (2.19) dos veces, considerando la condición (2.20) y reemplazando en la ecuación (2.17) tenemos:

$$i) \quad -\dot{c}_1(t) \beta_b \omega_b e^{-\beta_b \omega_b t} \text{sen} \bar{\omega}_b t + \dot{c}_1(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \bar{\omega}_b \text{cos} \bar{\omega}_b t - \dot{c}_2(t) \beta_b \omega_b e^{-\beta_b \omega_b t} \text{cos} \bar{\omega}_b t - \dot{c}_2(t) e^{-\beta_b \omega_b t} \bar{\omega}_b \text{sen} \bar{\omega}_b t = -\ddot{x}_g(t) \quad (2.21)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (2.20) y (2.21), obtenemos:

$$\dot{c}_1(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \ddot{x}_g(t) e^{\beta_b \omega_b t} \text{cos} \bar{\omega}_b t \quad (2.22)$$

$$\dot{c}_2(t) = \frac{1}{\bar{\omega}_b} \ddot{x}_g(t) e^{\beta_b \omega_b t} \text{sen} \bar{\omega}_b t \quad (2.23)$$

Integrando las expresiones anteriores obtenemos:

$$c_1(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{\beta_b \omega_b \tau} \text{cos} \bar{\omega}_b \tau d\tau + c_1 \quad (2.24)$$

$$c_2(t) = \frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{\beta_b \omega_b \tau} \text{sen} \bar{\omega}_b \tau d\tau + c_2 \quad (2.25)$$

Ahora reemplazamos estas expresiones en la ecuación (2.18), quedándonos una ecuación expresada en términos de la integral de Duhamel:

$$x(t) = e^{-\beta_b \omega_b t} (c_1 \text{sen} \bar{\omega}_b t + c_2 \text{cos} \bar{\omega}_b t) - \frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b \tau} \text{sen} \bar{\omega}_b (t - \tau) d\tau \quad (2.26)$$

Pero si consideramos las condiciones iniciales de que no existe movimiento y velocidad en el instante que inicia un sismo, se tiene que $c_1 = c_2 = 0$ de esta manera la ecuación (2.26) se simplifica:

$$x(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (t-\tau)} \text{sen} \bar{\omega}_b (t - \tau) d\tau \quad (2.27)$$

Si suponemos que el sistema no tiene sistemas de amortiguamiento, sabemos que para la mayoría de los sistemas aislados que no tienen amortiguamiento el coeficiente de amortiguamiento normalmente no excede del 20% del amortiguamiento crítico. Por lo tanto los efectos de $\bar{\omega}_b$ son despreciables y sólo se considera la frecuencia natural ω_b en la ecuación (2.27).

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_b} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (t-\tau)} \text{sen} \omega_b (t - \tau) d\tau \quad (2.28)$$

El valor máximo absoluto de la porción de la integral de la ecuación (2.28) se define como la pseudo - velocidad espectral de respuesta y está representado por la siguiente ecuación.

$$S_V = \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b (t-\tau)} \text{sen} \omega_b (t - \tau) d\tau \right|_{max} \quad (2.29)$$

El desplazamiento espectral de respuesta, S_D , se relaciona con la pseudo - velocidad, a través de, la frecuencia natural ω_b , dado por la ecuación:

$$S_V = \omega_b S_D \quad (2.30)$$

Bajo la misma suposición de que el sistema tiene un coeficiente de amortiguamiento, β_b menor que 20% del amortiguamiento crítico, se puede establecer una relación entre la pseudo - aceleración de respuesta, S_A y el desplazamiento espectral de respuesta, S_D ; mediante la siguiente ecuación:

$$S_A = \omega_b^2 S_D \quad (2.31)$$

B) Ecuaciones de Movimiento de Sistemas con Múltiples Grados de Libertad

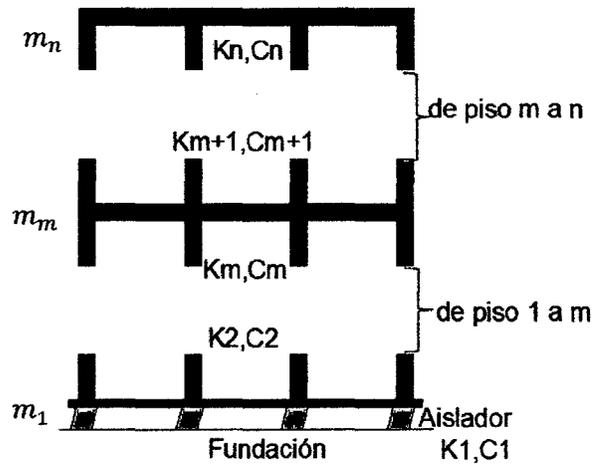


Figura 2. 13: Sistema de Múltiples Grados de Libertad (Adaptado de la ref. 18).

El movimiento a nivel de techo lo definimos como "n". Como en el caso del sistema de un grado de libertad, este sistema se lo puede representar como un sistema de masa resorte y cuyas ecuaciones se presentan a partir de esta idealización:

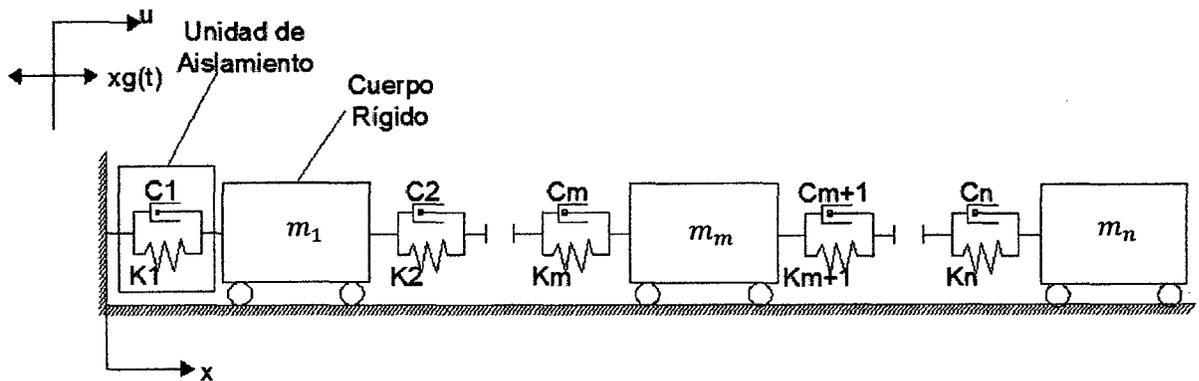


Figura 2. 14: Sistema Idealizado para Múltiples Grados de Libertad (Adaptado de la ref. 18).

Dada la ecuación de equilibrio, el movimiento a nivel de techo "n" es:

$$m_n \ddot{u}_n + c_n (\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}) + k_n (u_n - u_{n-1}) = 0 \quad (2.32)$$

Donde:

m_n = Masa en el techo

c_n = Coeficiente de Amortiguamiento

k_n = Rigidez entre el piso debajo del techo y el techo

u_n = Desplazamiento en techo

u_{n-1} = Piso debajo del techo

Las dos últimas representan la deriva del techo y el piso debajo del techo. Entonces la ecuación del movimiento para el piso "m", se expresa:

$$m_m \ddot{u}_m + c_m (\dot{u}_m - \dot{u}_{m-1}) - c_{m+1} (\dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m) + k_m (u_m - u_{m-1}) - k_{m+1} (u_{m+1} - u_m) = 0 \quad (2.33)$$

Donde:

m_m = Masa del piso m

c_m = Coeficiente de Amortiguamiento entre el piso m-1 y m

c_{m+1} = Coeficiente de Amortiguamiento entre el piso m y m+1

k_m = Rigidez entre el piso m-1 y m

k_{m+1} = Rigidez entre el piso m y m+1

Considerando el movimiento del terreno x_g , la ecuación del movimiento a nivel inmediatamente arriba del sistema de aislación (primer piso) será:

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 (\dot{u}_1 - \dot{x}_g) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_1 (u_1 - x_g) - k_2 (u_2 - u_1) = x_g \quad (2.34)$$

m_1 = Masa del primer piso

c_1 = Coeficiente de Amortiguamiento del sistema de aislamiento

c_2 = Coeficiente de Amortiguamiento entre el piso 2 y 1

k_1 = Rigidez del sistema de aislamiento

k_2 = Rigidez entre el piso 2 y 1

u_1 = Desplazamiento en nivel 1

u_2 = Desplazamiento en nivel 2

El desplazamiento relativo x_m , que relaciona el desplazamiento en cada piso y el movimiento del terreno. $x_m = u_m - x_g$. Las ecuaciones 2.32, 2.33 y 2.34, quedarían:

$$m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n (x_n - x_{n-1}) = -m_n \ddot{x}_g \quad (2.32a)$$

$$m_m \ddot{x}_m + c_m (\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1}) - c_{m+1} (\dot{x}_{m+1} - \dot{x}_m) + k_m (x_m - x_{m-1}) - k_{m+1} (x_{m+1} - x_m) = -m_m \ddot{x}_g \quad (2.33a)$$

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1x_1 - k_2(x_2 - x_1) = -m_1\ddot{x}_g \quad (2.34a)$$

Las ecuaciones anteriores pueden expresarse matricialmente como:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -\ddot{X}_g[M]\{1\} \quad (2.35)$$

La matriz de masa $[M]$ es simétrica y está definida de la siguiente manera:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & m_2 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \dots & & 0 & 0 & 0 \\ & & & m_m & & & \\ & & & & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{n-1} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (2.35a)$$

La matriz de amortiguamiento es:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & C_2 + C_3 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \dots & & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_m + C_{m+1} & & & \\ & & & & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & & & C_{n-1} + C_n & -C_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & C_n \end{bmatrix} \quad (2.35b)$$

La matriz de rigidez es:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & K_2 + K_3 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \dots & & 0 & 0 & 0 \\ & & & K_m + K_{m+1} & & & \\ & & & & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & & & K_{n-1} + K_n & -K_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & C_n \end{bmatrix} \quad (2.35c)$$

En la ecuación (2.35) $\{1\}$ es un vector unitario de dimensión $1 \times n$. Además $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{X\}$ representan el vector de aceleración, vector de velocidad y vector de desplazamiento relativo respectivamente de la estructura aislada sísmicamente.

$$\{x\}^T = \{x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m \quad \dots \quad x_{n-1} \quad x_n\} \quad (2.36)$$

$$\{\dot{x}\}^T = \{\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dots \quad \dot{x}_m \quad \dots \quad \dot{x}_{n-1} \quad \dot{x}_n\} \quad (2.36a)$$

$$\{\ddot{x}\}^T = \{\ddot{x}_1 \quad \ddot{x}_2 \quad \dots \quad \ddot{x}_m \quad \dots \quad \ddot{x}_{n-1} \quad \ddot{x}_n\} \quad (2.36b)$$

Dejamos que el desplazamiento relativo sea expresado como vector de respuesta generalizado definido como $\{x'\}$, por lo que la ecuación (2.36) es:

$$\{x\} = [\Phi]\{x'\} \quad (2.37)$$

Donde la matriz modal $[\Phi]$ es:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \dots & \phi_{1,m} & \dots & \phi_{1,n-1} & \phi_{1,n} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \dots & \phi_{2,m} & \dots & \phi_{2,n-1} & \phi_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{m,1} & \phi_{m,2} & \dots & \phi_{m,m} & \dots & \phi_{m,n-1} & \phi_{m,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{n-1,1} & \phi_{n-1,2} & \dots & \phi_{n-1,m} & \dots & \phi_{n-1,n-1} & \phi_{n-1,n} \\ \phi_{n,1} & \phi_{n,2} & \dots & \phi_{n,m} & \dots & \phi_{n,n-1} & \phi_{n,n} \end{bmatrix}$$

Si derivamos la ecuación (2.37) tenemos:

$$[[M]][\Phi]\{\ddot{x}'\} + [C][\Phi]\{\dot{x}'\} + [K][\Phi]\{x'\} = -\ddot{X}_g[M]\{1\} \quad (2.38)$$

Si la ecuación (2.38) la multiplicamos por $[\Phi]^T$ y dividimos entre $[\Phi]^T[M][\Phi]$, nos queda:

$$\{\ddot{x}'\} + \frac{[\Phi]^T[C][\Phi]}{[\Phi]^T[M][\Phi]}\{\dot{x}'\} + \frac{[\Phi]^T[K][\Phi]}{[\Phi]^T[M][\Phi]}\{x'\} = -\ddot{X}_g \frac{[M]\{1\}[\Phi]^T}{[\Phi]^T[M][\Phi]} \quad (2.38a)$$

El cociente de amortiguamiento en cada modo lo definimos como:

$$\beta_m = \frac{c_m}{2\omega_m m_m}, \text{ para } m=1 \text{ hasta } n, \text{ por lo que podemos escribir:}$$

$$\frac{[\Phi]^T[C][\Phi]}{[\Phi]^T[M][\Phi]} = \begin{bmatrix} 2\beta_1\omega_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ & 2\beta_2\omega_2 & & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & \dots & 0 & \dots & & 0 \\ & & & \dots & 2\beta_m\omega_m & \dots & \\ & & & & \dots & 0 & \\ & & & & & 2\beta_{n-1}\omega_{n-1} & 0 \\ & & & & & & 2\beta_n\omega_n \end{bmatrix} = [2\omega_b\beta_b] \quad (2.39)$$

Donde:

$[2\omega_b\beta_b]$ = matriz diagonal de dimensión nxn

Existe un fenómeno denominado amortiguamiento no clásico debido a la diferencia entre el amortiguamiento de la estructura y del sistema de aislamiento, siendo este mayor; por lo que las ecuaciones de amortiguamiento que lo encontramos normalmente en forma matricial como una matriz diagonal tenga componentes fuera de la diagonal, según esto, $\frac{[\Phi]^T[C][\Phi]}{[\Phi]^T[M][\Phi]} \neq [2\omega_b\beta_b]$.

Cabe resaltar que esto se da para valores mayores del 20%, por lo que si existieran dispositivos que aumentaran dicho amortiguamiento como por ejemplo los sistemas de aislamiento de alto amortiguamiento, aquí se tendría que realizar un análisis modal complejo para encontrar las soluciones.

Si los valores de amortiguamiento son menores de 20% se ha demostrado que los efectos del amortiguamiento de los componentes fuera de la diagonal son prácticamente despreciables para la mayoría de las estructuras.

Por lo tanto asumimos que los cocientes de amortiguamiento pueden ser desacoplados como se muestra en la ecuación (2.39).

Se logra así mismo una rigidez diagonal $[\omega^2]$, basada en las propiedades del sistema estructural:

$$\frac{[\Phi]^T[K][\Phi]}{[\Phi]^T[M][\Phi]} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ & \omega_2^2 & & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & \dots & 0 & \dots & & 0 \\ & & & \dots & \omega_m^2 & \dots & \\ & & & & & \dots & 0 \\ & & & & & & \omega_{n-1}^2 & 0 \\ & & & & & & & \omega_n^2 \end{bmatrix} = [\omega^2] \quad (2.39a)$$

En la ecuación (2.38a) se define el factor de participación modal

$$\Gamma = \frac{[M]\{1\}[\Phi]^T}{[\Phi]^T[M][\Phi]} \quad (2.39b)$$

Este factor también puede ser escrito como: $\Gamma = \{\Gamma_1 \dots \Gamma_m \dots \Gamma_n\}^T$. Donde: Γ_m representa el m-ésimo modo del factor de participación.

Las ecuaciones (2.39), (2.39a) y (2.39b) cumplen las condiciones de ortogonalidad, la ecuación (2.38a) puede ser expresada como una ecuación desacoplada y puede reescribirse:

$$\{\ddot{x}'\} + [2\omega_b\beta_b]\{\dot{x}'\} + [\omega^2]\{x'\} = -\ddot{X}_g\Gamma \quad (2.40)$$

La ecuación (2.40) es parecida a la (2.17) para un grado de libertad, siendo esta para un sistema de "n" grados de libertad y puede ser resuelta separadamente para cada m-ésimo modo de vibración.

$$\ddot{x}'_m + 2\beta_m\omega_m\dot{x}'_m + \omega_m^2x'_m = -\ddot{X}_g\Gamma_m = -\frac{[\Phi]_m^T[M]\{1\}}{[\Phi]_m^T[M][\Phi]_m}\ddot{X}_g \quad (2.40a)$$

Siendo $[\Phi]_m^T = \{\Phi_{1,m} \dots \Phi_{m,m} \dots \Phi_{n,m}\}$, y aplicando la integral de Duhamel la ecuación (2.40a) es obtenida para cada piso de la estructura aislada sísmicamente por lo que tenemos:

$$x'_m(t) = -\frac{1}{\bar{\omega}_m}\Gamma_m \int_0^t \ddot{x}_g(\tau)e^{-\beta_b\omega_b(t-\tau)}\text{sen}\bar{\omega}_m(t-\tau)d\tau \quad m=1, \dots, n \quad (2.41)$$

Siendo $\bar{\omega}_m = \omega_m\sqrt{1-\beta_m^2}$ es la frecuencia amortiguada para el m-ésimo modo, como se había comentado en secciones anteriores el factor que se encuentra en la raíz cuadrada es despreciable para la mayoría de las estructuras aisladas que no usan dispositivos de amortiguamiento, se procede de igual manera a usar la frecuencia

natural, ω_m , dado que es aproximadamente lo mismo que la amortiguada. De esta manera la ecuación (2.41) se simplifica y se expresa de la siguiente manera:

$$x'_m(t) = -\frac{1}{\omega_m} \Gamma_m \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\beta_b \omega_b(t-\tau)} \text{sen} \omega_m(t-\tau) d\tau \quad m=1, \dots, n \quad (2.41a)$$

Con la resolución de la ecuación (2.41a) obtenemos el vector de respuesta generalizado definido anteriormente como $\{x'\}$, en consecuencia podemos obtener $\{x\}$ de acuerdo a la ecuación (2.37), y los términos $\{\dot{x}\}$ y $\{\ddot{x}\}$, pueden obtenerse derivando las siguientes ecuaciones:

$$\{\dot{x}\} = [\Phi]\{\dot{x}'\} \quad (2.42)$$

$$\{\ddot{x}\} = [\Phi]\{\ddot{x}'\} \quad (2.43)$$

Todo el procedimiento anteriormente descrito se conoce como método de superposición de desplazamientos modales que es normalmente utilizado para estructuras convencionales que se encuentran empotradas al terreno pero ha demostrado que es aplicable también para sistemas de múltiples grados de libertad de estructuras aisladas sísmicamente que no presenten amortiguamientos mayores del 20%.

2.2.2.5. Modelos que representan el Comportamiento Dinámico de la Aislación sísmica

A) Modelo Lineal

La fuerza f ejercida por el aislador en la base del edificio, se puede representar por un amortiguamiento c_b y un coeficiente de rigidez K_b , este sistema lineal equivalente permite una solución numérica simple del problema, debido a la fácil modelación matemática del amortiguamiento. (Luis Bozzo y Ordoñez, 1996)(19)

$$f = c_b \dot{q}_b + k_b q_b \quad (2.44)$$

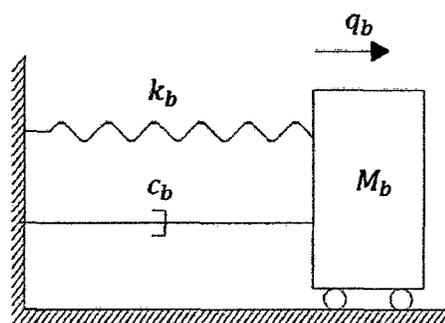


Figura 2. 15: Modelo Dinámico Lineal (Adaptado de la ref. 19)

Los dispositivos que incursionan en este modelo son los de tipo elastómero de neopreno reforzado de alto y bajo amortiguamiento.

B) Modelo No Lineal

Se sabe que la no linealidad de una edificación aislada proviene de las deformaciones inelásticas en el sistema de resistencia sísmica tanto de la estructura como del sistema de aislación, es por ello que se espera que estas deformaciones se encuentren en los aisladores a utilizar y la estructura localizada encima de éstos se comporte linealmente.

El dispositivo que incursiona en este tipo de modelo es el aislador elastómero con núcleo de plomo.

Existen dos modelos dinámicos que representan el comportamiento no lineal. Pero no ocuparemos sólo del modelo bilineal.

B.1. Modelo Bilineal

Este modelo caracteriza las propiedades mecánicas de los aisladores, así mismo es válido tanto para aisladores elastoméricos como de fricción.

Los parámetros utilizados para definir este modelo son:

La Rigidez Elástica k_e

Rigidez Post-fluencia k_p

Fuerza Característica Q

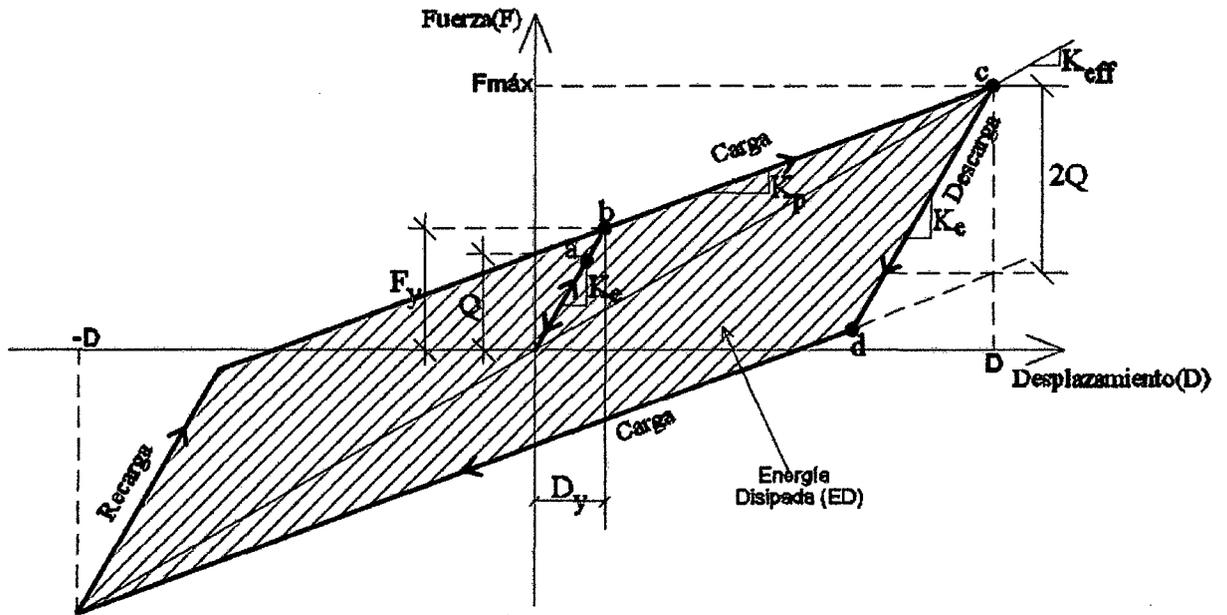


Figura 2. 16: Modelo Bilineal de un Aislador (Adaptado de la ref. 18)

La fuerza característica Q se utiliza frecuentemente para estimar la estabilidad del comportamiento histerético cuando el aislador experimenta muchos ciclos de carga.

La Figura 2.16 nos muestra que cuando actúa una fuerza cortante sobre el aislador, al principio presenta una relación lineal hasta antes de llegar al punto b , así mismo presenta una rigidez elástica (K_e); una vez que llega al punto b se produce la fluencia del aislador.

Ahora podemos observar que a partir del punto b se presentan pequeños incrementos de la fuerza cortante con grandes desplazamientos y su rigidez es la de post-fluencia (K_p).

Cuando ocurre una descarga como en este caso en el punto c , no regresa por el mismo camino sino por la ruta cd cuya rigidez es igual a la inicial; y si continúa el desplazamiento en d , la trayectoria es paralela a bc , por ende su rigidez es la misma (K_p).

A la Figura 2.16 le hemos adicionado algunos términos, tal como se puede observar en la Figura 2.17 para así deducir las siguientes fórmulas:

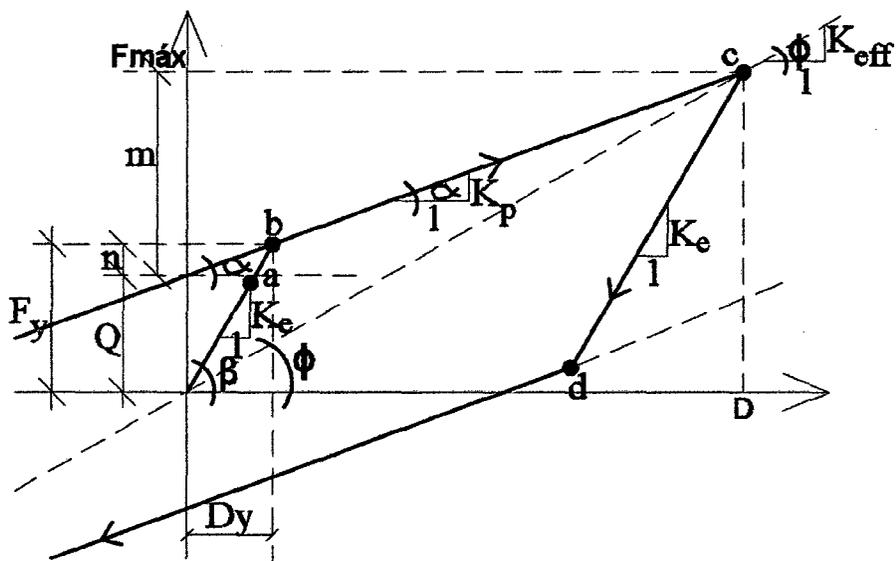


Figura 2. 17: Figura de apoyo para la deducción de fórmulas

- ❖ La rigidez efectiva, la cual estaría en función de la fuerza Q , la rigidez K_p y el desplazamiento lateral D .

Tenemos:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{F_{máx}}{D} = \frac{K_{eff}}{1} \quad (2.45)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m}{D} = \frac{K_p}{1} \quad (2.46)$$

Además según la Figura 2.17 la fuerza máxima ($F_{máx}$) es igual a:

$$F_{máx} = Q + m \quad (2.47)$$

Reemplazando la ecuación (2.46) en la ecuación (2.47) tenemos:

$$F_{máx} = Q + K_p \times D \quad (2.48)$$

Si Reemplazando la ecuación (2.48) en la ecuación (2.45), obtenemos:

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D} \quad (2.49)$$

- ❖ El desplazamiento de fluencia (D_y), que estaría en función de Q , K_p y K_e

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n}{D_y} = K_p \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{Q+n}{D_y} = K_e \quad (2.50)$$

Despejando n en la primera expresión de (2.50) y reemplazando en la segunda expresión, obtenemos:

$$tg\alpha \times D_y = n$$

$$tg\beta = \frac{Q + tg\alpha \times D_y}{D_y}$$

Despejando D_y :

$$D_y = \frac{Q}{(tg\beta - tg\alpha)} = \frac{Q}{(K_e - K_p)} \quad (2.51)$$

❖ La fuerza de fluencia (F_y)

Según la Figura 2.17:

$$F_y = Q + n$$

Reemplazando el valor de n de la primera expresión de (2.50) tenemos:

$$F_y = Q + K_p D_y \quad (2.52)$$

La fuerza de fluencia, D_y , sirve para encontrar la fuerza de fluencia, F_y , a su vez ésta última sirve para introducir al programa ETABS v.9.7.0., en las propiedades no lineales del aislador elastomérico, que se explicará en el diseño más adelante.

❖ El amortiguamiento efectivo, β_{eff}

El amortiguamiento que se produce cuando un movimiento telúrico impulsa a una estructura en el rango inelástico puede ser visto como una combinación de amortiguamiento viscoso que es inherente a la estructura y el amortiguamiento de histéresis. El Amortiguamiento de histéresis está relacionada con el área dentro del ciclo que se forma cuando la fuerza del terremoto (cortante en la base) se traza vs. el desplazamiento de la estructura. El Amortiguamiento de histéresis se puede representar como el amortiguamiento viscoso equivalente. El amortiguamiento viscoso equivalente, β_{eq} , asociada con un desplazamiento máximo D , puede estimarse a partir de la siguiente ecuación (32):

$$\beta_{eq} = \beta_{eff} + 0.05 \text{ (Ecuación 8.5 del ATC-40)} \quad (2.53)$$

Donde:

β_{eff} = amortiguamiento histerético representado como amortiguamiento viscoso equivalente. (Este vendría a ser el amortiguamiento efectivo)

0.05=5% de amortiguamiento viscoso inherente a la estructura (asumido para ser constante)

El término β_{eff} puede ser calculado como:

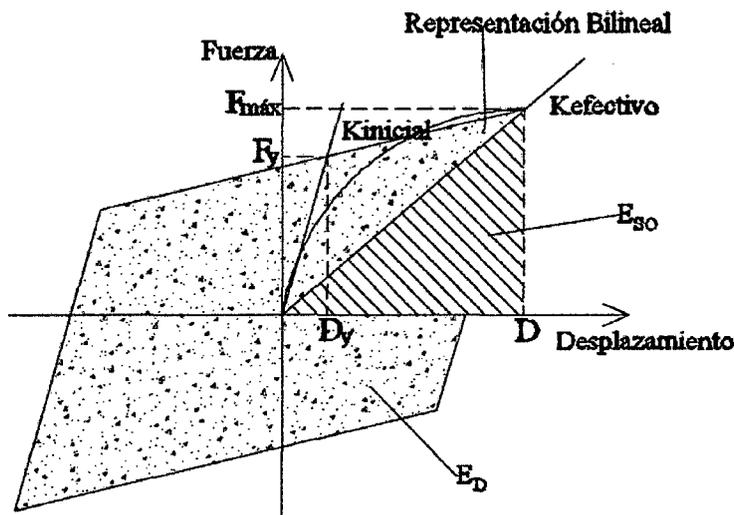
$$\beta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (\text{Ecuación 8.5 del ATC-40}) \quad (2.54)$$

Donde:

E_D = Energía disipada debido al amortiguamiento

E_{S0} = Máxima energía de deformación, que para el caso de un aislador es la energía potencial máxima.

El significado físico de los términos E_D y E_{S0} en la ecuación (2.54), se ilustra en la siguiente figura:



E_D = Energía disipada por amortiguamiento

Área encerrada del ciclo de histéresis

Área del paralelogramo

E_{S0} = Máxima energía de deformación

Área sombreada del triángulo

$F_{máx}D/2$

β_0 = Amortiguamiento viscoso equivalente asociado con el área del ciclo de histéresis

Figura 2. 18: Ilustración de los términos E_D y E_{S0} para la deducción del amortiguamiento viscoso equivalente (Adaptado a la ref. 32)

Como podemos observar en la figura (2.18) E_D , es la energía disipada por la estructura en un ciclo de movimiento que es el área encerrada por un ciclo histerético y E_{S0} es la máxima energía potencial y está dada por el área del triángulo.

Para ayudarnos a la deducción tanto del amortiguamiento efectivo como de la energía disipada, utilizaremos adicionalmente, la siguiente figura:

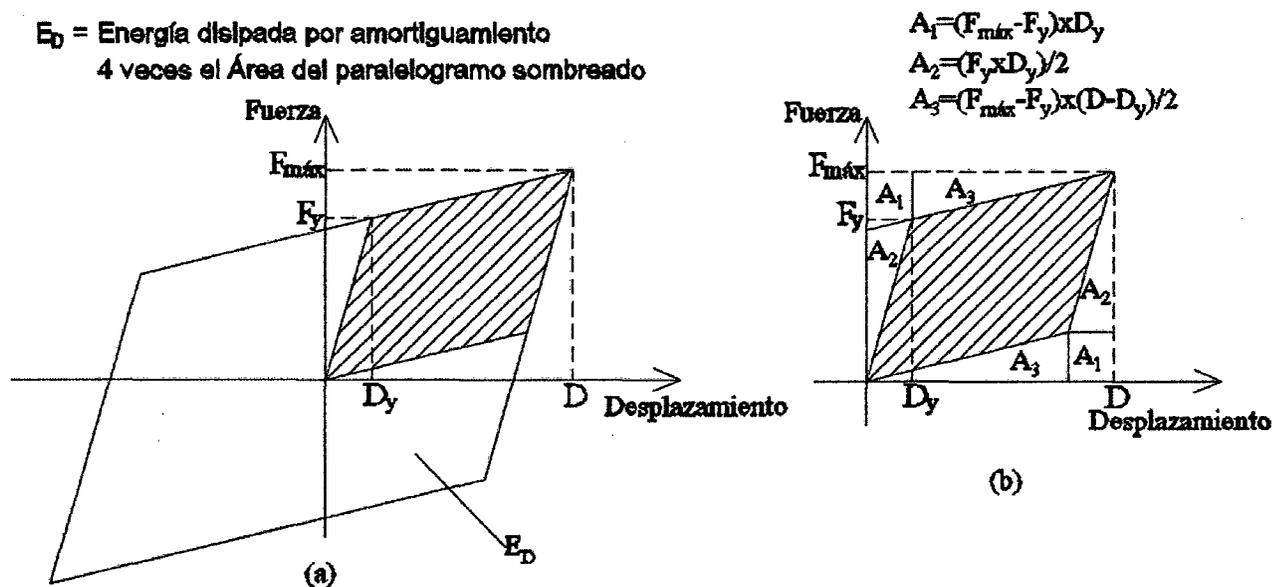


Figura 2. 19: Derivaci3n de la Energ3a Disipada por Amortiguamiento (Adaptado de ref.32)

De acuerdo a la Figura 2.19 a:

$$E_D = 4 \times (\text{Área del paralelogramo sombreado}) \quad (2.55)$$

Y con la ayuda de la Figura 2.19 b, sabemos que:

$$\text{Área del paralelogramo sombreado} = F_{m\acute{a}x}D - (2A_1 - 2A_2 - 2A_3) \quad (2.56)$$

Reemplazando los valores de A_1 , A_2 y A_3 , presentados en la Figura 2.19b, n la ecuaci3n (2.56) tenemos:

$$\text{Área sombreada} = F_{m\acute{a}x}D - [2(F_{m\acute{a}x} - F_y)D_y - 2\left(\frac{F_y D_y}{2}\right) - 2\left(\frac{(F_{m\acute{a}x} - F_y) \times (D - D_y)}{2}\right)]$$

$$\begin{aligned} \text{Área sombreada} &= F_{m\acute{a}x}D - 2F_{m\acute{a}x}D_y + 2F_y D_y - F_y D_y - F_{m\acute{a}x}D + F_{m\acute{a}x}D_y + F_y D - F_y D_y \\ \text{Área sombreada} &= F_y D - F_{m\acute{a}x}D_y \end{aligned} \quad (2.57)$$

Reemplazando la ecuaci3n (2.57) en (2.55) tenemos:

$$E_D = 4 \times (F_y D - F_{m\acute{a}x}D_y) \quad (2.58)$$

Si despejamos K_p de la ecuaci3n (2.52) y lo reemplazamos en la ecuaci3n (2.49), podemos obtener:

$$K_{eff} = \frac{(F_y - Q)}{D_y} + \frac{Q}{D}$$

$$QD - QD_y = F_y D - K_{eff} D D_y \quad (2.59)$$

Sabemos que $K_{eff} D = F_{máx}$, reemplazando entonces esta expresión en (2.59), tenemos:

$$QD - QD_y = F_y D - F_{máx} D_y \quad (2.60)$$

Por último si reemplazamos (2.60) en la ecuación (2.58), obtenemos:

$$E_D = 4Q(D - D_y) \quad (2.61)$$

Ahora nos falta hallar E_{S0} , que mediante la Figura (2.18), podemos decir que es:

$$E_{S0} = \frac{F_{máx} D}{2} \quad (2.62)$$

Pero si también utilizamos la expresión $K_{eff} D = F_{máx}$, y reemplazamos en la ecuación anterior, nos queda:

$$E_{S0} = \frac{K_{eff} D^2}{2} \quad (2.63)$$

Si reemplazamos las ecuaciones (2.61) y (2.63) en la ecuación (2.54), podremos obtener el amortiguamiento efectivo deseado:

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi \times K_{eff} D^2} \quad (2.64)$$

Como hemos elegido en la presente investigación el aislador elastomérico de tipo de alto amortiguamiento presentaremos a continuación su modelo bilineal.

B.1.1. Modelo Bilineal de un Aislador Elastomérico de Alto Amortiguamiento

Para poder tener un mejor entendimiento de este modelo se tiene que explicar las características mecánicas de los aisladores elastoméricos:

La característica mecánica más importante de estos aisladores es la rigidez horizontal representada por K_H y esta dada por la siguiente ecuación (17):

$$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad (2.65)$$

Donde:

G = Módulo de cortante del elastómero

A = Área de la sección transversal completa

t_r = Espesor total de la goma

El máximo desplazamiento horizontal D se relaciona con la máxima deformación por cortante γ , a través de (17):

$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (2.66)$$

La rigidez vertical k_v y la rigidez de flexión, que se expresa como EI por analogía con la teoría de vigas, también se encuentra a través de la teoría elástica y es un parámetro que se necesita para el diseño del aislador.

La frecuencia vertical de una estructura aislada, frecuentemente es un importante criterio de diseño, está controlado por la rigidez vertical del aislador que comprime el sistema.

Un análisis lineal me permitirá calcular con precisión la rigidez vertical del aislador bajo una carga muerta especificada y por ende predecir la frecuencia vertical.

Otra propiedad importante del aislador que debe ser analizada para el diseño es el comportamiento de pandeo del aislador. Para poder realizar este análisis, la respuesta del aislador comprimido por el momento de flexión es necesaria.

Llamado como "rigidez de flexión" puede determinarse a través de una extensión del mismo análisis que se hace para determinar la rigidez vertical, cuya fórmula es (17):

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (2.67)$$

A = área de la sección transversal del aislador (debe tomarse el área de las placas metálicas)

t_r = Espesor total de la goma en el aislador

E_c = Módulo de compresión instantánea del compuesto de goma-acero bajo el nivel específico de carga vertical.

Este valor para una sola capa de goma está controlado por el factor de forma S :

$$S = \frac{\text{Area cargada}}{\text{Area libre de fuerzas}}$$

Este factor es una medida adimensional de la relación de aspecto de una sola capa del elastómero (17).

$$S = \frac{b}{t} \quad (2.68)$$

Tabla 2. 1: Factor de Forma "S" y Módulo de Compresión E_c según la geometría del aislador [Naeim y Kelly, 1999(17)]

Factor de Forma S	
Para un cojín circular de diámetro θ o radio R y espesor t	Para un cojín cuadrado o de dimensión "a" y espesor t
$S = \frac{\theta}{4t}$ o $S = \frac{R}{2t}$ (2.69)	$S = \frac{a}{4t}$ (2.70)
Módulo de compresión E_c	
Cojín de forma circular	Cojín de forma cuadrada
$E_c = 6GS^2$ (2.71)	$E_c = 6.73GS^2$ (2.72)

En algunos casos los aisladores son diseñados con hoyos en los centros del cojín. El módulo de compresión E_c para un aislador con un radio interior "a" y un radio exterior "b" está dado por (17):

$$E_c = 4GS^2 \quad (2.73)$$

Cuando el factor de forma del aislador es mayor de 10, el efecto de la compresibilidad en el caucho se vuelve importante. La compresibilidad puede ser incorporada en las ecuaciones anteriores a través de la siguiente ecuación (17):

$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2+K} \quad (2.74)$$

Considerando que en una viga la distribución de esfuerzos por flexión es lineal. En el caso de un cojín cuadrado el valor efectivo de EI es muy cercano a un tercio de valor de EI para una viga por lo tanto (17):

$$(EI)_{eff} = E_c(0.3291) \quad (2.75)$$

Para un cojín circular con un hoyo en el centro esta ecuación es (17):

$$(EI)_{eff} = 2GS^2I \frac{(b+a)^2}{b^2-a^2} \quad (2.76)$$

Los parámetros usados para generar el modelo bilineal de un aislador elastomérico de alto amortiguamiento son derivados del módulo de cortante G y el amortiguamiento efectivo β_{eff} .

Como sabemos el amortiguamiento efectivo de éstos dispositivos varía entre el 10% y el 20% del amortiguamiento crítico y el módulo de cortante G es determinado en laboratorios a través de una prueba dinámica de cortante.



Figura 2. 20: Esquema representativo para deducir la fórmula de rigidez

$$k_p = \frac{GA_b}{t} \quad (2.77)$$

Donde:

A_b = El área de caucho

t = Espesor total del caucho.

A continuación deducimos las fórmulas pertenecientes al sistema bilineal del aislador elastomérico de alto amortiguamiento:

- ❖ La fuerza característica está definida por:

De la ecuación (2.64) despejamos Q

$$Q = \frac{B_{eff}\pi \times K_{eff} D^2}{2(D-D_y)} \quad (2.78)$$

Siendo:

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D}$$

Reemplazamos en la ecuación (2.78) y obtenemos:

$$Q = \frac{B_{eff}\pi \times K_{eff} D^2}{(2-\pi B_{eff}) D D - 2D_y} \quad (2.79)$$

Donde: D_D = Desplazamiento de Diseño

- ❖ El desplazamiento de fluencia D_y se puede estimar de una manera aproximada, apoyada de los resultados de las pruebas de la siguiente manera (expresada en términos del espesor total de la goma).

$$D_y = \lambda t \quad (2.80)$$

Donde: $0.05 \leq \lambda \leq 0.1$

- ❖ La rigidez elástica del aislador de alto amortiguamiento

De acuerdo a la Figura 2.16 sabemos que:

$$k_e = \frac{F_y}{D_y} = K_p + \frac{Q}{D_y} = K_p + \frac{B_{eff}\pi \times K_{eff}D_D^2}{(2 - \pi B_{eff})D_D - 2\lambda t}$$

$$k_e = K_p \left\{ 1 + \frac{B_{eff}\pi \times K_{eff}D_D^2}{\lambda t[(2 - \pi B_{eff})D_D - 2\lambda t]} \right\} \quad (2.81)$$

- ❖ La rigidez efectiva del aislador de alto amortiguamiento

Si sustituimos en la ecuación 2.49, la rigidez efectiva en el desplazamiento de diseño estará dada por:

$$K_{eff} = \frac{2Q(D_D - \lambda t)}{\pi \beta_{eff} D_D^2} \quad (2.82)$$

2.2.2.6. Pandeo Crítico de Aisladores Elastoméricos

Debido a la baja rigidez del cortante del aislador, los aisladores elastoméricos son susceptibles a inestabilidad por pandeo parecida a la que se da en una columna (33). A continuación se presentan algunas ecuaciones que me sirven para verificar la estabilidad del aislador elastomérico:

Tabla 2. 2: Ecuaciones para el cálculo de la Estabilidad de Aisladores Elastoméricos
 (Adaptado de ref. 33)

Nombre	Fórmula
Cortante por unidad de longitud	$P_s = GA_s \quad (2.83)$
Área de cortante efectivo	$A_s = A \frac{h}{t_r} \quad (2.84)$
Rigidez horizontal	$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad (2.85)$

Carga de Pandeo	$P_E = \frac{\pi^2}{h^2} E_C I \frac{h}{t_r}$ (2.86)
Carga Crítica	$P_{crit} = \sqrt{P_E P_S}$ (2.87)
Factor de seguridad	$F_{seg} = \frac{P_{crit}}{W}$ (2.88)
Influencia de carga vertical en rigidez horizontal	$K_H = K_H \left[1 - \left(\frac{W}{P_{crit}} \right)^2 \right]$ (2.89)

Donde:

G= Módulo de elasticidad del elastómero

A_S =Área de cortante efectivo

A = Área de sección transversal del aislador

h = Altura total del aislador incluyendo acero

t_r = Altura total de caucho

2.3. ECUACIONES DE MOVIMIENTO PARA ESTRUCTURAS CON AISLADORES EN PISOS INTERMEDIOS

Para la presente tesis se ha propuesto colocar los aisladores tanto a nivel de cimentación como en entrepiso para poder comparar los resultados y así tener una mejor apreciación sobre la más adecuada ubicación de dichos aisladores en consecuencia plantear una solución óptima a las estructuras que tienden a fallar por piso blando.

Ahora bien en las investigaciones hechas por Aguiar Falconí y colaboradores (20), propone que los aisladores sísmicos sean colocados encima del piso blando, con la finalidad de separar la estructura encima de la aislación sísmica de la parte inferior, basándose en los conceptos básicos de éstos dispositivos.

A continuación se presentan algunas ecuaciones del movimiento para estructuras con aisladores en pisos intermedios, con el fin de demostrar sólo una similitud de comportamiento si los aisladores fuesen colocados en la base de la edificación. Cabe resaltar que las ecuaciones dadas a continuación son sacadas del libro Aisladores de Base Elastoméricos y FPS, Aguiar Falconí y colaboradores (20).

En este caso, los sistemas presentan tres componentes los cuales son: subestructura, que corresponde a los pisos debajo de los aisladores; la aislación que es el interface y por último la superestructura que es lo que se encuentra encima de la aislación (20).

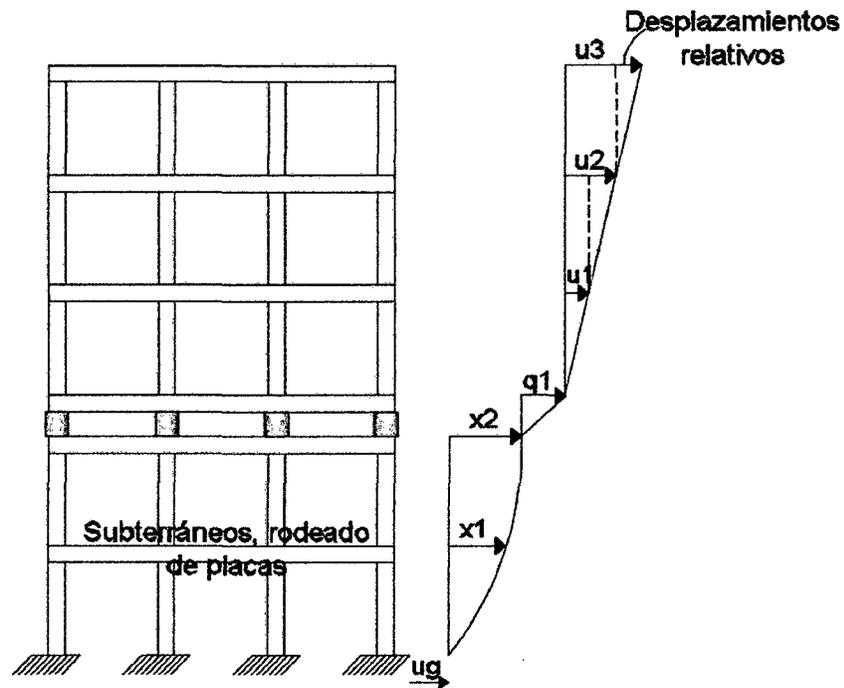


Figura 2. 21: Idealización de sistema de Aislación en entrepiso (Adaptado de ref. 20)

En la Figura 2.21 se ha denominado con "x" los grados de libertad de la subestructura, con "q" los del sistema de aislación y con "u" los de la superestructura. Como se está trabajando con pórticos en 2D, se considera un desplazamiento horizontal para cada pórtico, de cada nivel. Es decir sólo un grado de libertad por piso, entonces los desplazamientos totales de cada piso son:

$$u_3^t = u_g + x_2 + q_1 + u_3$$

$$u_2^t = u_g + x_2 + q_1 + u_2$$

$$u_1^t = u_g + x_2 + q_1 + u_1$$

$$q_1^t = u_g + x_2 + q_1$$

$$x_2^t = u_g + x_2$$

$$x_1^t = u_g + x_1$$

Siendo:

- $u_3^t =$ desplazamiento total en el piso n° 3 debido a una acción sísmica
- $u_2^t =$ desplazamiento total en el piso n° 2 debido a una acción sísmica
- $u_1^t =$ desplazamiento total en el piso n° 1 debido a una acción sísmica
- $q_1^t =$ desplazamiento total en el sistema de aislación
- $x_2^t =$ desplazamiento total en la subestructura 2
- $x_1^t =$ desplazamiento total en la subestructura 1

Las ecuaciones anteriores expresadas matricialmente resultan:

$$\begin{bmatrix} u_4^t \\ u_3^t \\ u_2^t \\ u_1^t \\ q_1^t \\ x_1^t \\ u_g^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_4 \\ u_3 \\ u_2 \\ u_1 \\ q_1 \\ x_1 \\ u_g \end{bmatrix}$$

$r^s = \text{○}$ $r^b = \text{○}$
 $r^i = \text{○}$

Se ha particionado la matriz de acuerdo al número de grados de libertad de la superestructura, para el ejemplo se tienen 3 grados de libertad, u, por lo que se ha particionado en la tercera fila y tercera columna; luego se tiene un grado de libertad "q" y dos grados de libertad de la subestructura. Con esta partición y al agrupar los desplazamientos en los vectores q, x, u, se tiene:

$$\begin{bmatrix} u^t \\ q^t \\ x^t \\ x_g^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & r^{(s)} & r^{(s)}r^{(b)} & r^{(s)}r^{(b)}r^{(i)} \\ 0 & I & r^{(b)} & r^{(b)}r^{(i)} \\ 0 & 0 & I & r^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \\ x \\ u_g \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

Donde:

$r^{(i)}$ = desplazamientos de la subestructura debido a la deformada elemental del suelo $u_g = 1$

$r^{(b)}$ = desplazamientos del sistema de aislación debido a la deformada elemental en cada coordenada de la superestructura.

Las deformadas elementales se hallan haciendo que una de las coordenadas valga la unidad y las restantes cero.

$r^{(s)}$ = desplazamientos de la superestructura debido a la deformada elemental del sistema de aislación.

En la ecuación (2.90) se ha utilizado la nomenclatura de Seguin (2007).

Las matrices para $r^{(i)}$, $r^{(b)}$, $r^{(s)}$ son:

$$r^{(i)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad r^{(b)} = [1 \quad 0] \quad r^{(s)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La ecuación (2.90) se reescribe de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} u' \\ q' \\ x' \\ x'_g \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u \\ q \\ x \\ u_g \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

Dónde: T es la matriz de paso de coordenadas relativas a coordenadas totales.

Sean las matrices M, C, K y Q las matrices de masa, amortiguamiento, rigidez y vector de cargas en coordenadas totales y M^* , C^* , K^* y Q^* en coordenadas relativas, entonces de acuerdo a la dinámica de estructura y el análisis matricial se puede expresar (20):

$$M^* = T^t M T \quad (2.92)$$

$$C^* = T^t C T \quad (2.93)$$

$$K^* = T^t K T \quad (2.94)$$

$$Q^* = T^t Q \quad (2.95)$$

La matriz T es:

$$T = \begin{bmatrix} I & r^{(s)} & r^{(s)}r^{(b)} \\ 0 & I & r^{(b)} \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad \rightarrow T^t = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ r^{(s)t} & I & 0 \\ r^{(b)t}r^{(s)t} & r^{(b)t} & I \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

A) Cálculo de M^*

La matriz de masas M que se obtiene al trabajar con coordenadas totales (con respecto al suelo), es:

$$M = \begin{bmatrix} M^{(s)} & 0 & 0 \\ 0 & M^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & M^{(i)} \end{bmatrix}$$

Donde:

$M^{(s)}$ es una matriz diagonal compuesta por las masas de la superestructura

$M^{(b)}$ es una matriz diagonal compuesta por la masa del sistema de aislación

$M^{(i)}$ es una matriz diagonal compuesta por las masas de la subestructura

Al realizar el producto indicado en la ecuación (2.92), obtenemos:

$$M^* = \begin{bmatrix} M^{(s)} & M^{(s)}r^{(s)} & M^{(s)}r^{(s)}r^{(b)} \\ r^{(s)t}M^{(s)} & r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b & (r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b)r^{(b)} \\ r^{(b)t}r^{(s)t}M^{(s)} & r^{(b)t}(r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b) & r^{(b)t}(r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b)r^{(b)} + M^i \end{bmatrix} \quad (2.97)$$

B) Sistema de Ecuaciones Diferenciales

De igual manera se trabaja con las matrices de rigidez y amortiguamiento, por lo que la ecuación del movimiento queda expresada de la siguiente forma general para cualquier grado de libertad u , q y x .

La generalización nace a partir de la ecuación usual de movimiento de una estructura debido a la excitación sísmica, es decir: $ma + cv + kx = m\ddot{u}_g$.

En la ecuación (2.93) y (2.94), el $T=I$.

$$\begin{bmatrix} M^{(s)} & M^{(s)}r^{(s)} & M^{(s)}r^{(s)}r^{(b)} \\ r^{(s)t}M^{(s)} & r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b & (r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b)r^{(b)} \\ r^{(b)t}r^{(s)t}M^{(s)} & r^{(b)t}(r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b) & r^{(b)t}(r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b)r^{(b)} + M^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{q} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^{(s)} & 0 & 0 \\ 0 & C^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & C^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{(s)} & 0 & 0 \\ 0 & K^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & K^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \\ x \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M^{(s)}r^{(s)}r^{(b)} \\ (r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b)r^{(b)} \\ r^{(b)t}(r^{(s)t}M^{(s)}r^{(s)} + M^b)r^{(b)} + M^i \end{bmatrix} r^{(i)}\ddot{u}_g \quad (2.98)$$

Donde:

$C^{(s)}$, $C^{(b)}$ y $C^{(i)}$ son las matrices de amortiguamiento de la superestructura, aislamiento y subestructura.

$K^{(s)}$, $K^{(b)}$ y $K^{(i)}$ son las matrices de rigidez de la superestructura, aislamiento y subestructura.

Por lo tanto el análisis sísmico de una estructura con aislación en pisos intermedios se realiza mediante la siguiente ecuación diferencial. (Seguin, 2007).

$$\bar{M} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{q} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \bar{C} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \bar{K} \begin{bmatrix} u \\ q \\ x \end{bmatrix} = -\bar{Q}\ddot{u}_g$$

2.4. PROPUESTA PLANTEADA EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se ha propuesto utilizar aisladores de tipo elastoméricos para solucionar las fallas que generan la presencia de irregularidad por piso blando ante un sismo, de una edificación multifamiliar.

En la primera propuesta, ubicaremos los aisladores elastoméricos, en la base del edificio en estudio, previamente realizando un reforzamiento con muros de corte, para así mejorar la eficiencia de dichos aisladores.

En una segunda propuesta, utilizaremos los aisladores elastoméricos encima de las columnas del piso con irregularidad de rigidez - piso blando, apoyándose así también, dichos dispositivos sobre los muros de corte, ubicados perimetralmente, en ambos sentidos y entre columnas.

Se ha planteado estas dos propuestas, con el fin de analizar y evaluar cómo se comportan los aisladores, en las distintas ubicaciones, en un edificio con irregularidad de piso blando, ante un evento sísmico; comparando los resultados y discutiendo los mismos. Estas dos propuestas se las puede observar en la siguiente figura:

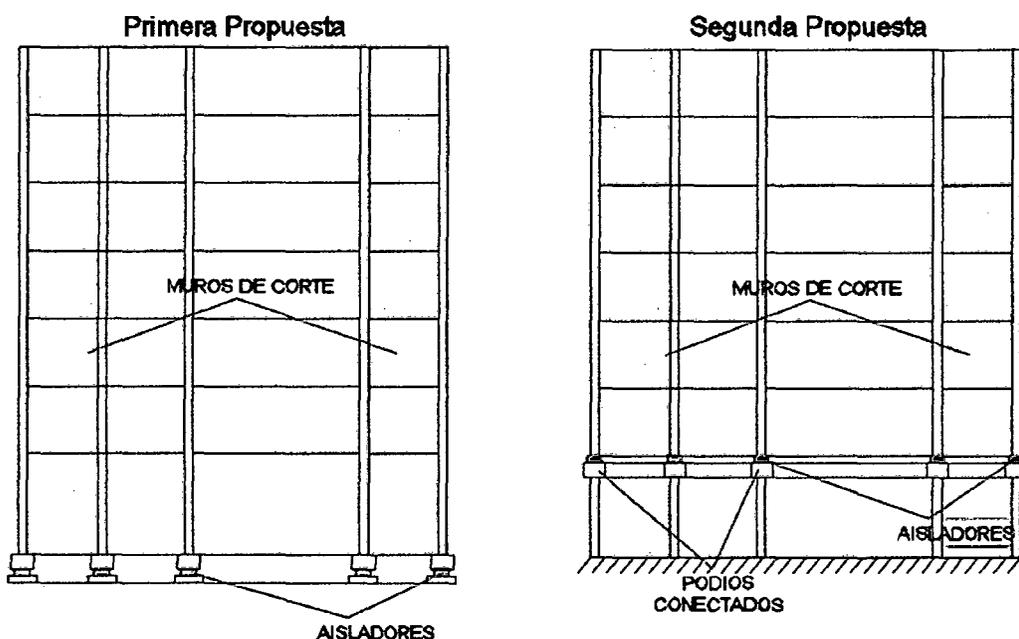


Figura 2. 22: Propuesta de solución para la irregularidad de piso blando de una edificación, planteada en la presente investigación

2.5. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES CON IRREGULARIDAD DE PISO BLANDO

En nuestra norma NTE-E.030,2003 en el capítulo VII nos indica que las estructuras dañadas por efectos del sismo deben ser evaluadas y reparadas de tal manera que se corrijan los posibles defectos estructurales que provocaron la falla y recuperen la capacidad de resistir un nuevo evento sísmico, acorde con los objetivos del diseño sismorresistente. Pero no nos limita a seguir a un proceso de evaluación, en cambio nos indica que podemos emplear otros criterios y procedimientos diferentes indicados en la norma, con la debida justificación.

Como la falla por piso blando se relaciona con la discontinuidad de resistencia y rigidez a lo alto de los edificios, evaluaremos estas componentes antes de modelar la edificación en el programa. Cabe resaltar que en nuestra norma E.060, 2003 en el capítulo 20 menciona la evaluación de la resistencia de estructuras existentes, o que están en construcción. Por lo que en base a nuestra norma E.060 (9) y apoyándonos de una tesis realizada según la norma colombiana NSR-10 (21), realizaremos el siguiente procedimiento:

- a. Información Preliminar: Para poder realizar una buena evaluación es necesario recaudar la mayor información que se tenga del edificio en estudio es decir realizando mediciones directas, inspecciones, estimativos y comparación con los planos existentes. Pero esta evaluación se lo realiza siempre y cuando existiesen dudas respecto de la seguridad de una estructura o de algunos de sus elementos o si se necesita información acerca de la capacidad de carga de una estructura en servicio para fijar sus límites de carga, se podrá efectuar una evaluación de la resistencia estructural ya sea por análisis, empleando pruebas de carga o por una combinación de ambos procedimientos, tal como lo indica la sección 20.1.1, del capítulo 20 de la norma E.060. (9)
- b. Diagnóstico y análisis estructural: para poder realizar un buen diagnóstico de la estructura se tiene que seguir los siguientes pasos:
 - b.1. Levantamiento estructural: es decir se lo realiza in situ la identificación de los elementos estructurales, dimensiones y caracterización de cada piso, para así poder comparar con los planos.
 - b.2. Propiedades y características de los materiales (9): Deben comprobarse en obra las dimensiones de los elementos estructurales. La ubicación y tamaño de las barras de refuerzo, refuerzo electrosoldado de alambre deben determinarse a través de mediciones. Para la ubicación del refuerzo se puede utilizar los planos disponibles siempre que se realicen verificaciones puntuales para confirmar la información de los planos.

Si se requiere, la resistencia del concreto debe basarse en resultados de ensayos confiables tomadas durante la construcción o de ensayos de núcleos extraídos en la parte de la estructura cuya resistencia está en duda. Como podemos ver nuestra norma nos indica utilizar un ensayo destructivo para obtener la resistencia del concreto. Pero tenemos que añadir la existencia de otros ensayos para obtener la resistencia de concreto, tales como: Ensayo de Esclerómetro, ensayo no destructivo que me permite mediante el número de rebotes del esclerómetro obtener la resistencia del concreto (21), Ensayo de Carbonatación, Inspección de Refuerzo, etc.

- c. Evaluación de resistencia y rigidez: Una vez realizado todos los ensayos pertinentes para obtener datos, en esta etapa se utilizará un programa computacional para obtener así los índices de flexibilidad y sobreesfuerzo. (21) El índice de flexibilidad lo podemos obtener a partir de los datos obtenidos en el programa de desplazamientos y derivas, es decir realizando el cociente entre la máxima deriva obtenida y la permitida según nuestra norma (NTE - E.030, 2003).

$$\text{Índice de Flexibilidad} = \frac{\text{Máxima Deriva obtenida (programa)}}{\text{Máxima deriva permitida (según norma)}} \leq 1 \quad (2.99)$$

El índice de sobreesfuerzo se calcula de manera similar siendo el cociente entre las solicitaciones mayoradas y la resistencia efectiva del elemento, es decir cuando el refuerzo que se requiere excede al refuerzo que puede soportar un elemento, existe un sobreesfuerzo. En el programa ETABS V.9.7.0, nos presenta esta definición mediante colores, si un elemento está sobreesforzado o no, así por ejemplo el color rojo representa un índice mayor a uno, lo cual indica un sobreesfuerzo, por lo que se debe aumentar las dimensiones de dicho elemento en muchos casos o realizar un estudio de reforzamiento en la estructura. Éste índice, lo podemos representar de la siguiente manera:

$$\text{Índice de Sobreesfuerzo} = \frac{\text{Refuerzo requerido}}{\text{Refuerzo permitido}} \leq 1 \quad (2.100)$$

2.6. GLOSARIO DE TÉRMINOS

- a. Sistema de Aislamiento: Es el conjunto de elementos estructurales que incluye todas las unidades de aislamiento individual, todos los elementos estructurales que obligan a la transferencia entre los elementos del sistema de aislamiento, y todas las conexiones con otros elementos estructurales. El sistema de aislamiento incluye también el sistema de vientos de moderación si este sistema se utiliza para satisfacer los requisitos de diseño de esta sección.
- b. Rótulas plásticas: Fenómeno que se forma cuando en la sección más solicitada de una estructura se produce plastificación.

- c. Piso Blando: Irregularidad que se genera cuando una planta o piso posee una rigidez lateral inferior a la de las plantas superiores, generando fallas, incluso llegando al colapso.
- d. Interfaz de aislamiento: El límite entre la parte superior de la estructura, que está aislado, y la parte inferior de la estructura, que se mueve rígidamente con el suelo.
- e. Variables dicotómicas: son parte de las variables llamadas Cualitativas, es decir que manifiestan o traducen una modalidad llamada atributo o categoría que sólo permiten manejar dos variables o sólo se tiene dos opciones como blanco y negro.
- f. Resistencia de fluencia: Esfuerzo máximo necesario para provocar una determinada cantidad de fluencia en un período específico. También se utiliza para describir el esfuerzo máximo que se puede generar en un material a temperatura constante bajo el cual la velocidad de fluencia disminuye con el tiempo. Sinónimo de límite de fluencia.
- g. Dispositivos deslizantes de teflón: Son un tipo de aisladores sísmicos que poseen una superficie de deslizamiento (frictional slider) que permite la disipación de energía por medio de las fuerzas de rozamiento.
- h. Muro de corte: También conocidos como placas, son paredes de concreto armado que dada su mayor dimensión en una dirección, mucho mayor que su ancho, proporcionan en dicha dirección una gran resistencia y rigidez lateral ante movimientos laterales.
- i. Reforzamiento: Es el proceso de incrementar la capacidad de la estructura, aumentando elementos o añadiendo nuevos. En el refuerzo de una estructura (con o sin daño) se mejoran las características estructurales sobre las originales. Es toda operación para incrementar el desempeño estructural del elemento por encima de su desempeño original.
- j. Rehabilitación: Significa hacer un cambio a la estructura para que cumpla con sus funciones nuevamente. No sólo se refiere al aspecto estructural, sino también a las funciones sociales y económicas para las que fue construida. Es el proceso de reparación o modificación de una estructura a una condición útil deseada. Es una expresión general utilizada para reparar, reforzar o restaurar.
- k. Histéresis: Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

- l. Rigidez lateral: La rigidez de un entrepiso es la relación entre la fuerza cortante absorbida por el marco y el desplazamiento lateral relativo entre los dos niveles que lo limitan.
- m. Amortiguamiento: Capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. El amortiguamiento efectivo viene a ser el valor de amortiguamiento viscoso equivalente que corresponde a la energía disipada durante la respuesta cíclica del sistema de aislamiento.
- n. Vulcanización: Es un proceso químico para la conversión del caucho o polímeros relacionados en materiales más duraderos a través de la adición de azufre u otros equivalentes "curativos". Estos aditivos modifican el polímero mediante la formación de enlaces cruzados (puentes) entre las distintas cadenas de polímeros. El material vulcanizado es menos pegajoso y tiene propiedades mecánicas superiores.
- o. Sistema lineal, no lineal y bilineal: Físicamente hablando, analizando la respuesta de un sistema, un sistema es lineal si la salida sigue fielmente los cambios producidos en la entrada y cumplen con el principio de superposición mientras que los sistemas no lineales no cumplen con estas condiciones. Un sistema es bilineal cuando la aplicación definida en el producto cartesiano de dos espacios vectoriales que es lineal en cada una de las dos variables, es decir presenta doble linealidad.
- p. Pandeo: Es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión. Se presenta principalmente en columnas y pilares, pero también en aisladores debido a la gran carga axial que soportan por lo que en su diseño se evalúa dicho fenómeno.
- q. Ductilidad: Es la propiedad de aquellos materiales que bajo la acción de alguna fuerza pueden deformarse pero sin llegar a romperse.
- r. Desempeño: Se cuantifica en términos de la cantidad de daño en un edificio afectado por un movimiento sísmico y el impacto que tienen estos daños en las actividades posteriores al evento. Este concepto no es sólo aplicable a edificios, sino que puede ser extendido a todo tipo de estructuras e incluso a sus componentes estructurales y contenidos.

CAPITULO III: REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS AISLADOS Y SUS DISPOSITIVOS

3.1. NORMAS TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA AISLADO

El diseño de nuevos edificios, sísmicamente aislados, en Estados Unidos se rige actualmente por dos códigos: la edición de 1997 del Uniform Building Code (UBC-97) publicado por la International Conference of Building Officials (ICBO), o el título 24, parte 2 del Código de Regulaciones de California. División III (referido a OSHPD-96). Título 24 es muy similar a la UBC 1994 pero incluye requisitos de diseño más rigurosos para los hospitales de base aislada y otros edificios estatales en California (17).

La UBC y OSHPD-96 no mencionan el reforzamiento de edificios existentes utilizando aisladores, aunque la mayoría de proyectos de modernización hacen seguir los reglamentos de la UBC. Además, la UBC no aborda la cuestión de aislamiento vertical, ni el aislamiento de los equipos o artefactos tales como objetos de arte en los museos. Así mismo en el código de regulaciones no se explica sobre sistemas de aislamiento particulares que se identifican como aceptables, pero en general se debe cumplir que el sistema de cualquier aislamiento debe ser estable durante el desplazamiento requerido, proporcionar una resistencia creciente a medida que aumenta el desplazamiento, y tener propiedades que no se degradan bajo cargas cíclicas repetidas (17).

La intención del código no es reducir el costo de la estructura, sino controlar los daños a la estructura y su contenido, tomando ventaja del hecho de que el aislamiento sísmico permite una respuesta elástica en la estructura y bajas aceleraciones en todos los pisos, para grandes terremotos.

Cada vez más, el diseño de aislación sísmica en las estructuras existentes se ve influida por the national earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), lineamientos para la Rehabilitación Sísmica de la Construcción (FEMA 273) y su comentario (FEMA 274), las cuales fueron publicadas por the Federal Emergency Management Agency (FEMA). Las disposiciones FEMA 273 son muy similares

a los de la UBC 97 con una excepción: FEMA 273 permite un nuevo enfoque de análisis llamado análisis no lineal estático o el método "pushover" (17).

Estos códigos y lineamientos han evolucionado a partir de disposiciones de diseño que se desarrollaron en la década de 1980 por un subcomité de Structural Engineers Association of Northern California (SEAONC). En 1986 SEAONC publicó un documento conocido como el yellow book, titulado "Requisitos tentativos de Diseño para el aislamiento sísmico." Estas disposiciones han servido de base para varios procedimientos recomendados por the Structural Engineers Association of California (SEAOC) e implementar varias ediciones de la UBC, el código más utilizado para el diseño de edificios resistentes a los terremotos en los Estados Unidos (17). En el yellow book, se hizo hincapié en los procedimientos de fuerza lateral equivalente y el nivel de demanda sísmica, que tiene un 10% de probabilidad de ser excedido en un periodo de 50 años.

La versión más actual de las disposiciones de diseño sísmico de estructuras aisladas se puede encontrar en la Norma ASCE, ASCE 7-10. En el capítulo 17, la cual desarrollaremos en el punto 3.2. para así poder diseñar nuestra edificación aislada (18).

Existe en la actualidad varias normas a nivel mundial que presenta el análisis y diseño de los sistemas aislados pero en la presente investigación, tomaremos en cuenta las normas dadas por EE.UU, el ASCE 7-10 y Chile, NCh 2745-2003.

Previamente se resume en el cuadro 3.1 algunas normas ya mencionadas, y más utilizadas para el diseño de una estructura aislada, mencionando los tipos de análisis que se realizan en cada una de ellas:

Cuadro 3. 1: Normas utilizadas para el Análisis de una Estructura Aislada

NORMA	ANÁLISIS ESTÁTICO	ANÁLISIS DINÁMICO
Federal Emergency Management Agency (FEMA)	<p><u>Método de la Fuerza Lateral Equivalente</u></p> $D = \frac{gST}{4\pi^2 B}$ <p>S= Coeficiente sísmico del espectro (equivalente al ZUCS) B= Factor de amortiguamiento Para obtener la fuerza cortante en la base se debe multiplicar $D \times K_{\text{eff}}$. La fuerza a utilizar se reduce con un factor $R_{SA} = \frac{3}{8} R < 2$ Requisito: La fuerza cortante utilizada para el diseño de la superestructura no sea nunca menor a la obtenida por solicitaciones de viento o aquella que se obtendría para una estructura convencional con periodo natural igual al de la estructura aislada.</p>	<p>Toma en cuenta el análisis con espectro y el tiempo-historia.</p> <p><u>Análisis Tiempo-Historia</u> Utilizar siete pares de historias reales escaladas y certificadas, y un mínimo de 3 pares. Deberá realizarse 100% en una dirección y 30% en la otra simultáneo.</p>
Uniform Building Code 1997	<p>Está basado fundamentalmente en dos parámetros: desplazamiento de diseño D_D y desplazamiento máximo D_M</p> <p><u>Desplazamientos y Fuerzas Mínimas del Sismo</u></p> $D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Dmin} g}}$ $D_{TD}(D_D) = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$ <p>C_{VD} y C_{VM} = Coeficientes del sismo de acuerdo con el tipo de suelo. D_{TD} y D_{TM} = Sirven para el diseño de los aisladores en donde se consideran los efectos de torsión La fuerza lateral mínima se halla:</p> $V_s = \frac{K_{Dmáx} D_D}{R1}$	<p><u>Análisis Tiempo-Historia</u> Para la superestructura existen límites en la reducción derivados de la fuerza basal obtenida en análisis estático 60%, para un análisis tiempo historia si es regular 80%. Para evaluar la estabilidad de cada aislador se utiliza la carga máxima vertical $1.2M+1.0V+S$ y la carga vertical mínima $0.8D-S$ en el desplazamiento total máximo y para evaluar la sobrecarga en cada aislador debido al volteo de la estructura. Se utiliza la envolvente de S como valores pico en la respuesta ante el sismo severo. Las derivas se limitan a $0.020/R1$ considerada la degradación en la etapa lineal</p>

	<p>El R1 sólo sirve para diseño de elementos estructurales que se encuentran encima del sistema de aislamiento.</p> <p>Las derivas no deben exceder de 0.010/R1</p>	
<p>Norma Chilena NCh 2745-2003</p>	<p>El sistema de aislamiento y el sistema estructural se diseñan para resistir las deformaciones y esfuerzos producidos por el sismo. Se define dos niveles de sismo Sismo de diseño (SDI) y el sismo máximo posible (SMP).</p> <p>Para el análisis estático la rigidez vertical mínima del sistema de aislación debe ser tal que la frecuencia de vibración de la superestructura rígida aislada sea mayor a 10 Hz.</p> <p><u>Desplazamientos Mínimos Laterales:</u></p> $D_D = C_D / B_D$ <p>Siendo C_D coeficiente según tipo de suelo</p> <p>Desplazamiento Total:</p> $D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$ <p><u>Fuerzas Mínimas Laterales:</u></p> <p>Para el sistema de aislación y los elementos bajo de el:</p> $V_b = K_{Dmáx} D_D^2$ <p>Para elementos encima de la estructura:</p> $V_s = \frac{K_{Dmáx} D_D}{R1}$ <p>Donde R1 es siempre menor a 2 y Vs menor a la fuerza de corte obtenida para una base fija con el mismo periodo de la estructura aislada. Tampoco a 1.5 veces la fuerza requerida para activar el sistema de aislación.</p>	<p>Puede ser análisis espectral o de respuesta en el tiempo. El desplazamiento total de diseño no será menor que el 90% de DTD, y el desplazamiento total máximo no será menor al 80% de DTM. Asimismo, la fuerza de corte de diseño no será menor al 90% de Vb. Al momento de evaluar DTD y DTM, DD y DM se pueden reemplazar, respectivamente, por DD' y DM'. Estos nuevos valores incluyen la influencia de la flexibilidad de la superestructura. T es el periodo de la estructura con base fija y comportamiento elástico.</p> <p><u>Análisis de Respuesta en el Tiempo</u></p> <p>Es recomendable cuando el sistema tiene una razón de amortiguamiento modal mayor a 30%.</p> <p>Se deben seleccionar pares de componentes horizontales de aceleración de al menos 3 registros; luego se combinarán lo espectros de pseudo-aceleración de cada par de registros por el método SRSS para un $\beta=0.05$. Cada par de registros se aplicará simultáneamente al modelo considerando la dirección menos ventajosa.</p>

3.2. ASPECTOS A TOMAR EN CUENTA SEGÚN NORMA ASCE 7 – 10

3.2.1. Movimiento del suelo para sistemas aislados

Para poder realizar el análisis y diseño de un sistema aislado son requeridos dos niveles de fuerza sísmica las cuales son: el sismo máximo considerado cuyas siglas en inglés son MCE (maximum considered earthquake) y el sismo de diseño. El sistema de aislamiento deberá permanecer en condición estable ante el MCE. El sismo de diseño, que se define como los efectos de sismo igual a dos tercios de los efectos de MCE, se usa en el diseño para asegurar de que la seguridad de la vida esté garantizada, reducir los daños estructurales y no estructurales al mínimo, y mantener las funciones de servicio (12).

El presente código ofrece un método para poder determinar el espectro de respuesta del MCE utilizando dos parámetros de mapas de aceleraciones, los cuales son el S_s y S_1 siendo ambos la aceleración de respuesta espectral del MCE, el primero de periodo corto y el segundo en un periodo de 1 segundo.

Cabe resaltar que la aplicación de los mapas utilizados para hallar los parámetros descritos anteriormente está limitada por el perfil de los suelos y sismicidad de la región (12).

Una vez que seleccionamos éstos parámetros podemos hallar las respuestas espectrales para un periodo corto y para 1 segundo de la siguiente manera (12):

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (3.1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (3.2)$$

Donde:

S_{MS} = Es la aceleración espectral máxima posible para un periodo de 0.2 segundo

S_{M1} = Es la aceleración espectral máxima posible para un periodo de 1.0 segundo

F_a y F_v = Factores de amplificación por tipo de terreno para periodo de 0.2 segundo puede encontrarse en la Tabla 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3. 1: Coeficiente de Sitio Fa (Adaptado de la Ref. 12)

Tipo de Suelo	Respuestas Espectrales para periodo corto				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1$	$S_s \geq 1.25$
I. Tipo A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
II. Afloramiento rocoso ($v_s > 750$) m/s (B)	1	1	1	1	1
III. Suelo firme ($360 \leq v_s \leq$ 750) m/s (C)	1.2	1.2	1.1	1	1
IV. Suelo Moderadamente blando ($180 \leq v_s \leq$ 360) m/s (D)	1.6	1.4	1.2	1.1	1
V. Suelo muy blando ($v_s <$ 180) m/s (E)	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

Tabla 3. 2: Coeficiente de Sitio Fv (Adaptado de la Ref. 12)

Tipo de Suelo	Respuestas Espectrales para periodo de 1 s				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1	1	1	1	1
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

Los parámetros de aceleración del espectro de diseño en un período corto, S_{DS} , y los parámetros de aceleración del espectro de diseño en un 1s, S_{D1} , son expresados como:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3.3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (3.4)$$

A continuación presentamos las diferentes ecuaciones utilizadas para hallar la aceleración de diseño de respuesta espectral en relación con el periodo del sistema estructural:

Tabla 3. 3: Ecuación de la aceleración de diseño de respuesta espectral en función del periodo (Adaptado de la Ref. 12)

Condición	Ecuación
$T < T_0 = \frac{0.2 S_{D1}}{S_{DS}}$	$S_a = S_{DS}(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0})$ (3.5)
$T_0 < T < T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$	$S_a = S_{DS}$ (3.6)
$T_S < T < T_L$ Siendo T_L un largo periodo de transición	$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$ (3.7)
$T > T_L$	$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$ (3.8)

La norma nos explica que si la estructura sísmicamente aislada se encuentra en el tipo de zona F o en una zona con S_1 superior a 0.6, los parámetros de aceleración de respuesta espectral de movimiento del suelo de la zonificación del MCE no son aplicables a la determinación del espectro de respuesta de diseño y el espectro de respuesta de MCE. Por lo tanto, la zona específica de movimiento del suelo, como se indica en el capítulo 21 de la ASCE 7-10, tienen que investigarse a fin de elaborar el espectro de respuesta de diseño y el espectro de respuesta de MCE.

Así mismo el espectro de respuesta de MCE está determinado por el simple aumento del espectro de respuesta de diseño en un factor de 1.5, tal y como se muestra en la siguiente Figura:

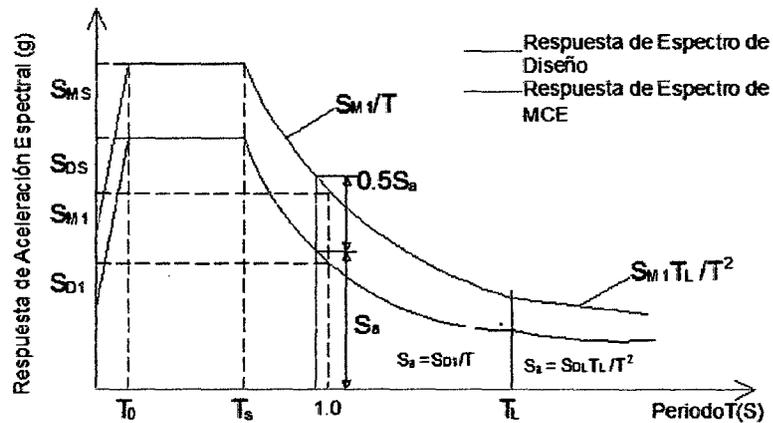


Figura 3. 1: Respuesta Espectral de Sismo de Diseño y de MCE (Adaptado de la Ref. 12)

3.2.2. Selección del procedimiento de Análisis

3.2.2.1. Procedimiento de la Fuerza Lateral Equivalente

Para poder realizar el análisis y diseño de una estructura sísmicamente aislada con este método, tiene que cumplir los siguientes requisitos:

- a. La estructura está localizada en un sitio con $s_1 < 0.6g$
- b. La estructura está localizada en un sitio de clase A, B, C o D
- c. La altura del edificio encima de la interfaz de aislación es menor de 19.8 m o de 4 pisos.
- d. $T_M \leq 3s$
- e. $T_D > 3T_a$
- f. La estructura encima del sistema de aislación es de configuración regular.
- g. $K_{eff} > \frac{1}{3} K_{eff}$ al 20% del desplazamiento de diseño.
- h. Se provee una fuerza restauradora, la cual está definida como:

Fuerza Lateral restauradora: El sistema de aislamiento será configurado para producir una fuerza de recuperación de tal manera que la fuerza lateral en el desplazamiento de diseño total es al menos 0.025W mayor que la fuerza lateral en el 50 por ciento del total desplazamiento de diseño.

- i. No se limita el desplazamiento debido al máximo terremoto posible a menos del desplazamiento total máximo.

Siendo:

T_D = El periodo efectivo en segundos de la estructura aislada sísmicamente bajo el desplazamiento de diseño.

T_M = El periodo en segundos de la estructura aislada sísmicamente bajo el desplazamiento máximo.

T_a = El periodo fundamental en segundos de la estructura y puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$T_a = C_t h_n^x \quad (3.9)$$

Siendo: h_n la altura estructural, C_t y x dependen del sistema estructural definidos mediante la siguiente tabla:

Tabla 3. 4: Valores de los parámetros C_t y x para el cálculo del periodo aproximado usando ecuación (3.9) (Adaptado de la Ref. 12)

Tipo de Estructura	C _t		x
	Unidades inglesas	Unidades Métricas	
Marco de acero resistente a momento	0.028	0.0724	0.8
Marco de concreto resistente a momento	0.016	0.0466	0.9
Marco de acero excéntricamente arriostrado	0.03	0.0731	0.75
Otros sistemas estructurales	0.02	0.0488	0.75

Dados los prerequisites ahora se procederá con la explicación en sí de este método.

A. Desplazamientos Mínimos Laterales:

Tabla 3. 5: Fórmulas para los Desplazamientos Mínimos Laterales (Adaptado de la Ref. 12)

A.1. Desplazamiento de Diseño	$D_D = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (3.10)$
A.2. Periodo Efectivo en el desplazamiento de Diseño	$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin} g}} \quad (3.11)$
A.3. Desplazamiento Máximo	$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (3.12)$
A.4. Periodo Efectivo del Desplazamiento Máximo. Cuando se requiera considerar el MCE.	$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin} g}} \quad (3.13)$
A.5. Desplazamiento Total de Diseño	$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (3.14)$
A.6. Desplazamiento Total Máximo	$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (3.15)$

Donde:

g = aceleración de la gravedad en mm/s^2 o in/s^2

S_{D1} = Aceleración espectral para el periodo de 1s.

B_D = coeficiente numérico relacionado con el efecto de amortiguación del sistema de aislamiento en el desplazamiento de diseño.

Este término en el desplazamiento de diseño se define de la siguiente manera:

$$\beta_D = \frac{\sum ED}{2\pi K_{Dmax} D_D^2} \quad (3.16)$$

Donde $\sum ED$ representa la energía total disipada por ciclo de la respuesta de desplazamiento de diseño, que se tomará como la suma de la energía disipada en un ciclo completo en todos los aisladores medidos en el desplazamiento de diseño. Posteriormente se determina β_D , el coeficiente numérico para la relación de amortiguamiento, B_D , se puede calcular en la siguiente ecuación con la limitación al 50% del amortiguamiento crítico:

$$B_D = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln \beta_D} \quad (3.17)$$

La ecuación (3.17) se establece sobre la base del 5% del amortiguamiento crítico. Por lo tanto, β_D equivalente al 5% del resultado de amortiguamiento crítico en una unidad de coeficiente numérico, B_D . ASCE 7-10 hace pequeños ajustes a la ecuación (3.17) y los valores tabulados se dan en la Tabla 3.6

Tabla 3. 6: Coeficiente de Amortiguamiento B_D o B_M (Adaptado de la Ref. 12)

Amortiguamiento Efectivo, B_D o B_M (Porcentaje crítico) ^{a,b}	Factor B_D o B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

W = peso sísmico efectivo de la estructura encima de la interfaz de aislamiento.

k_{Dmin} = Rigidez mínima efectiva KN/mm o kips/in del sistema de aislamiento del desplazamiento de diseño

k_{Mmin} = Rigidez mínima efectiva KN/mm o kips/in del sistema de aislamiento del desplazamiento máximo

D_D = Desplazamiento de diseño en el centro de la rigidez del sistema de aislamiento

D_M = Desplazamiento máximo en el centro de la rigidez del sistema de aislamiento

y = La distancia entre los centros de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés medido perpendicular a la dirección de carga sísmica bajo consideración.

e = la excentricidad real medida en el plano entre el centro de masa de la estructura por encima del interfaz de aislamiento y el centro de la rigidez del sistema de aislamiento, además de excentricidad accidental, en pies (mm), tomado como un 5% de la dimensión más larga en planta de la estructura perpendicular a la dirección de la fuerza que se examina.

b = La dimensión más corta en planta de la estructura medida perpendicular a d

d = la dimensión más larga en planta de la estructura

La ecuación (3.10) nos muestra el máximo movimiento del sistema de aislamiento, ya que sólo representa el desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento. Así mismo, existe un desplazamiento adicional debido a la excentricidad, e , en pies o (mm) como se muestra en la figura 3.2. Por lo tanto, estas dos condiciones de los desplazamientos forman el movimiento máximo del sistema de aislamiento que normalmente se llama el desplazamiento total de diseño. La excentricidad, e , que resulta en el desplazamiento adicional, consiste en la excentricidad medida de la masa de la superestructura al centro rigidez del sistema de aislación, la excentricidad accidental igual al 5% de la dimensión más larga del plano de la estructura perpendicular a la dirección de la fuerza considerada, tal como lo indica nuestra norma. El desplazamiento adicional se determina suponiendo un plano rectangular del sistema de aislamiento con la dimensión más larga del plano como d , y la dimensión más corta del plano como b .

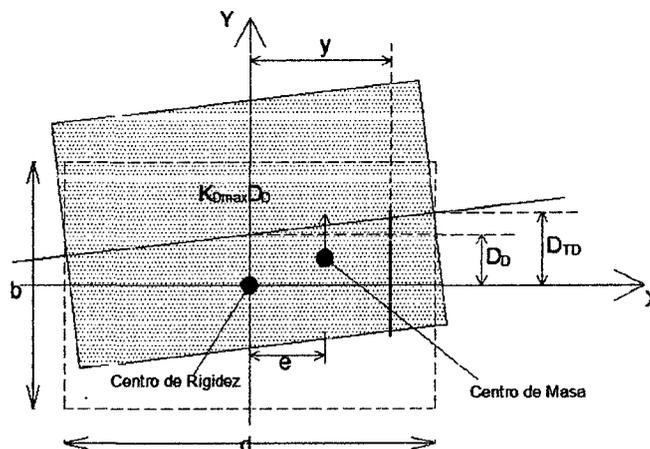


Figura 3. 2: Determinación del Desplazamiento Total de Diseño (Adaptado de la Ref. 12)

Se supone también que el sistema de aislamiento se distribuye uniformemente en este plano rectangular. Por lo tanto, la rigidez torsional del sistema de aislamiento, $k_{torsion}$, se puede expresar en términos de la rigidez efectiva máxima, k_{Dmax} :

$$k_{torsion} = \frac{b^2+d^2}{12} K_{Dmax} \quad (3.18)$$

En el desplazamiento de diseño D_D , la fuerza sísmica que actúa sobre el centro de la rigidez del sistema de aislamiento es k_{eff} . La rotación del sistema de aislamiento, γ , se obtiene como:

$$\gamma = \frac{K_{Dmax} D_D e}{\frac{b^2+d^2}{12} K_{Dmax}} = \frac{12 D_D e}{b^2+d^2} \quad (3.19)$$

El desplazamiento adicional, D_a , en la distancia, y , que es medida entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento estructural designado perpendicularmente a la dirección de la fuerza, y se puede determinar cómo:

$$D_a = \frac{12 D_D e}{b^2+d^2} y \quad (3.20)$$

Entonces el desplazamiento total de diseño es la suma del desplazamiento de diseño más el adicional y las ecuaciones quedaría tal como las mostradas en la tabla 3.5.

B. Fuerzas Mínimas Laterales:

B.1. Sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del sistema de aislamiento.

El sistema de aislamiento, el fundamento, y todos los elementos estructurales por debajo del sistema de aislamiento será diseñado y construido para soportar un mínimo de fuerza lateral sísmica, V_b , utilizando todos los apropiados requerimientos de una estructura no aislada.

$$V_b = k_{Dmax} D_D \quad (3.21)$$

k_{Dmax} = Rigidez máxima efectiva KN/mm o kips/in del sistema de aislamiento del desplazamiento de diseño

V_b = no se tomará como menor que el máximo vigente en el sistema de aislamiento en cualquier desplazamiento superior e incluyendo el desplazamiento de diseño.

B.2. Elementos Estructurales encima del Sistema de Aislamiento

$$V_s = \frac{k_{Dmax} D_D}{R_1} \quad (3.22)$$

R_1 = Coeficiente numérico relacionado con el tipo de sistema de fuerza-resistencia sísmica por encima del sistema de aislamiento.

El factor de R_1 se basará en el tipo de sistema de fuerza-resistencia sísmica utilizado para la estructura por encima del sistema de aislamiento y será de $3/8R$, donde R representa el factor de modificación de la respuesta que se da en la Tabla 12.2-1 de ASCE 7- 10, pero se ha tratado de explicar en la tabla 3.7.

Tabla 3. 7: Selección de Ω_0 , R , R_1 , C_d (Adaptado de la Ref. 12)

Selección de Ω_0 , R , R_1 , C_d				
Sistema para resistir la fuerza sísmica	Ω_0	R	R_1	C_d
Edificio con sistema de marcos	Refuerzo especial en muros de concreto	2.5	5	1.875
	Refuerzo especial en muros de albañilería	2.5	5	1.875
Sistemas de marcos de momentos resistentes	Marcos de Acero arriostrados excéntricos	2	6	2
	Refuerzo especial en muros de concreto	2.5	6	2
Marcos de acero arriostrados excéntricos	Marcos de acero especiales para momentos	3	8	2
	Refuerzo especial en marcos para momentos	3	8	2

B.3. Límites en V_s

El valor de V_s no se tomará menos de:

- ❖ La fuerza sísmica que se produciría en una estructura empotrada en la base con el mismo peso efectivo pero con el periodo de la estructura aislada.

Esta fuerza lateral mínima es denotada como V y los procedimientos de determinación son:

$$V = C_s W \quad (3.23)$$

Donde C_s es el coeficiente de respuesta sísmica determina como sigue:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I}\right)} > 0.01 \quad (3.24)$$

Siendo I el factor de importancia de ocupación, que se da en la siguiente tabla:

Tabla 3. 8: Valores de Factor de Importancia (Adaptado de la Ref. 12)

Categoría de Ocupación de Edificio	I
Equipamiento esencial – IV	1.5
Riesgo sustancial para la vida humana en caso de falla - III	1.25
Bajo riesgo para la vida humana en caso de falla - I	
Otros edificios no especificados en las categorías de ocupación I, III y IV – II	1

La ecuación (3.24) no debe excederse de las siguientes ecuaciones mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 3. 9: Valores límites e intervalos para el coeficiente sísmico (Adaptado de la Ref. 12)

Condición	Fórmula
$T_D \leq T_C$	$C_s = \frac{S_{D1}}{T_D \left(\frac{R}{I}\right)}$
$T_D > T_C$	$C_s = \frac{S_{D1} T_C}{T_D^2 \left(\frac{R}{I}\right)}$

- ❖ El cortante en la base correspondiente a la factorizada carga de viento de diseño.
- ❖ La fuerza sísmica lateral necesaria para activar plenamente el sistema de aislamiento multiplicado por 1.5.

Tabla 3. 10: Fórmulas para hallar la fuerza cortante en un Sistema con Aislamiento (Adaptado de la Ref. 12)

Sistema Elastomérico	Sistema de fricción
$V_i = 1.5k_e D_y$	$V_i = 1.5\mu_b W$
k_e = rigidez elástica D_y = desplazamiento de fluencia	μ_b = coeficiente de fricción para inicio de deslizamiento W = peso del edificio

C. Distribución Vertical de la Fuerza:

La fuerza de corte V_s , se distribuirá en la altura de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento, siguiendo la siguiente expresión:

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (3.25)$$

Donde:

F_x = porción de V_s que se asigna a Nivel x

V_s = Fuerza tota lateral sísmica de diseño o fuerza cortante

w_x = porción de W que se encuentra en el nivel x

h_x = altura sobre la base del nivel x

En cada nivel designado como x , la fuerza, F_x , deberá ser aplicado sobre el área de la estructura de acuerdo con la distribución de la masa en el nivel.

D. Límite de Deriva:

La deriva del piso, δ_i , en cada nivel del piso i para el análisis estructural está limitada como:

$$\frac{c_d \delta_i}{I} \leq 0.015 h_{si} \quad (3.26)$$

Donde:

I = Factor de importancia

C_d = Factor de Amplificación de la desviación

h_{si} = Altura de piso en cualquier nivel i

3.2.2.2. Procedimiento del Análisis Dinámico

A. Requisitos para realizar un Análisis Dinámico

A.1. Para sistema Aislado

El sistema de aislamiento se puede modelar con suficiente detalle como para cuenta de la distribución espacial de unidades de aislación.

Cálculo de la traslación, en ambas direcciones horizontales, y la torsión de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento teniendo en cuenta la más desfavorable ubicación de masa excéntrica.

Considerar fuerzas de levantamiento y volteo en aisladores individuales. Incluir los efectos de la carga vertical y bilateral, así como el ciclo de carga si el sistema aislado es dependiente de una o más de estas características.

El desplazamiento total de diseño y el desplazamiento máximo total de todo el sistema de aislamiento se calcularán utilizando un modelo de la estructura aislada que incorpora las características de esfuerzo-deformación de los elementos no lineales del sistema de aislamiento y el sistema sísmico de fuerza-resistencia.

A.2. Para Estructura Aislada

El desplazamiento máximo de cada piso y fuerzas de diseño y desplazamientos en elementos del sistema resistente a fuerzas sísmicas se les permiten ser calculado usando un modelo elástico lineal de la estructura aislada a condición de que ambos cumplan las siguientes condiciones:

Propiedades de rigidez asumidos para los componentes no lineales del sistema de aislamiento se basan en la rigidez efectiva máxima del sistema de aislamiento. Todos los elementos del sistema sísmico fuerza-resistencia de la estructura por encima del sistema de aislamiento siendo elástico para el sismo de diseño.

Sistema sísmico de fuerza-resistencia con elementos elásticos incluyen, pero no se limitan a, sistemas estructurales irregulares diseñados para una fuerza lateral

no menos de 100% de V_s y sistemas estructurales regulares diseñados para una fuerza lateral no menos de 80% de los V_s .

A.3. Desplazamientos y fuerzas laterales mínimas

Sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del sistema de aislamiento

El diseño de la fuerza lateral, no se tomará como menos del 90 % de V_b determinado de conformidad según lo prescrito por la ecuación (3.21).

El desplazamiento total de diseño del sistema de aislamiento no se debe tomar como menos del 90 % de D_{TD} . El desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento no debe tomarse como menos de 80% de D_{TM} .

Los límites en los desplazamientos definidos por la presente sección deberá evaluarse utilizando valores de D_{TD} y D_{TM} antes ya determinados excepto que se permite D'_D para ser utilizado en lugar de D_D y se permite D'_M para ser utilizado en lugar de la D_M como:

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad (3.27)$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (3.28)$$

A.4. Elementos estructurales encima del Sistema de Aislamiento

El diseño Fuerza lateral de corte en la estructura encima del sistema de aislamiento, si es regular en la configuración, no debe tomarse como menos de 80 % de V_s , o menos de los límites especificados anteriormente.

B. Procedimiento de la Respuesta Espectral

Este procedimiento no puede ser usado para estructuras aisladas salvo que: la estructura este localizada en los sitios A, B, C O D o esté relacionado con los criterios explicado en los puntos g, h, i de la sección 3.1.2.1.

C. Procedimiento de la Respuesta en la Historia

Este método no requiere de ningún prerrequisito y puede aplicarse a cualquier tipo de estructura.

Se lleva a cabo un procedimiento de respuesta en la historia, un conjunto de no menos de tres pares de movimientos de suelo se utilizan en el análisis.

Cada par de componentes de movimiento del suelo será aplicado simultáneamente con el modelo teniendo en cuenta la ubicación más desfavorable de la masa excéntrica.

El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento se calculará a partir de la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales en cada paso de tiempo.

Los parámetros de interés se calcularán para cada movimiento del suelo utilizado para el análisis de respuesta en la historia. Si siete o más pares de movimientos de suelo son usados para el análisis de respuesta en la historia, el valor promedio del parámetro de respuesta de interés puede ser utilizado para el diseño. Si se utiliza menos de siete pares se usa para el análisis el valor máximo del parámetro de respuesta de interés.

Cuando se selecciona los registros de movimiento de suelo, se debe considerar las magnitudes de los terremotos, distancia a las fallas, efectos de cercanía al origen, y los mecanismos de origen. Si no hay suficientes registros de movimientos de suelo disponibles, ASCE 7-10 permite utilizar el apropiado movimiento del suelo simulado con el fin de proporcionar la cantidad necesaria de movimientos suelo. Los registros de movimiento del suelo pueden ser escalados de acuerdo con el siguiente método:

En primer lugar, para los dos componentes de cada movimiento del suelo, se construye un SRSS del 5% del espectro amortiguado. A continuación, un espectro de respuesta de diseño con 5% de amortiguamiento, tal como se presenta en la Sección 3.2.1, se determina.

El siguiente paso es aplicar el factor de escala individual a cada espectro SRSS y encontrar el valor promedio de los espectros de SRSS. Por último, los factores de escala seleccionados no deberán hacer que el valor promedio del espectro de SSRS caiga por debajo de 1,3 veces del espectro de respuesta de diseño y por

encima de 10% con un período que varía de $0.5T_D$ a través $1.25T_M$. La figura 3.3 ilustra este método:

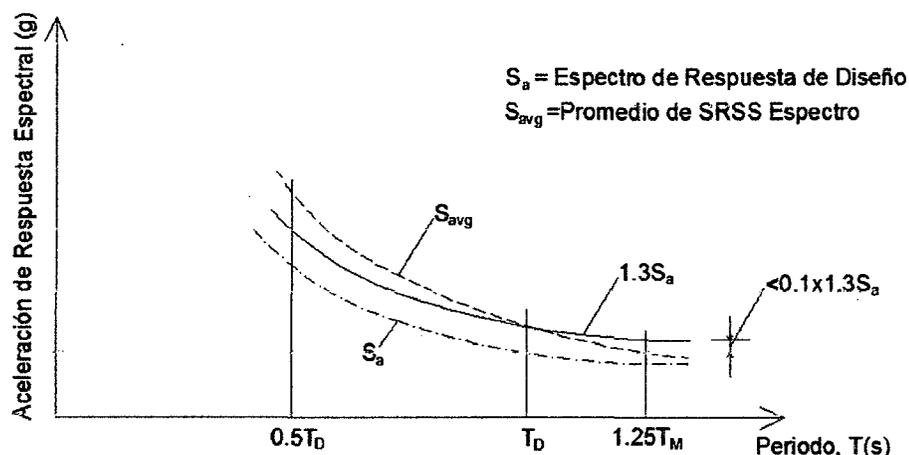


Figura 3. 3: Determinación de factores de escala para movimientos de suelo (Adaptado de la Ref. 12)

Tenemos que tener en cuenta que la entrada del movimiento de suelo en el modelo estructural no tiene en cuenta los efectos de torsión accidental. Para simular la torsión accidental en el modelo estructural, la masa de la estructura sobre el sistema de aislamiento suele ser trasladada en un 5% de la dimensión de la edificación a lo largo de cada eje principal. El movimiento de masa podría suceder en cualquier dirección (positiva o negativa) a lo largo de los ejes principales, lo que resulta un enorme esfuerzo computacional para determinar el caso más desfavorable para el diseño de la estructura sísmicamente aislada.

Desafortunadamente, no existe un método sencillo para reducir el esfuerzo de cálculo. Desde el punto de vista práctico del diseño, la reducción de ejecutar el análisis de respuesta en la historia puede basarse en criterios técnicos para identificar las irregularidades de la disposición estructural, la excentricidad de masa más desventajosa, y los registros críticos de movimiento de suelo. Es debido a estos factores principales que rigen los parámetros máximos de interés, tales como las derivas de piso, desplazamiento lateral del sistema de aislamiento, y las fuerzas de amplificación en las unidades de aislamiento.

3.3. RECOMENDACIONES PARA LA UTILIZACIÓN DE AISLADORES

Dado que la solución propuesta en la presente tesis es la colocación de aisladores para reducir o eliminar la falla por piso blando, se necesita saber cuáles son las recomendaciones para su uso eficiente.

Por lo tanto cuando se esté pensando en la utilización de los aisladores se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

A. Nivel de Desempeño de la edificación

Cuando se va a construir una edificación nueva o rehabilitar una edificación existente con el sistema de aislación sísmica, se sugiere tener en cuenta los niveles de desempeño, para así tomar la decisión del uso o no de estos dispositivos, tomando en cuenta tanto el comportamiento de la estructura como la económica. A continuación se describe un cuadro sugerido por la norma ASCE 41-06 (22) en cuanto al uso tanto para los dispositivos de aislación como para los de disipadores de energía.

Cuadro 3. 2: Aplicabilidad de Aislamiento y Sistemas de Disipación de Energía (Adaptado de ASCE/SEI 41-06, 2007)

Aplicabilidad de aislamiento y sistemas de disipación de energía			
Nivel de Desempeño	Rango de Desempeño	Aislamiento	Disipación de Energía
Operacional	Control de Daño	Muy recomendable	Limitado
Ocupación Inmediata	Control de Daño	Recomendable	Recomendable
Resguardo de Vida	Seguridad limitada	limitado	Recomendable
Prevención de colapso	Seguridad Limitada	No practico	Limitado

Sugiere que los sistemas de aislamiento deben ser considerados para lograr la ocupación inmediata en los niveles de desempeño estructural y el nivel operacional de desempeño no estructural.

Para el nivel seguridad de vida es limitado ya que no podría compensar con los costos su uso en cuanto a rehabilitación.

Por el contrario, el aislamiento es probable que no sea una estrategia de diseño apropiado para el logro de la Prevención de colapso.

Para poder clasificar a nuestra edificación en estudio deberemos conocer la importancia de la edificación, los objetivos múltiples de desempeño y el tipo de sismo de diseño que será descrito a continuación mediante cuadros, propuestos en su mayoría por el comité VISION 2000 del SEAOC (23).

A.1. Importancia de la Edificación

De acuerdo al grado de importancia se presentan tres grupos:

Cuadro 3. 3: Importancia de la Edificación (Adaptado de Comité VISION 2000)

Edificaciones Esenciales	Aquellas cuya función no debería interrumpirse luego de ocurrido el sismo. En este grupo tenemos: hospitales, cuarteles de bomberos, policía, etc.
Edificaciones de Seguridad Crítica	Aquellas que contienen materiales peligrosos dañinos para la población. Aquí se encuentran: plantas industriales y centrales nucleares.
Edificaciones Comunes	En este grupo se encuentran todas las edificaciones que no hayan sido incluidas anteriormente: edificios de viviendas, oficinas, hoteles, entre otras.

A.2. Objetivos Múltiples de Desempeño

“Los objetivos del desempeño Sismorresistente se definen por la combinación entre los niveles de desempeño deseados y los niveles de amenaza sísmica esperada de acuerdo a la importancia de la edificación.” (SEAOC, 1995).

Cuadro 3. 4: Nivel de Desempeño Sísmico de acuerdo al tipo de sismo y tipo de edificación

		Nivel de Desempeño de la Edificación			
		Totalmente Operacional	Operacional	Resguardo de Vida	Cerca al Colapso
Nivel de Demanda Sísmica	Sismos Frecuentes (43 años)				
	Sismos Ocasionales (72 años)				
	Sismos Raros (475 años)				
	Sismos muy raros (970 años)				

	Edificaciones Comunes
	Edificaciones Esenciales
	Edificaciones de Seguridad Crítica

Estudios de peligro asociados a los cuatro sismos de diseño en la costa oeste de América del Sur (Muñoz, Diseño sismorresistente), en términos de aceleración pico en la base rocosa y probabilidad de excedencia en 50 años de exposición, concluyen que la aceleración tendría valores cercanos a los mostrados en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. 5: Desempeño esperado para edificios comunes en la costa peruana

Sismo de Diseño	Aceleración (g)	Comportamiento Estructural
Sismos frecuentes	0.20	Perfectamente Elástico
Sismos ocasionales	0.25	Prácticamente Elástico

Sismos raros	0.40	Importantes incursiones inelásticas con pérdida de resistencia y rigidez. La estructura es reparable
Sismos muy raros	0.5	Severas incursiones inelásticas, pérdida casi total de rigidez y resistencia. No resulta práctico reparar la estructura.

Nota: Si se desea diseñar cualquier edificio por desempeño los valores limites de derivas permitidos son mucho más exigentes que los dados por nuestra norma. Estas derivas están en función del nivel de desempeño y daño estructural.

Cuadro 3. 6: Descripción de daño para cada nivel de desempeño (SEAOC VISION 2000)

Estado de Daño	Nivel de Desempeño	Descripción de Daño
Despreciable	Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Los sistemas de evacuación y todas las instalaciones continúan prestando servicios.
Leve	Operacional	Agrietamientos en elementos estructurales. Daño entre leve y moderado en los elementos arquitectónicos. Los sistemas de seguridad y evacuación funcional con normalidad.
Moderado	Seguridad	Daños moderados en algunos elementos. Pérdida de resistencia y rigidez en los elementos parte del sistema resistente de cargas laterales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio por algún tiempo.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
"ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

Severo	Pre-colapso	Daños severos en elementos no estructurales. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. Puede ser necesario demoler el edificio.
Completo	Colapso	Pérdida parcial o total de soporte. Colapso total o parcial. No es posible la reparación.

Cuadro 3. 7: Relación Daño-Deriva según el tipo de la estructura ("Multihazard Loss Estimation Methodology-HAZUS")

Propiedades de la Edificación			Derivas en Entrepiso para el Estado de Daño				
Tipo	Altura (Pulg.)						
		Piso	Modal	Suave	Moderado	Extensivo	Completo
W1	Estructura ligera de madera	168	126	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750
W2	Estructura de madera comercial e industrial	288	216	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750
S1L	Estructura de acero de pequeña altura	288	216	0.0060	0.0104	0.0235	0.0600
S1M	Estructura de acero de mediana altura	720	540	0.0040	0.0069	0.0157	0.0400
S1H	Estructura de acero de gran altura	1872	1123	0.0030	0.0052	0.0118	0.0300
S2L	Estructura de acero arriostrados de pequeña altura	288	216	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
"ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

S2M	Estructura de acero arriostrados de mediana altura	720	540	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400
S2H	Estructura de acero arriostrados de gran altura	1872	1123	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300
S3	Estructura de acero maco de luz	180	135	0.0040	0.0070	0.0187	0.0525
S4L	Estructura de acero con muros de C°A° de pequeña altura	288	216	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525
S4M	Estructura de acero con muros de C°A° de mediana altura	720	540	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350
S4H	Estructura de acero con muros de C°A° de gran altura	1872	1123	0.0020	0.0035	0.0093	0.0262
S5L	Estructura de acero con muros de mampostería de pequeña altura						

S5M	Estructura de acero con muros de mampostería de mediana altura						
S5H	Estructura de acero con muros de mampostería de gran altura						
C1L	Estructura de concreto de pequeña altura	240	180	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600
C1M	Estructura de concreto de mediana altura	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400
C1H	Estructura de concreto de gran altura	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300

B. Esbeltez de la Edificación

Se define como la relación entre la máxima altura y el ancho mínimo de la edificación. Recomendándose para el uso de aisladores lo siguiente (24):

$$e = \frac{h}{B_{min}} \leq 1.5 \quad (3.29)$$

Como podemos verificar este parámetro se relaciona con la altura, razón por lo que en la norma ASCE 7-10 recomienda para un análisis de fuerza lateral equivalente que la edificación no exceda de una altura de 19.8m o 4 pisos.

C. Espacio para desplazamiento

Cuando se utilizan aisladores sísmicos la estructura llega a tener un desplazamiento absoluto hasta de 50 cm o más según como se lo haya diseñado,

es por ello que se sugiere una junta para desplazamiento en la base e interacción con otras estructuras de aprox. 50 cm en el perímetro.(24)

D. Periodo de la Estructura

En la norma ASCE7-10 recomienda que el periodo máximo de la estructura no supere los 3s, así mismo en algunas investigaciones como la tesis denominada: Análisis y Diseño de Estructuras con Aisladores Sísmicos en el Perú recomienda que el periodo de la estructura empotrada sea menor o igual al número de pisos dividido entre diez (24).

Otros investigadores, como el Dr. Genner Villareal sólo recomienda que el periodo de la estructura fija al suelo no exceda en 2s.

Este parámetro se relaciona así mismo con la altura del edificio ya que mientras más número de pisos tenga una edificación tendrá más periodo (28).

E. Recomendaciones para la colocación de aisladores en escaleras, ascensores e instalaciones

Las escaleras en un edificio aislado se deben diseñar de tal manera que controlen la interacción con el edificio. Así mismo Las escaleras (en toda su altura) deben acompañar no solamente los movimientos transversales del edificio frente a la ocurrencia de un sismo, sino también al desplazamiento vertical. Esta última componente resulta ser la más difícil de desacoplar precisamente porque es imposible la no presencia de las acciones gravitatorias debidas al peso propio. Muchas edificaciones fueron construidas con escaleras metálicas, ya que el acero posee una gran ductilidad, lo que permite tener una gran deformación de dicho elemento, siendo de esta manera una solución para que todo el sistema se pueda desplazar en conjunto. En la Figura 3.4 se muestra la colocación apoyos y fijaciones al edificio para permitir el libre movimiento. El apoyo de la escalera metálica sobre la ménsula fijada al edificio, se realiza sobre una plancha de plomo con el objeto de reducir la fricción y oponer el mínimo de resistencia al desplazamiento horizontal (29).

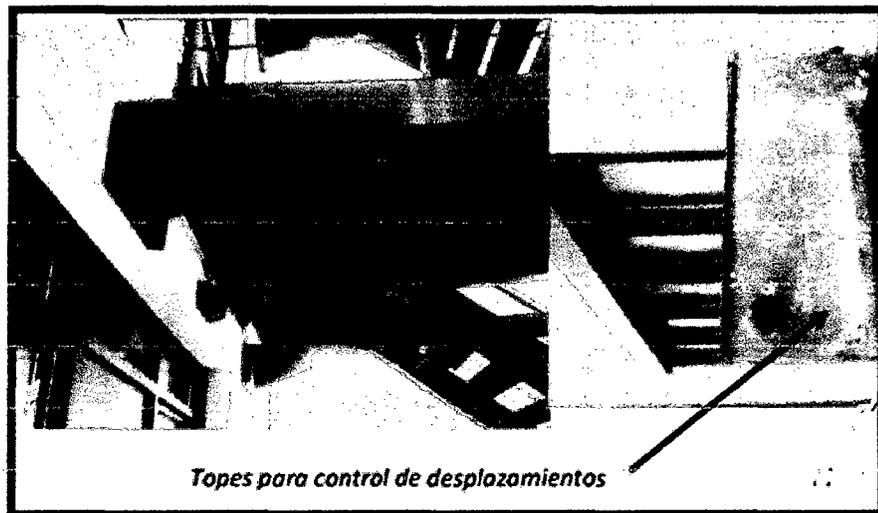


Figura 3. 4: Detalle del encuentro de las escaleras con el edificio aislado en el Residencial Universitario de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina (Ref. 29)

Cuando la escalera pasa por el interfaz del sistema de aislación, que ocurre cuando los aisladores son ubicados en entresijos, se realiza una junta en dicha escalera y en la baranda de la misma, tal como lo podemos visualizar en la Figura 3.5.

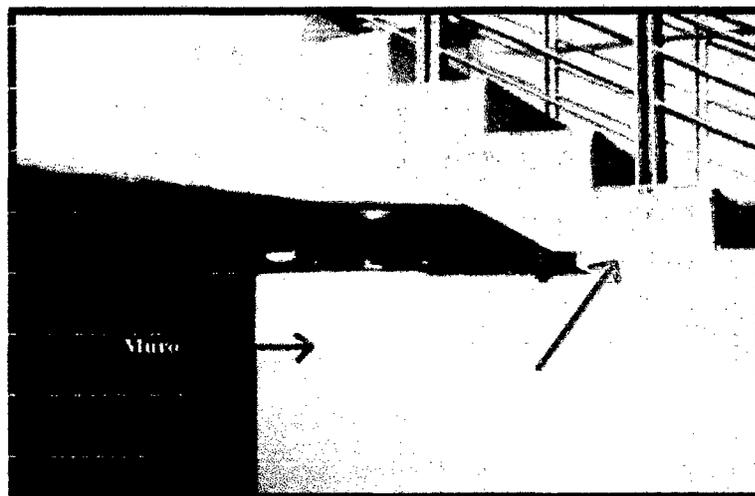


Figura 3. 5: Paso de la estructura de una escalera por la interfaz de aislación y su solución (Ref. 30)

Para el aislamiento de un ascensor se recomienda el uso de aisladores tipo friccionantes (30).

Un aspecto que es muy importante constructivamente son las conexiones flexibles, éstas se deben implementar para los servicios de agua, electricidad,

alcantarillado, gas, etc.; las cuales son importantes porque evitan la rotura de las conexiones de estos servicios lo que significa: (i) que no se producirán fugas las cuales pueden ser responsables de importantes daños tales como inundaciones de los pisos inferiores y de incendios por efecto de las conexiones eléctricas o el gas, la experiencia muestra que se han visto importantes daños por este motivo, (ii) mantiene la serviciabilidad del edificio y de los servicios básicos después de un sismo severo. Las conexiones flexibles deben ser de alta resistencia y las conexiones con la parte fija deben asegurar su buen funcionamiento, la longitud del tramo flexible de ser igual a la separación existente más el desplazamiento máximo a lo menos (30):

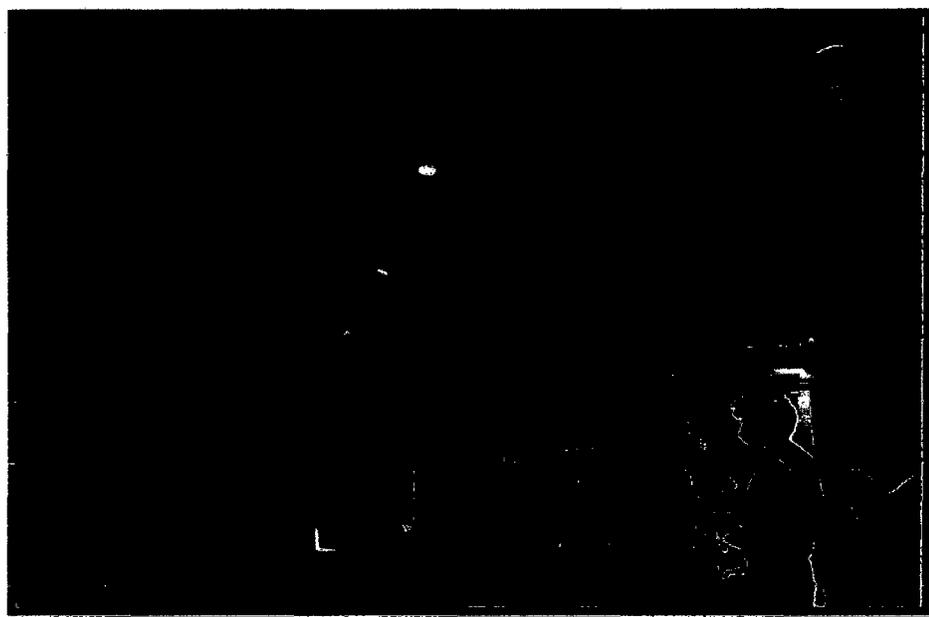
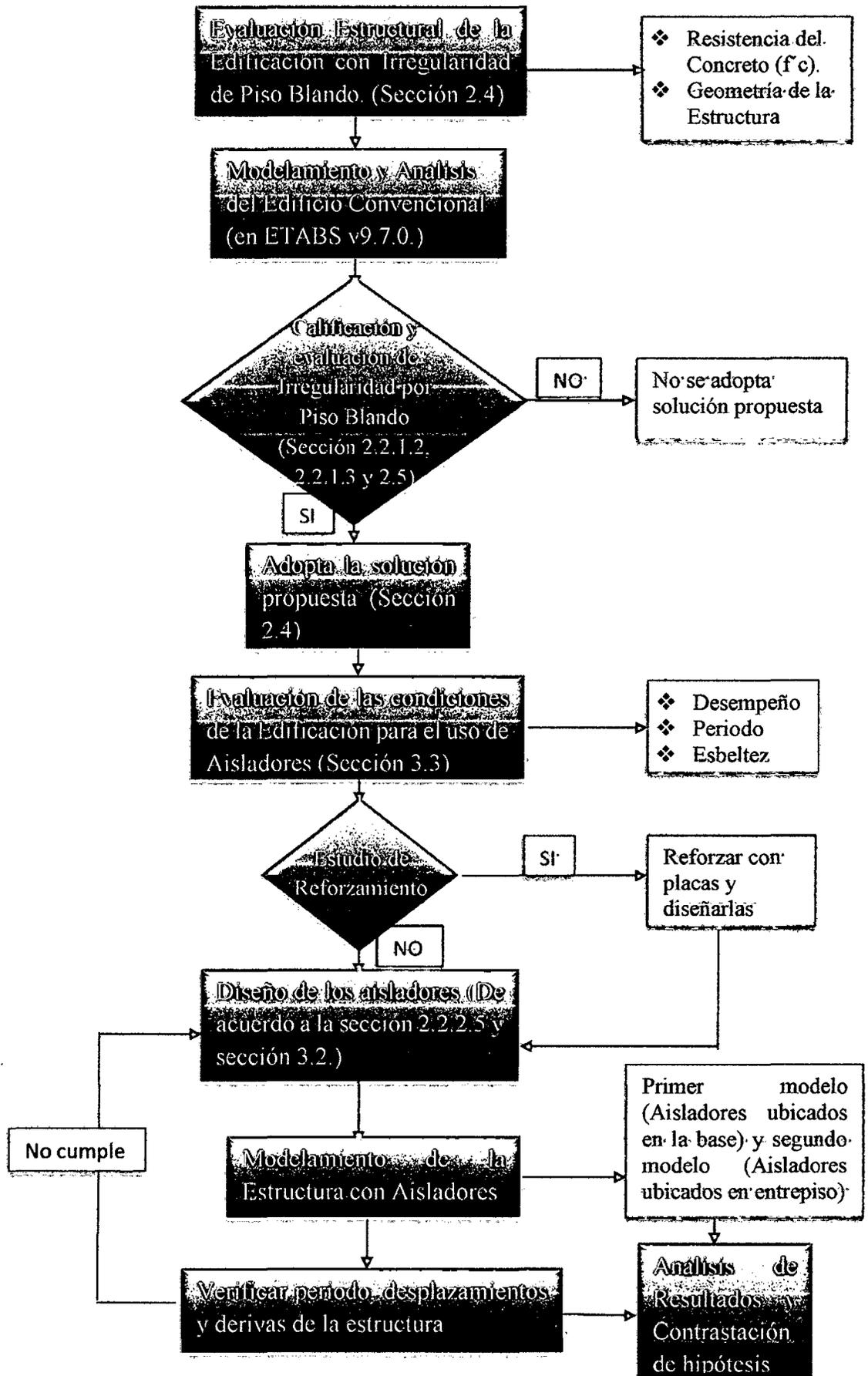


Figura 3. 6: Figura que muestra las conexiones flexibles en una edificación [Muñoz Peláez, 2013 (31)]

3.4. SÍNTESIS DEL PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA ANALIZAR LAS PROPUESTAS PLANTEADAS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

A continuación se presenta un diagrama en el cual se resumen todos los pasos a seguir para realizar tanto la evaluación de la irregularidad por piso blando como su posible solución.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
 "ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
 PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"



CAPITULO IV: ANÁLISIS DINÁMICO DE LA EDIFICACIÓN. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO TRADICIONAL

La residencial "Los Olivos" es una edificación ubicada en el Jr. Los Olivos, Urb. El Ingenio, Cajamarca; la cual consta de 7 pisos con azotea, siendo el primer nivel un estacionamiento, y los pisos subsiguientes departamentos. Cabe resaltar que para la presente investigación modificaremos el primer piso del edificio, tal que pueda presentar irregularidad en altura; siendo la altura real de este primer nivel de 2.5 m de piso terminado a techo, la modificaremos a 3.2m, pero los demás pisos mantienen su altura de 2.4 m. Las dimensiones típicas en planta corresponden al orden de 15.11 m. en la parte frontal, 25.60 la parte lateral derecha con un ángulo de inclinación de 2° , 25.59 m la parte lateral izquierda, finalmente la parte posterior con un ángulo de inclinación de 3° mide 15.86 m. En la figura 4.1 se puede observar la distribución de una planta típica del 2, 4 y 6 piso, siendo para los pisos 3, 5 y 7 la misma distribución, exceptuando que no presentan una escalera que se utiliza en los departamentos dúplex. Así mismo podemos observar en las figuras 4.2 y 4.3 los cortes longitudinal y transversal de la edificación.

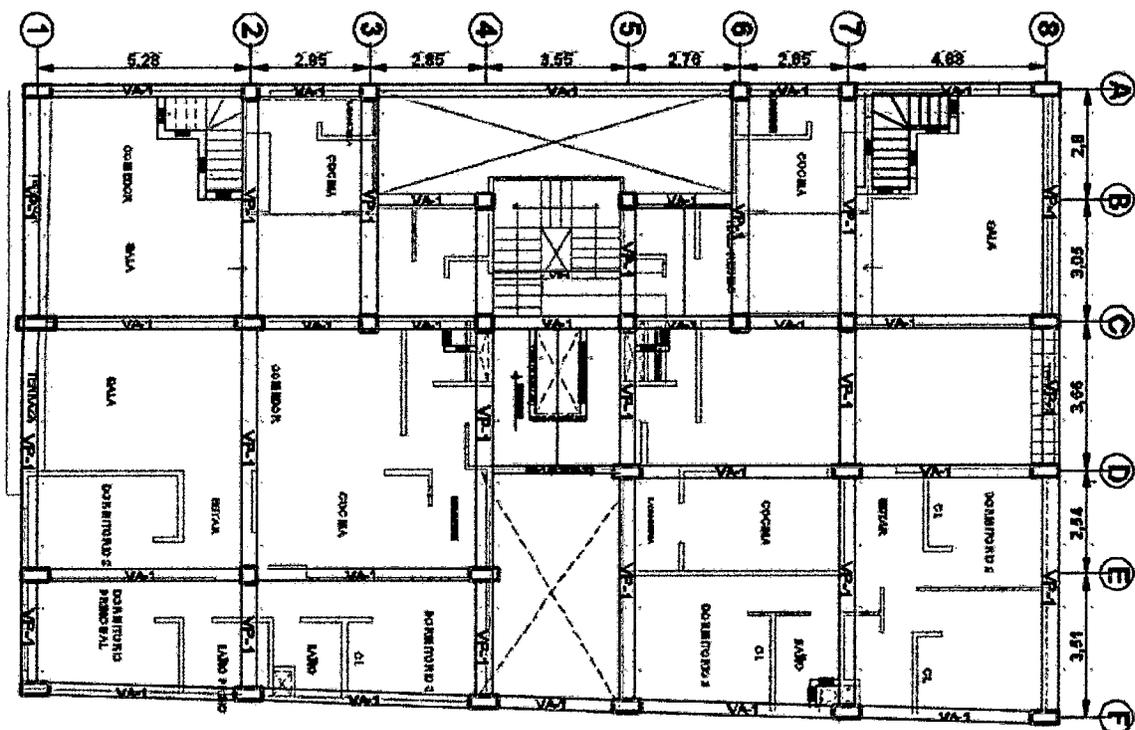


Figura 4. 1: Vista de la Planta Típica de la Edificación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
 "ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
 PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

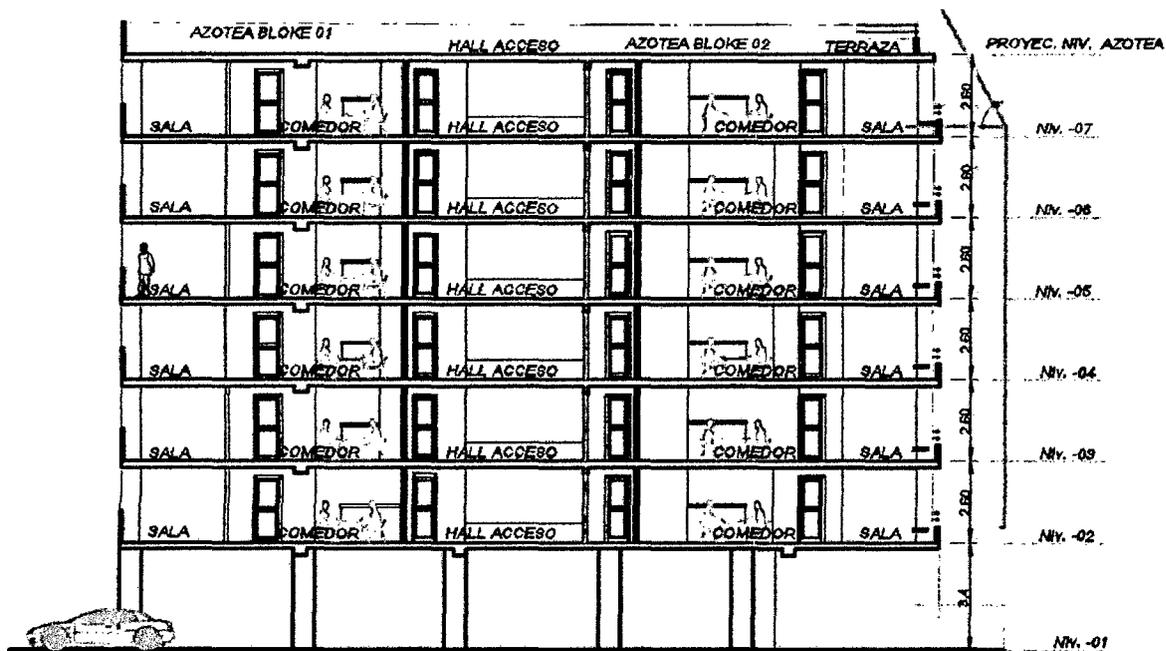


Figura 4. 2: Corte Longitudinal de la Edificación

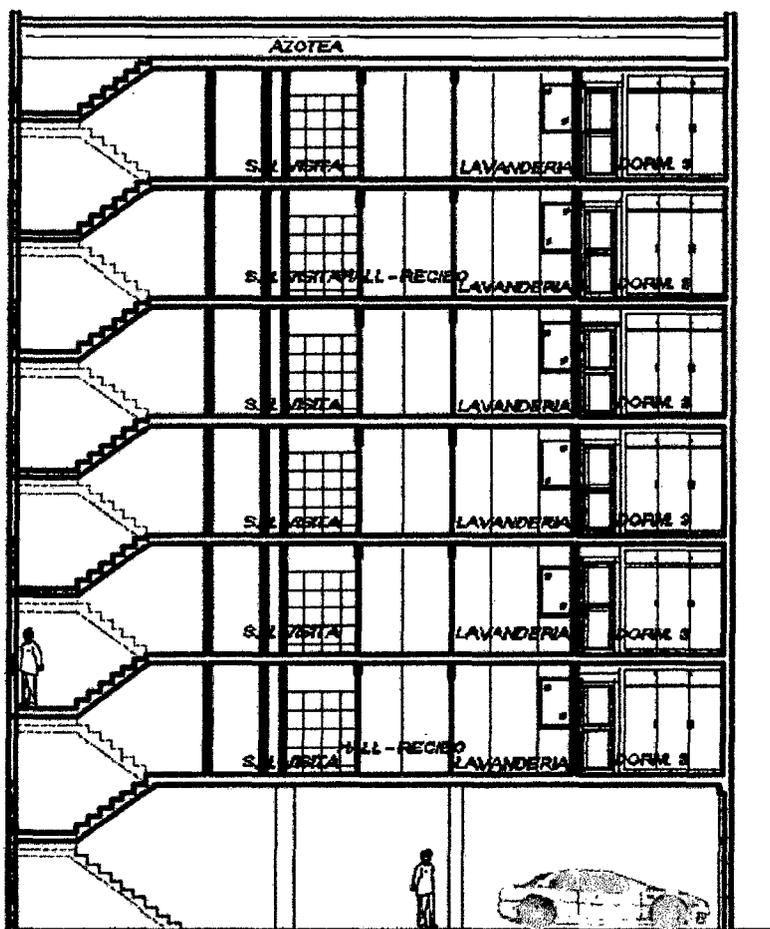


Figura 4. 3: Corte Transversal de la Edificación

La tipología estructural del edificio se define como concreto armado, compuesta por un sistema de pórticos sismo resistente constituido por columnas y vigas de concreto armado cuyo $f'c$ es de 210 Kg/cm^2 y siendo sus características las siguientes:

Tabla 4. 1: Características arquitectónicas de la edificación

Sistema Estructural			
Elemento	Tipo	Medidas	
Columnas	C-1	0.30 X 0.68 m	
	C-2	0.30 X 0.96 m	
	C-3	0.40 X 0.40 m	
Vigas	Vigas Principales	VP-1	0.40 X 0.50 m
	Vigas de Amarre	VA-1	0.30 X 0.40 m
	Vigas de Borde	VB-1	0.20 X 0.20 m
		VB-2	0.15 X 0.20 m
Losas	Aligeradas	20 cm	

Tabla 4. 2: Cargas consideradas para los metrados

Cargas Consideradas		
Peso Propio (losa aligerada)		300 Kg/m ²
Piso Terminado		100 Kg/m ²
Tabiquería		100 Kg/m ²
Sobrecarga	Azotea	100 Kg/m ²
	Vivienda	200 Kg/m ²
	Escalera	200/m ²

4.1.1. Metrado de Cargas por Sismo

De acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma E.030) se debe considerar un porcentaje de la carga viva adicional a la carga muerta, el porcentaje que corresponde es según el tipo de edificación, siendo en este caso el edificio de la categoría C, por lo tanto se considera: $P=100\% \text{ CM}+ 25\% \text{ CV}$. El metrado

realizado servirá para el diseño de los aisladores y los muros de corte o placas, por lo que se detallará éste en la sección de diseño.

4.1.2. Análisis Tiempo- Historia

Este método se realizará en el programa ETABS v.9.7.0 para facilitar los cálculos.

4.1.2.1. Masas asociadas a los niveles y ubicación de los centros de masas

Siendo el edificio irregular y tomando en cuenta la modelación estructural, la losa se comportará como diafragma rígido y rotará alrededor del eje Z, entonces para determinar las masas por niveles sólo se necesita introducir los metrados de los elementos no considerados como la tabiquería, acabados, etc., ya que el programa calcula las masas y la ubicación de los centros de masas:

Tabla 4. 3: Masas y ubicación de centros de masas del Edificio Convencional

Diafragmas	Masa X (Tn.s2/m)	Masa Y (Tn.s2/m)	XCM (m)	YCM (m)
Losa 1	35.8364	35.8364	7.971	12.545
Losa 2	34.6541	34.6541	8.103	12.527
Losa 3	35.3424	35.3424	7.979	12.544
Losa 4	34.6566	34.6566	8.094	12.531
Losa 5	35.3197	35.3197	7.974	12.546
Losa 6	34.6791	34.6791	8.098	12.533
Losa 7	25.3357	25.3357	7.943	12.561

4.1.2.2. Registro sísmico

Para poder observar resultados más aproximados a la realidad se realizará el análisis dinámico utilizando tres acelerogramas: el primero ocurrido el 17 de octubre de 1966 en la ciudad de Lima, el segundo ocurrido el 31 de mayo de 1970 en la ciudad de Chimbote y por último el sismo ocurrido el 03 de Octubre de 1974 en la ciudad de Lima. Estos registros sísmicos fueron escalados a 0.4g, utilizando el factor de escala: $F.E. = 0.4 \times 9.81 / a_{m\acute{a}x(sismo)}$, para que vaya acorde con nuestra norma. A continuación se describen algunas características de dichos sismos, para poder introducirlos al programa ETABS v.9.7.0:

Tabla 4. 4: Descripción de Sismos de Diseño (Acelerogramas brindados por el Instituto Geofísico del Perú)

Fecha	Componente	Duración (seg.)	Valores Máximos		
			Aceleración (cm/s ²)	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)
17 de Octubre de 1966	N08E	66	-269.336	-21.6	-16.6
31 de Mayo de 1970	N82W	45	-104.8	4.71	1.6
03 de Octubre de 1974	N82W	90	-192.5	14.5	6.4

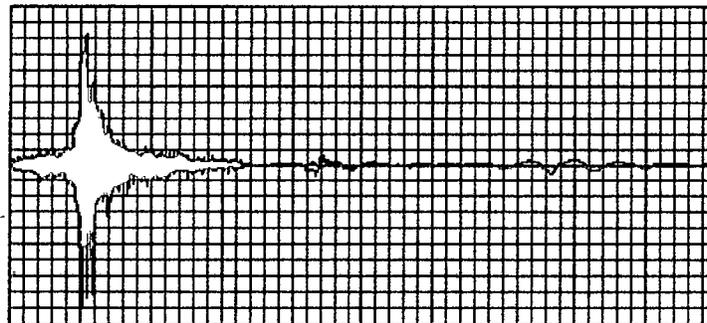


Figura 4. 4: Acelerograma del Sismo de Lima 1966

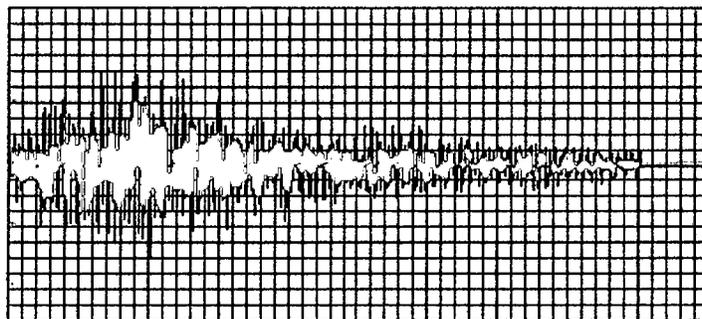


Figura 4. 5: Acelerograma del Sismo Chimbote 1970

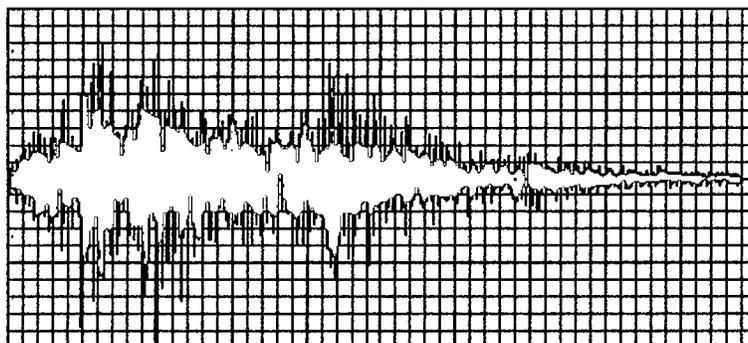


Figura 4. 6: Acelerograma del Sismo Lima 1974

4.2. MODELAMIENTO DEL EDIFICIO CONVENCIONAL

4.2.1. Evaluación Estructural de la Edificación con Irregularidad por Piso Blando

Esta evaluación lo haremos según lo explicado en el apartado 5 del capítulo 2 de la presente investigación, pero teniendo en cuenta que ya se ha realizado algunas modificaciones a nuestra estructura en cuanto a altura, por lo que influye en la rigidez y resistencia del edificio; sin embargo es necesario saber si cumplen con las especificaciones de los planos, para analizar la influencia de las propiedades de los elementos estructurales y el estado en que se encuentran, en los resultados obtenidos:

- a. Información preliminar: El señor César Lázaro Chávez que administra temporalmente la residencial "Los Olivos" nos brindó cierta información para poder desarrollar la presente tesis:

Año de construcción del Edificio: 2012

Propietario: Grupo ZANINI Constructora e Inmobiliaria SAC

Número de personas que habitan la residencial: 18

Los planos y memorias fueron solicitados al área de licencias de la Municipalidad Provincial de Cajamarca.

Se realizó así mismo una inspección visual, verificando que en cuanto a arquitectura y geometría de la edificación cumplen, la mayoría de elementos, con lo especificado en los planos.

- b. Diagnóstico y Análisis Estructural

- b.1. Levantamiento Estructural: Debido a que hemos podido obtener los planos dados por la Municipalidad Provincial de Cajamarca, sólo nos hemos limitado a realizar este levantamiento mediante inspección visual, ya que en el lugar no se nos ha permitido realizar ningún tipo de análisis, ensayo, u medición. (Véase en el anexo A: solicitud rechazada)

Notamos así mismo que, como el edificio tiene pocos años de haberse construido se encuentra en buen estado, asumiendo así que no presenta patologías.

- b.2. Propiedades y Características de los materiales: La propiedad más importante para este caso de falla por piso blando es la resistencia del concreto, que se podría haber obtenido mediante un ensayo con esclerómetro, ya que es no destructivo,

pero ante la negativa de los habitantes de dicha residencia, sólo nos basaremos en lo especificado en las memorias y planos, ya indicados en el apartado 4.1. Pero asumiendo que, se haya cumplido durante la construcción del edificio con lo estipulado en los planos y tomando en cuenta que tiene pocos años de vida útil, es probable que la resistencia del concreto con la que fue diseñada y construida no haya cambiado.

c. Evaluación de resistencia y rigidez

Para poder realizar esta evaluación tenemos que modelar el edificio con todos los datos obtenidos anteriormente y así poder calcular los índices requeridos, en consecuencia esta evaluación se realizará en los siguientes apartados.

La evaluación estructural de irregularidad por piso blando que se realiza en la presente investigación no es real, debido a que no se ha logrado verificar insitu, las especificaciones dadas en los planos, y por las modificaciones hechas a dicho edificio, ya explicadas.

d. Recomendaciones para la colocación de aisladores en escaleras

En el primer modelo propuesto en la presente investigación, aisladores elastoméricos ubicados en la base de la edificación, no habría mayor problema para aislar la escalera, ya que dicho elemento se apoya en una viga que pertenece al sistema de aislación, es decir es una viga que conecta a dos podios (elementos que soportan los aisladores). Esto se ha detallado en los planos de la presente investigación (Anexo E):

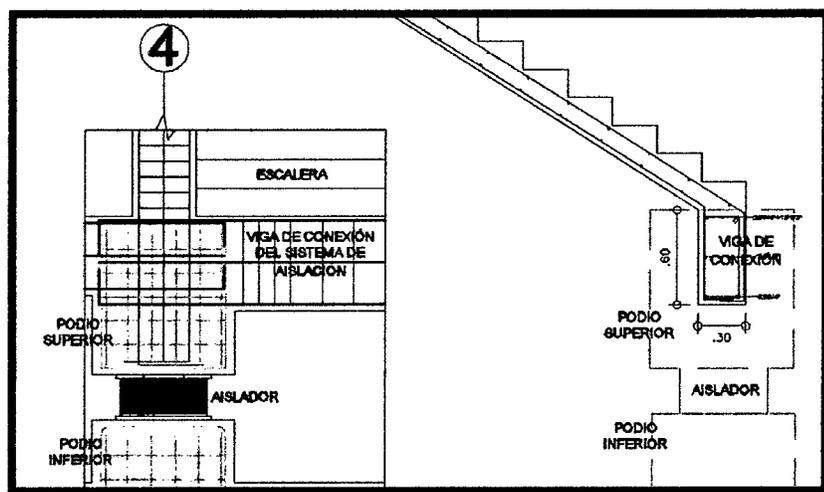


Figura 4. 7: Detalle de Aislación de la escalera cuando los Aisladores se ubican en la base del Edificio en estudio

En cuanto al segundo modelo propuesto, aisladores elastoméricos ubicados en entrepiso, se ha creído conveniente realizar una junta horizontal de 5cm de espesor, entre el final de la escalera del primer nivel y la losa del segundo nivel, para así, no impedir el libre desplazamiento de los aisladores elastoméricos ante un sismo.

Se puede considerar así también en este modelo, como otra alternativa para aislar la escalera, el uso de una escalera metálica en el primer piso, ya que por la propiedad del acero, presentar gran ductilidad, no impedirá el desplazamiento horizontal en conjunto del edificio y; en el segundo piso la escalera seguirá siendo de concreto armado, ya que no interfiere con el interfaz del sistema de aislamiento.

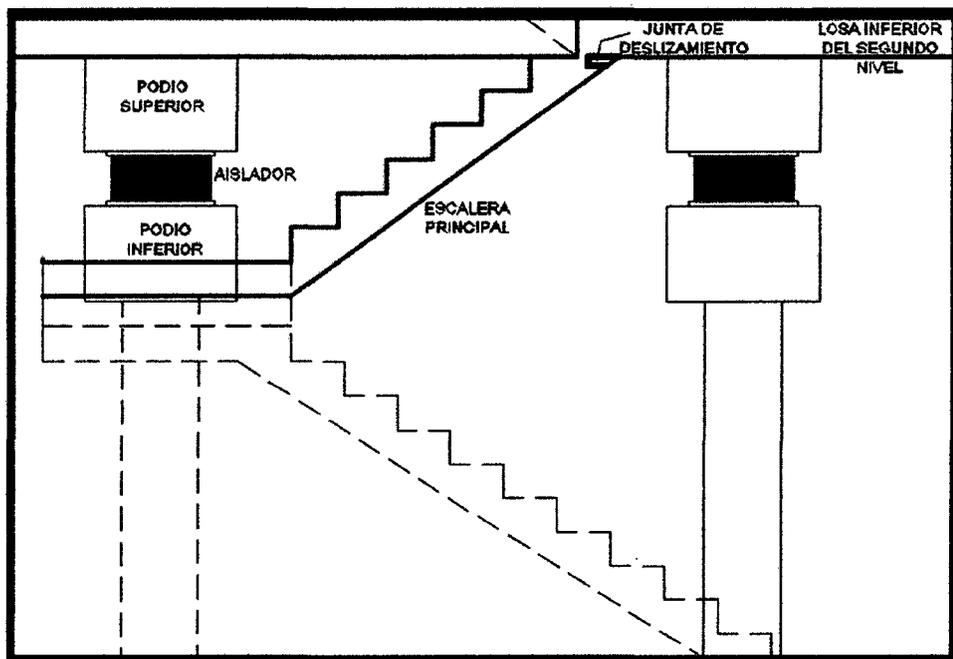


Figura 4. 8: Detalle de Aislamiento de Escalera cuando los Aisladores se ubican en Entrepiso del Edificio en estudio

4.2.2. Modelo del Edificio Convencional

El modelamiento de la estructura convencional se realizó en el programa ETABS v.9.7.0., tomando en cuenta todos los datos descritos en las secciones 4.1 y 4.2. de la presente investigación. A continuación se muestra el modelo de la edificación elaborado en dicho programa:

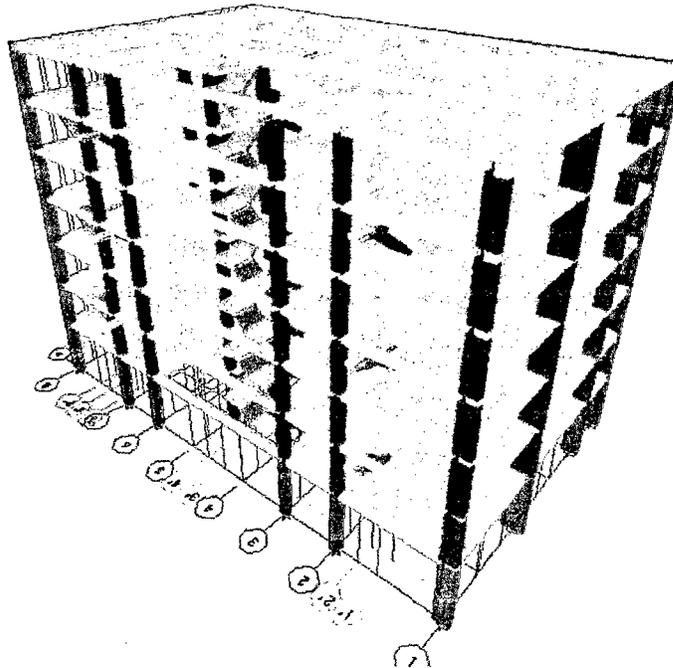


Figura 4. 9: Modelo tridimensional del Edificio Convencional

4.2.3. Calificación de falla por piso blando. Cálculos y Resultados

Los siguientes cálculos se realizarán a fin de calificar a la edificación en estudio si falla o no por piso blando, de acuerdo a nuestra norma y a otras normas descritas en teoría, para así poder verificar más adelante si la hipótesis que se ha planteado es correcta; para ello nos ayudaremos de los resultados obtenidos en el programa ETABS v.9.7.0, al modelar el edificio convencional.

4.2.3.1. Cálculo según la norma E-030

Tabla 4. 5: Cálculo de las áreas transversales de los elementos verticales de la Edificación por piso

Piso	Elemento	Área	Nº	Total
1,2,3,4,5,6 y 7	C1	0.204	15	3.06
	C2	0.288	1	0.288
	C3	0.16	12	1.92
Suma				5.268

De las ecuaciones explicadas en la sección 2.2.1.2, obtenemos:

$$K_a \times \frac{h}{h_d} < 0.85 \times K_b$$

$$5.268 \times \frac{2.4}{3.2} < 0.85 \times 5.268$$

3.951 < 4.478 *Verdadero, falla por piso blando*

$$K_a \times \frac{h}{h_d} < 0.90 (K_b + K_c + K_d)/3$$

$$5.268 \times \frac{2.4}{3.2} < 0.90 (5.268 + 5.268 + 5.268)/3$$

3.951 < 4.741 *Verdadero, falla por piso blando*

Como podemos observar en nuestra norma, se limita a calificar si un edificio falla o no por piso blando sólo por la diferencia en alturas (razón por la cual se modificó la altura original del edificio en estudio para que cumpla la condición de irregularidad), no tomando en cuenta otros métodos de calificación, como si lo hacen otras normas antes mencionadas, que califican dicha irregularidad en base a los desplazamientos, las fuerzas internas, etc.

4.2.3.2. Cálculo según otras normas

Obtenemos primero algunos datos como, los desplazamientos tanto en la dirección "X" como en "Y", que son proporcionados por el programa ETABS v.9.7.0.

Tabla 4. 6: Desplazamientos y Derivas por piso debido al Sismo Lima66

Pisos	Desplazamiento X (m)		Desplazamiento Y (m)		ΔX	ΔY
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo		
Piso 1	0.0196	-0.0175	0.0112	-0.0097	0.0058	0.003615
Piso 2	0.0322	-0.029	0.0226	-0.0201	0.004904	0.004969
Piso 3	0.0423	-0.0387	0.0328	-0.0298	0.004588	0.004677
Piso 4	0.0498	-0.0461	0.0414	-0.038	0.003705	0.004165
Piso 5	0.0556	-0.0519	0.049	-0.0442	0.003232	0.003354
Piso 6	0.0598	-0.0558	0.0544	-0.0484	0.00254	0.002596
Piso 7	0.0624	-0.058	0.0577	-0.0508	0.001864	0.002027

Tabla 4. 7: Desplazamientos y Derivas por piso debido al Sismo Chimbote70

Pisos	Desplazamiento X (m)		Desplazamiento Y (m)		ΔX	ΔY
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo		
Piso 1	0.0146	-0.0146	0.0096	-0.0097	0.004321	0.003139
Piso 2	0.0246	-0.0246	0.0203	-0.0199	0.003924	0.004397
Piso 3	0.034	-0.0336	0.0314	-0.0294	0.003844	0.004581
Piso 4	0.0421	-0.0413	0.0415	-0.0381	0.003593	0.004255
Piso 5	0.0486	-0.0477	0.0497	-0.0454	0.00336	0.003741
Piso 6	0.0532	-0.0521	0.0558	-0.051	0.002972	0.003018
Piso 7	0.056	-0.0546	0.0598	-0.0545	0.002106	0.00238

Tabla 4. 8: Desplazamientos y Derivas por piso debido al Sismo Lima74

Pisos	Desplazamiento X (m)		Desplazamiento Y (m)		ΔX	ΔY
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo		
Piso 1	0.022	-0.024	0.0155	-0.0159	0.007059	0.00492
Piso 2	0.0366	-0.0386	0.032	-0.032	0.005897	0.006598
Piso 3	0.0505	-0.0505	0.0479	-0.0463	0.005773	0.006666
Piso 4	0.0622	-0.0598	0.0613	-0.0576	0.005446	0.006094
Piso 5	0.0718	-0.0687	0.0719	-0.067	0.005037	0.00545
Piso 6	0.0793	-0.0763	0.0804	-0.0747	0.004654	0.004549
Piso 7	0.0847	-0.0814	0.0858	-0.0798	0.003434	0.003468

Tabla 4. 9: Áreas transversales según el tipo de elemento

Piso	Elemento	Área (m ²)	Nº	Total (m ²)
1,2,3,4,5 y 6	C1	0.204	15	3.06
	C2	0.288	1	0.288
	C3	0.16	12	1.92
1	Tabiquería	6.624	1	6.624
2	Tabiquería	24.271	1	24.271

Es importante calcular en esta sección la dirección crítica debido a los sismos antes descritos, ya que nos servirá para evaluar su comportamiento ante la existencia de una irregularidad por piso blando, y cómo reaccionará ante la solución planteada.

Para ello utilizaremos también el programa ETABS v.9.7.0, y calcularemos qué dirección presenta menos rigidez, que será la más crítica.

Tabla 4. 10: Rigidez en Dirección "X" del Edificio Convencional

Piso	Carga	Localización	F _x (Ton)	δ _x (m)	K _x (Ton/m)
Piso 7	L74X MAX	Arriba	149.51	0.0054	27687.0
Piso 6	L74X MAX	Arriba	333.17	0.0075	44422.7
Piso 5	L74X MAX	Arriba	464.88	0.0096	48425.0
Piso 4	L74X MAX	Arriba	512.1	0.0117	43769.2
Piso 3	L74X MAX	Arriba	511.37	0.0139	36789.2
Piso 2	L74X MAX	Arriba	591.94	0.0146	40543.8
Piso 1	L74X MAX	Arriba	692.13	0.022	31460.5

Tabla 4. 11: Rigidez en Dirección "Y" del Edificio Convencional

Piso	Carga	Localización	F _y (Ton)	δ _y (m)	K _y (Ton/m)
Piso 7	L74Y MAX	Arriba	151.42	0.0054	28040.74
Piso 6	L74Y MAX	Arriba	306.43	0.0085	36050.59
Piso 5	L74Y MAX	Arriba	428.65	0.0106	40438.68
Piso 4	L74Y MAX	Arriba	483.77	0.0134	36102.24
Piso 3	L74Y MAX	Arriba	530.7	0.0159	33377.36
Piso 2	L74Y MAX	Arriba	644.2	0.0165	39042.42
Piso 1	L74Y MAX	Arriba	730.76	0.0155	47145.81

Podemos observar en las tablas anteriores que la dirección menos rígida en el primer piso, donde se genera la irregularidad por piso blando, es la dirección "X", sin embargo en los demás niveles la dirección menos rígida es la dirección "Y" por lo que tendríamos que analizar ambos casos con mucha atención, pero en

especial la dirección "X", ya que el primer piso donde se genera la falla, la dirección más crítica es ésta.

Con los datos anteriormente obtenidos y/o calculados podemos desarrollar el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 1: Cuadro Resumen de cálculos para calificación de falla por piso blando

NORMA	CRITERIO	RESULTADO
Norma Chilena: NCh 433.0f1996 Modificada en 2009 NCh 433.2745- 2003	En la primera norma el análisis de esta irregularidad es cualitativo, ya que no especifica la falla por piso blando, con lo cual podemos observar en nuestra edificación una discontinuidad de rigideces en los elementos verticales, ya que en el primer nivel presenta poca tabiquería comparada con el segundo nivel. Mientras que en la segunda norma se indica: $K_i < 0.7 \times K_{i+1}$ $5.268 < 0.7 \times 5.268$	Falla por piso blando según la primera norma mientras que con la segunda no fallaría.
Norma Venezolana: COVENIN1756- 1:2001	$K_i < 0.7 \times K_{i+1}$ $5.268 + 6.624 < 0.7 \times (5.268 + 24.271)$ $11.892 < 20.6773, \textit{verdadero}$	Falla por piso blando
EE.UU: ASCE 7 - 10 (IBC). Manual Seismic Design	SISMO LIMA 1966: En X: $0.7 \times 0.0058 > 0.004904$ $0.00406 > 0.004904, \textit{Falso}$ $0.8 \times 0.0058 > \frac{(0.0049 + 0.0046 + 0.0037)}{3}$ $0.0046 > 0.0044, \textit{verdadero}$ En Y: : $0.7 \times 0.003615 > 0.004969$ $0.0025305 > 0.004969, \textit{Falso}$ $0.8 \times 0.0036 > \frac{(0.0050 + 0.0047 + 0.0042)}{3}$	Tiende a fallar por piso blando en la dirección "X", de acuerdo al sismo de Lima de 1966, Lima 1974. Así mismo sabemos que es esta dirección la más crítica, en el caso del primer nivel,

	<p style="text-align: center;">$0.00288 > 0.0046$, <i>Falso</i></p> <p>SISMO CHIMBOTE 1970:</p> <p>En X: $0.7 \times 0.004321 > 0.003924$</p> <p style="text-align: center;">$0.002781 > 0.003924$, <i>Falso</i></p> <p>$0.8 \times 0.0043 > \frac{(0.0039 + 0.0039 + 0.0036)}{3}$</p> <p style="text-align: center;">$0.0034 > 0.0038$, <i>Falso</i></p> <p>En Y: $0.7 \times 0.003139 > 0.004397$</p> <p style="text-align: center;">$0.002197 > 0.004397$, <i>Falso</i></p> <p>$0.8 \times 0.0031 > \frac{(0.0044 + 0.0046 + 0.0043)}{3}$</p> <p style="text-align: center;">$0.00248 > 0.0044$, <i>Falso</i></p> <p>SISMO LIMA 1974:</p> <p>En X: $0.7 \times 0.007059 > 0.005897$</p> <p style="text-align: center;">$0.004941 > 0.005897$, <i>Falso</i></p> <p>$0.8 \times 0.0071 > \frac{(0.0059 + 0.0058 + 0.0054)}{3}$</p> <p style="text-align: center;">$0.0057 > 0.0057$, <i>son iguales</i></p> <p>En Y: $0.7 \times 0.00492 > 0.006598$</p> <p style="text-align: center;">$0.003444 > 0.006598$, <i>Falso</i></p> <p>$0.8 \times 0.0049 > \frac{(0.0066 + 0.0067 + 0.0061)}{3}$</p> <p style="text-align: center;">$0.00392 > 0.0065$, <i>Falso</i></p>	<p>comprobándose así una posible falla.</p>
<p>Ecuador:</p> <p>Código Ecuatoriano de la Construcción 2002</p>	<p>SISMO LIMA 1966:</p> <p>En X: $0.005800 < 1.3 \times 0.004904$</p> <p style="text-align: center;">$0.005800 < 0.0063752$, <i>verdadero</i></p> <p>En Y: $0.003615 < 1.3 \times 0.004969$</p> <p style="text-align: center;">$0.003615 < 0.0064597$, <i>verdadero</i></p> <p>SISMO CHIMBOTE 1970:</p> <p>En X: $0.004321 < 1.3 \times 0.003924$</p>	<p>No falla por piso blando</p>

	<p style="text-align: center;">$0.004321 < 0.0051012$, verdadero</p> <p>En Y: $0.003139 < 1.3 * 0.004397$ $0.003139 < 0.0057161$, verdadero</p> <p>SISMO LIMA 1974:</p> <p>En X: $0.007059 < 1.3 * 0.005897$ $0.007059 < 0.0076661$, verdadero</p> <p>En Y: $0.00492 < 1.3 * 0.006598$ $0.00492 < 0.008577$, verdadero</p>	
<p>Criterio dado por San Bartolomé</p>	<p>Según este criterio debemos considerar el momento provocado por el desplazamiento en el piso blando, producido debido a un evento sísmico, si este desplazamiento es negativo entonces no se producirá falla por piso blando, en cambio si es positivo el desplazamiento, se producirá una rótula plástica y por ende fallaría.</p> <p>Como podemos observar en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8, el desplazamiento mayor del primer nivel debido al sismo de Lima 1966, Chimbote 1970 y Lima 1974 tiene signo positivo por lo tanto se produce un momento positivo, y falla en la dirección "X" por piso blando; así mismo el mayor desplazamiento en la dirección "Y" es positivo por lo que también tendería a fallar por piso blando:</p> <p style="text-align: center;">$M > m(F)$ Dirección X $M > m(F)$ Dirección y</p>	<p>Tiende a fallar por piso blando en la dirección "X" debido a los sismo Lima 1966, Lima 1974 y Chimbote 1970, así también tiende a fallar por piso blando en la dirección "Y"</p>

En el cuadro 4.1 podemos observar que existen varios criterios para calificar a una estructura si falla o no por piso blando. Dándose en nuestro caso, con el criterio de nuestra norma, una falla por piso blando; sin embargo otras normas toman en cuenta el comportamiento interno de la estructura, y según esto no fallaría por piso blando en algunos casos.

Por lo que en la presente tesis realizaremos, ya sea o no que falle por piso blando, el modelamiento de la estructura, y la analizaremos tanto de manera cuantitativa como cualitativa, observando que cambios se generaría cuando se utilizan los aisladores ubicándolos tanto en la base de la edificación como en entrepiso, sobretodo en la dirección crítica.

Ahora bien para poder complementar la evaluación de la falla por piso blando del apartado c de la pág.98, utilizaremos el valor de la deriva máxima, obtenida de las combinaciones de carga con las cuales se ha modelado la estructura en el programa. En este caso los valores máximos los encontramos en las envolventes, tal como se puede observar en el siguiente cuadro:

Tabla 4. 12: Derivas máximas tanto en la dirección "X" como en "Y" debido a las máximas combinaciones de cargas

Piso	Ítem	Carga	Deriva X	Deriva Y
PISO 7	Max Drift X	ENVE1	0.003474	
PISO 7	Max Drift Y	ENVE1		0.003562
PISO 7	Max Drift X	ENVE2	0.001901	
PISO 7	Max Drift Y	ENVE2		0.002121
PISO 7	Max Drift X	ENVE3	0.002151	
PISO 7	Max Drift Y	ENVE3		0.002473
PISO 6	Max Drift X	ENVE1	0.004683	
PISO 6	Max Drift Y	ENVE1		0.004611
PISO 6	Max Drift X	ENVE2	0.002568	
PISO 6	Max Drift Y	ENVE2		0.002659
PISO 6	Max Drift X	ENVE3	0.002998	
PISO 6	Max Drift Y	ENVE3		0.003079
PISO 5	Max Drift X	ENVE1	0.00536	
PISO 5	Max Drift Y	ENVE1		0.005567
PISO 5	Max Drift X	ENVE2	0.003249	
PISO 5	Max Drift Y	ENVE2		0.003472
PISO 5	Max Drift X	ENVE3	0.003467	
PISO 5	Max Drift Y	ENVE3		0.003794

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
"ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

PISO 4	Max Drift X	ENVE1	0.005555	
PISO 4	Max Drift Y	ENVE1		0.006208
PISO 4	Max Drift X	ENVE2	0.003722	
PISO 4	Max Drift Y	ENVE2		0.004279
PISO 4	Max Drift X	ENVE3	0.003712	
PISO 4	Max Drift Y	ENVE3		0.004285
PISO 3	Max Drift X	ENVE1	0.006176	
PISO 3	Max Drift Y	ENVE1		0.006764
PISO 3	Max Drift X	ENVE2	0.004614	
PISO 3	Max Drift Y	ENVE2		0.004775
PISO 3	Max Drift X	ENVE3	0.00398	
PISO 3	Max Drift Y	ENVE3		0.004669
PISO 2	Max Drift X	ENVE1	0.00646	
PISO 2	Max Drift Y	ENVE1		0.00668
PISO 2	Max Drift X	ENVE2	0.005077	
PISO 2	Max Drift Y	ENVE2		0.005049
PISO 2	Max Drift X	ENVE3	0.004219	
PISO 2	Max Drift Y	ENVE3		0.004477
PISO 1	Max Drift X	ENVE1	0.00748	
PISO 1	Max Drift Y	ENVE1		0.004968
PISO 1	Max Drift X	ENVE2	0.005944	
PISO 1	Max Drift Y	ENVE2		0.003649
PISO 1	Max Drift X	ENVE3	0.004553	
PISO 1	Max Drift Y	ENVE3		0.003186

❖ **Índice de Flexibilidad**

Tanto el índice de flexibilidad como el índice de sobreesfuerzo, ya se ha indicado en el apartado c de la sección 2.5. como las ecuaciones (2.99) y (2.100), respectivamente. Así mismo se indicó su definición y fórmula de cada uno:

$$\text{Índice de Flexibilidad} = \frac{\text{Máxima Deriva obtenida (programa)}}{\text{Máxima deriva permitida (según norma)}} \leq 1$$

Tabla 4. 13: Cálculo del índice de flexibilidad en ambas direcciones

Sentido	Índice de Flexibilidad
"X"	$\frac{0.00748}{0.007} = 1.069$
"Y"	$\frac{0.006764}{0.007} = 0.966$

En la dirección "X" el índice de flexibilidad es de 1.069, mientras que en la dirección "Y" es de 0.966. Superando en la dirección "X" el valor de 1, que es lo permitido, lo cual quiere decir que tiene mayor flexibilidad en esta dirección.

Por tanto podemos afirmar que no tiene mucha resistencia el edificio en la dirección "X"; y que en la dirección "Y" al acercarse a 1, el edificio en esta dirección tampoco posee mucha resistencia.

❖ Índice de Sobre esfuerzo

Para esto utilizaremos el programa ETABS v.9.7.0. el cual nos indica, cuando comenzamos a diseñar, que elemento se encuentra sobreesforzado, así el color rojo, me indica que su índice de sobre esfuerzo es mayor que 1, es decir que se esfuerza más de lo permitido, y pueda que requiera aumentar las dimensiones del elemento, o como hemos optado en este caso realizar un reforzamiento.

$$\text{Índice de Sobre esfuerzo} = \frac{\text{Refuerzo requerido}}{\text{Refuerzo permitido}} \leq 1$$

En la figura 4.10, observamos que el área de refuerzo de las columnas del primer piso tiene un valor = O/S #2, lo cual quiere decir que el refuerzo requerido excede el máximo permitido, entonces las columnas del primer nivel se están sobreesforzando. Por tanto se deberá realizar un reforzamiento a la estructura incluso antes de colocar los aisladores (detallado en los siguientes apartados).

En conclusión, hemos comprobado que la estructura falla por piso blando debido a la falta de rigidez y resistencia de sus elementos estructurales.

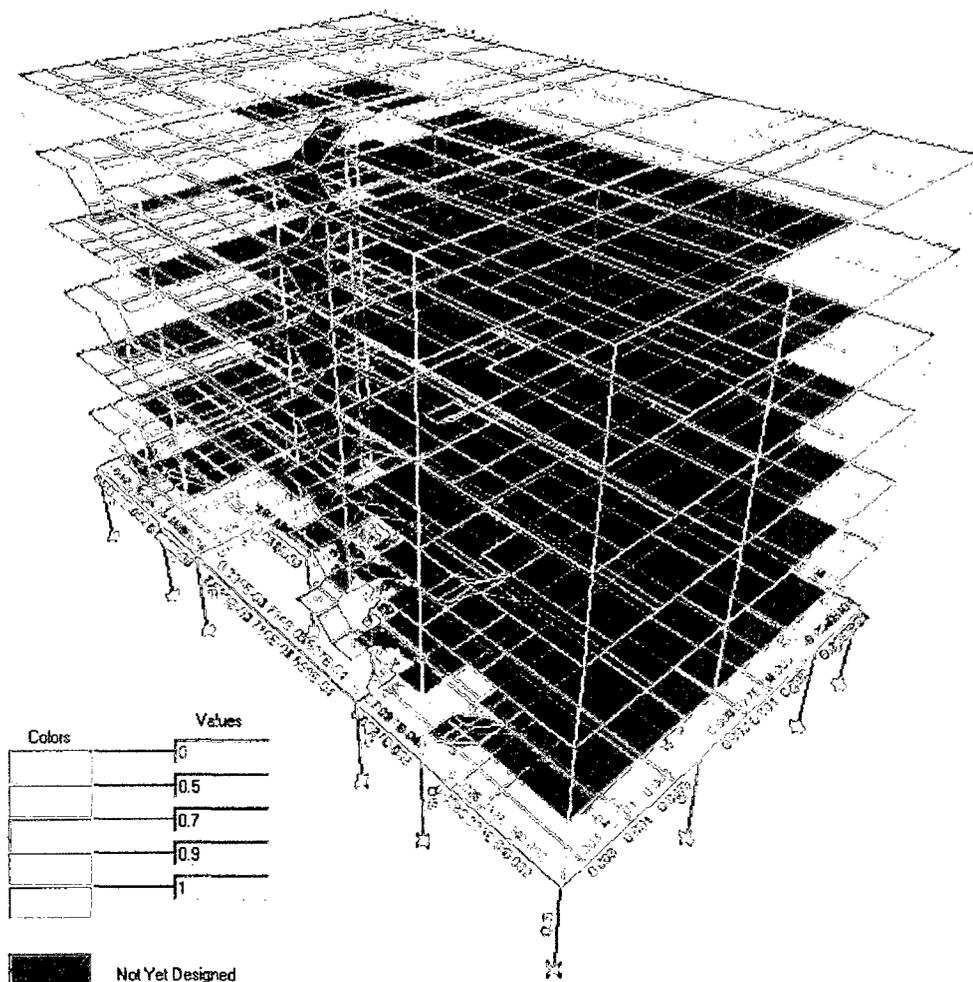


Figura 4. 10: Sobreesfuerzo en columnas del primer nivel en la Estructura Convencional

4.3. MODELAMIENTO DEL EDIFICIO AISLADO

4.3.1. Evaluación de las Condiciones de la Edificación para el uso de Aisladores.

La finalidad de realizar la evaluación de las condiciones de la edificación para utilizar los aisladores es, para saber si el uso de los aisladores pueda resultar factible y beneficioso, ya que hemos podido verificar en el modelamiento la tendencia de la estructura a fallar por piso blando. Tenemos que resaltar, que el proceso que haremos en la presente investigación, para poder clasificar a nuestra estructura según su desempeño, no será la real ya que se tendrá que hacer un estudio por desempeño, el cual es otro tema de investigación. Por lo cual sólo nos basaremos en los cuadros explicados en las páginas 81, 82, 83, 84, 85 y 86.

En la presente investigación se ha planteado colocar aisladores para salvar la falla por piso blando, sin embargo tenemos que tomar en cuenta que para el uso de estos dispositivos se necesitan ciertos requerimientos tal y como se explica en la tesis: Análisis y Diseño de Estructuras con Aisladores Sísmicos en el Perú, realizado en la Pontífice Universidad Católica del Perú, año 2012 (24) y en la norma ASCE 41-06 antes explicado en la sección 3.3.

a) Nivel de Desempeño de la Edificación

Para poder clasificar nuestra estructura de acuerdo al cuadro 3.2 de la pág. 81, explicado en el capítulo 3, debemos primero saber qué nivel de desempeño tiene, para ello nos ayudaremos de otros cuadros dados por VISION2000 del SEAOC. Primero de acuerdo a la clasificación dada en el cuadro 3.3 de la pág. 82, nuestra edificación es común pues es un residencial destinado para vivienda.

Después, según el cuadro 3.5 de la pág. 83, de acuerdo a la aceleración, en nuestro caso 0.4g nos ubicamos frente a un sismo raro.

Una vez clasificado a la edificación según su importancia y por el tipo de sismo nos vamos al cuadro 3.4 de la pág. 83, y encontramos en qué nivel de desempeño nos encontramos o debemos encontrarnos:

		Nivel de Desempeño de la Edificación			
		Totalmente Operacional	Operacional	Resguardo de Vida	Cerca al Colapso
Nivel de Demanda Sísmica	Sismos Frecuentes (43 años)				
	Sismos Ocasionales (72 años)				
	Sismos Raros (475 años)				
	Sismos muy raros (970 años)				

	Edificaciones Comunes
	Edificaciones Esenciales
	Edificaciones de Seguridad Crítica

Como podemos observar nos encontramos en el nivel de desempeño resguardo de vida.

Para este nivel de desempeño la norma ASCE/SEI 41-06, según el cuadro 3.2 de la pág. 81, considera el uso de aisladores limitado, debido a que depende si el dueño quiere realizar o no el gasto que implica el uso de aisladores en una rehabilitación, pues el costo es alto. Pero cabe resaltar que se puede compensar el gasto, debido a que las pruebas realizadas a los aisladores y comprobada su eficacia de los mismos, sabemos que mantienen a la estructura intacta después de un sismo, lo cual implica un ahorro en reparaciones.

Así mismo el uso de estos dispositivos mejora el desempeño de las estructuras ya que reducen los desplazamientos relativos, por ende las derivas.

De acuerdo a los conceptos antes descritos existen límites de derivas mucho más exigentes que en nuestra norma, tal y como lo podemos ver en el cuadro 3.7 de la pág. 85. Para nuestro caso, de acuerdo a su estado de daño (moderado) explicado en el cuadro 3.6 de la pág. 85 y al tipo de estructura (de concreto de mediana altura), deberíamos tener una deriva límite de 0.0058, no cumpliendo con esto, por lo que corroboramos una vez más la necesidad de reforzar a la estructura antes de colocar a los aisladores.

b) Esbeltez de la Edificación (De acuerdo a la ref. 24)

De la ecuación (3.29):

$$e = \frac{19.64}{15.11} = 1.299 \leq 1.5, \text{verdadero}$$

Podemos verificar que nuestro edificio en estudio, cumple con el requisito de esbeltez.

- c) Existe alrededor de la edificación un muro el cual está separado de dicha edificación unos 40 cm, esta separación nos ayuda para facilitar el desplazamiento de los aisladores.
- d) Periodo de la Estructura: El periodo calculado en el programa ETABS v.9.7.0. es de 0.9256 seg. Según lo visto en teoría si cumpliría, estaría la edificación habilitada para la colocación de aisladores, pero en vista de que no cumple con los índices de flexibilidad y de sobreesfuerzo, que a su vez están relacionados con el periodo, podemos seguir la recomendación dada por la norma ASCE7-10, de la pág. 69, para realizar el análisis de los aisladores mediante la fuerza lateral equivalente, disminuyendo nuestro periodo igual o menos de lo que indica dicha norma:

La ecuación (3.9), me indica que el periodo fundamental de la estructura, sin aislación debe ser:

$$T_a = C_t h_n^x$$
$$T_a = 0.0466 \times 19^{0.9} = 0.6596$$

Donde los factores C_t y x , se hallan de acuerdo al tipo de estructura, según la tabla 3.4 de la pág. 69.

En conclusión para poder obtener mejores resultados al utilizar los aisladores, es necesario reforzar a la estructura, que según lo analizado anteriormente necesitaría un aumento de rigidez en ambos sentido, colocando placas en todos los niveles. Así mismo, se hace necesario la colocación de dichas placas ya que como hemos podido observar las columnas del primer nivel sufren un sobreesfuerzo, debido a que las dimensiones de las mismas son deficientes para soportar las cargas de los demás niveles y las fuerzas de sismo; por lo que al utilizar dichas placas ayudarán a soportar un porcentaje de la fuerza por corte, generada por los sismos.

4.3.2. Refuerzo de la Edificación con Placas.

Realizaremos el modelamiento de la edificación utilizando placas de 2.8m de longitud entre ejes de las columnas por un espesor de 0.20m para el primer modelo (aisladores en base), y 0.25m para el segundo modelo (aisladores en entrepiso);

colocados tanto en la dirección "X" como en la dirección "Y". Las alturas de cada placa varían de acuerdo al piso (Las medidas anteriores se las ha tomado de un previo predimensionamiento que se explicará más adelante, en el diseño de dichas placas).

Una vez realizado el modelado con placas, colocadas sólo en la parte externa del edificio (no existiendo placas interiores), evaluaremos si la edificación ya se encuentra en condiciones para poder utilizar los aisladores sísmicos. A continuación presentamos los resultados obtenidos para su análisis:

❖ Periodo

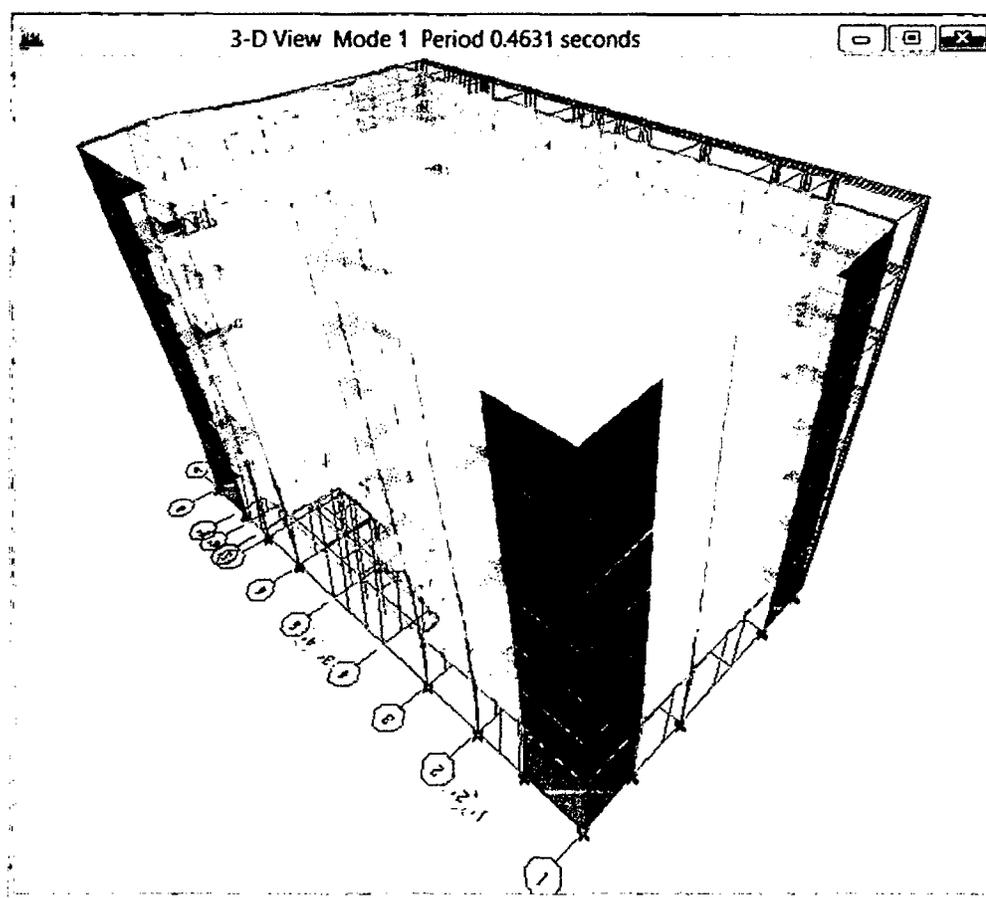


Figura 4. 11: Periodo de Edificio utilizando placas

Observamos que el periodo de la estructura ha disminuido con la colocación de las placas, que a su vez me generará una disminución de derivas, tal como se muestra en la tabla 4.14.

❖ Deriva Máxima

Tabla 4. 14: Derivas máximas del Edificio con placas debido a las máximas combinaciones de carga

Piso	Ítem	Carga	Deriva X	Deriva Y
PISO 7	Max Drift X	ENVE1	0.004003	
PISO 7	Max Drift Y	ENVE1		0.003933
PISO 7	Max Drift X	ENVE2	0.002995	
PISO 7	Max Drift Y	ENVE2		0.00281
PISO 7	Max Drift X	ENVE3	0.003267	
PISO 7	Max Drift Y	ENVE3		0.003332
PISO 6	Max Drift X	ENVE1	0.004281	
PISO 6	Max Drift Y	ENVE1		0.004256
PISO 6	Max Drift X	ENVE2	0.003153	
PISO 6	Max Drift Y	ENVE2		0.002986
PISO 6	Max Drift X	ENVE3	0.00342	
PISO 6	Max Drift Y	ENVE3		0.00357
PISO 5	Max Drift X	ENVE1	0.004518	
PISO 5	Max Drift Y	ENVE1		0.004508
PISO 5	Max Drift X	ENVE2	0.003142	
PISO 5	Max Drift Y	ENVE2		0.002989
PISO 5	Max Drift X	ENVE3	0.003472	
PISO 5	Max Drift Y	ENVE3		0.003665
PISO 4	Max Drift X	ENVE1	0.004534	
PISO 4	Max Drift Y	ENVE1		0.004537
PISO 4	Max Drift X	ENVE2	0.002897	
PISO 4	Max Drift Y	ENVE2		0.002905
PISO 4	Max Drift X	ENVE3	0.003371	
PISO 4	Max Drift Y	ENVE3		0.003588
PISO 3	Max Drift X	ENVE1	0.004258	
PISO 3	Max Drift Y	ENVE1		0.004272

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
"ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

PISO 3	Max Drift X	ENVE2	0.002641	
PISO 3	Max Drift Y	ENVE2		0.002668
PISO 3	Max Drift X	ENVE3	0.003098	
PISO 3	Max Drift Y	ENVE3		0.003277
PISO 2	Max Drift X	ENVE1	0.003509	
PISO 2	Max Drift Y	ENVE1		0.003537
PISO 2	Max Drift X	ENVE2	0.002362	
PISO 2	Max Drift Y	ENVE2		0.002399
PISO 2	Max Drift X	ENVE3	0.002523	
PISO 2	Max Drift Y	ENVE3		0.002656
PISO 1	Max Drift X	ENVE1	0.001905	
PISO 1	Max Drift Y	ENVE1		0.001904
PISO 1	Max Drift X	ENVE2	0.001395	
PISO 1	Max Drift Y	ENVE2		0.001392
PISO 1	Max Drift X	ENVE3	0.001404	
PISO 1	Max Drift Y	ENVE3		0.001437

En la tabla anterior observamos que las derivas han disminuido, lo cual indica que han disminuido también los esfuerzos, por lo que podemos intuir que las columnas ya no se encuentran sobreesforzadas; además las nuevas derivas ya están cumpliendo, con la deriva límite indicada en nuestra norma (0.007).

Así mismo, si analizamos las nuevas derivas (tabla 4.14) con la deriva límite dada por la HAZUS de 0.0058, cuando se quiere obtener un nivel de desempeño resguardo de vida, podemos verificar que también se está cumpliendo.

En conclusión decimos que, nuestra edificación está habilitada para poder colocar los aisladores elastoméricos según los modelos propuestos en el apartado 2.5.

Y para empezar, presentamos a continuación el diseño de los muros de corte o placas, junto con los aisladores elastoméricos, ayudándonos para ello del programa ETABS v.9.7.0, las normas NTE-E.030, 2003, AISC7-10, etc.

4.3.3. Diseño de Muros de Corte y de los Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento

A) Diseño de Muros de Corte

A.1. Predimensionamiento

Las placas pueden hacerse mínimo de 10 cm de espesor (muros de ductilidad limitada), pero generalmente se consideran de 20, 25 o 30cm conforme aumentemos el número de pisos o disminuyamos su densidad.

Tabla 4. 15: Espesor de Placas según el número de pisos (Villarreal, 2013)

N° de Pisos	Espesor
≤5	20 cm
6-10	25 cm
11-15	30 cm

Una manera aproximada de saber si nuestro predimensionamiento de placas es correcto, es mediante la ecuación 4.1, que se encuentra en nuestra norma E.060, la cual nos permite encontrar L (longitud requerida de placas), necesario para este caso y comprobar así, que 2.8m es suficiente para la longitud de cada placa.

$$V_{estático} = \phi V_c \quad (4.1)$$

$$\frac{ZUCS}{R} \times Peso = 0.85 * 0.53 * \sqrt{f'c} \times t \times 0.8L$$

Hallamos el primer miembro de la ecuación (4.1) mediante la siguiente tabla:

Tabla 4. 16: Parámetros para encontrar la cortante basal estática tanto en la dirección "X" como en "Y"

Parámetro	Descripción	Placas paralelas al eje	
		X	Y
Z	Zona 3 (Cajamarca)	0.4	0.4
U	Categoría C (viviendas)	1	1
S	Suelos flexibles	1.4	1.4
Tp (s)	Suelos flexibles	0.9	0.9

T (s)	Usando el ETABS v.9.7.0	0.4631	0.4557
C	$c = 2.5 \left(\frac{T_p}{t}\right); c \leq 2.5$	2.5	2.5
R	Sistema Dual	5.25	5.25
P (Ton)	De los metrados realizados	2757.70	2757.70
V (Ton)	ZUCS/RXPeso (Ton)	735.38664	735.38664

Ahora despejamos L en la ecuación (4.1) con los datos anteriores:

$$735386.638 = 0.85 * 0.53 * \sqrt{210} \times 20 \times 0.8L$$

$$L = 59.84 \text{ m}$$

Como el edificio tiene 7 niveles, L para cada nivel es 8.55 m; y si utilizamos 8 placas, la longitud de cada placa será 2.13 m, comprobando así que es suficiente utilizar 8 placas de 2.8 m de longitud entre los ejes de columnas.

De lo anterior concluimos que, las dimensiones del muro quedan: 0.20mx2.8mxh (de acuerdo al piso), ubicados exteriormente tanto en la dirección "X" como en la dirección "Y"; esto es para el caso de aisladores ubicados en la base del edificio, pero para los aisladores ubicados en entrepiso, sólo cambiará el espesor de los muros: 0.25mx2.8mxh (de acuerdo al piso).

A.2. Diseño

Esto se lo ha realizado utilizando el programa ETABS v9.7.0, el cual nos arroja el siguiente diseño tanto para flexo-compresión como para corte.

Se diseñará como ejemplo la placa del eje 1A, obteniéndose los siguientes resultados:

Uniform Reinforcing Pier Section - Check (ACI 318-05/IBC 2003)							
Story ID: STORY1 Pier ID: M2X X Loc: 13.95974 Y Loc: 0.5161612 Units: Ton-m							
Flexural Check for P-M2-M3 (RLLF = 0.400)							
Station	D/C	Flexural					
Location	Ratio	Combo	Pu	M2u	M3u		
Top	0.333	ENVE1	-65.028	118.657	41.515		
Bottom	0.869	ENVE2	-63.764	312.534	213.297		
Shear Design - First Leg Requiring Most Rebar per Unit Length							
Station	Rebar	Shear				Capacity	Capacity
Location	cm ² /m	Combo	Pu	Mu	Vu	phi Vc	phi Vn
Top Leg 1	6.926	ENVE2	-43.786	71.774	68.034	28.881	68.034
Bot Leg 1	6.926	ENVE2	-43.786	145.189	68.034	28.881	68.034

Figura 4. 12: Acero requerido para el Diseño de Placas

El primer resultado (flexural check) nos muestra el chequeo del esfuerzo a flexión que está sometido el muro, el cual se comprueba, colocando la cantidad de aceros necesarios para que se encuentren dentro del diagrama P-M-M.

Design this Pier?	Yes
LL Reduction Factor	0.4
Design is Seismic?	Yes
Pier Section Type	Uniform Reinforcing
End/Corner Bar Name	#5
Edge Bar Name	#5
Edge Bar Spacing	0.2
Clear Cover	0.04
Material	CONC210
Check/Design Reinforcing	Check

Figura 4. 13: Acero longitudinal requerido para el Diseño de Placas

En la figura 4.13 nos indica que, debemos usar para el acero longitudinal fierros de 5/8" @ 0.20m.

Regresando a la figura 4.12, el segundo resultado nos indica la cantidad de acero necesaria para el diseño por corte, es decir el acero transversal, que para nuestro caso necesitamos un área de 6.926 cm²/m:

$$\frac{6.926 \text{ cm}^2/\text{m}}{2(\text{doble cara})} = \frac{3.463 \text{ cm}^2/\text{m}}{4(\text{cada } 25\text{cm})} = 0.87 \text{ cm}^2$$

Escogemos el fierro de 1/2" y lo colocamos cada 25 cm.

Se realiza el mismo procedimiento para el diseño de las placas del segundo modelo propuesto en la presente investigación, ayudándonos nuevamente del programa ETABS v.9.7.0.

Nota: Podemos verificar el diseño de cada placa en los planos anexados.

B) Diseño de Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento

Se realizará el diseño de los aisladores elastoméricos mediante dos normas: ASCE 7-10 y la norma chilena, siendo el diseño con esta última sólo como aporte a la presente tesis y para comparar algunos parámetros.

Considerando las placas, el peso de la estructura queda:

Tabla 4. 17: Pesos sísmicos por nivel del Edificio con Placas para Diseño de Aisladores en Base

Piso	Peso(Ton)
1	561.95
2	381.24
3	391.63
4	381.19
5	391.39
6	381.46
7	268.83
Peso Total	2757.7

Tabla 4. 18: Pesos sísmicos por nivel del Edificio con Placas para Diseño de Aisladores en Entrepiso

Piso	Peso(Ton)
1	692.539
2	380.46
3	391.41
4	380.41
5	392.17
6	382.32
7	269.61
Peso Total	2888.920

Podemos notar en las tablas anteriores que, el peso sísmico para los aisladores ubicados en entrepiso de la edificación, es mayor; esto es debido a que soportan las columnas del primer piso el peso adicional de los podios y vigas que los conectan.

B.1. Diseño de Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento según norma ASCE 7-10

No existe un proceso exacto para diseñar un aislador, muchos los diseñan tomando el peso total de la edificación y dividiéndolo entre el número de aisladores propuestos, para obtener la rigidez horizontal, uniformizando así las dimensiones de los aisladores (1° criterio), otros toman en cuenta el peso de las columnas más críticas (2° criterio) y realizan el diseño en base a éstas. A continuación se realiza el diseño de dichos aisladores tomando en cuenta el primer criterio:

a. Datos de Entrada

Número de Aisladores = 35

Peso sísmico de la estructura (W)= 2757.70 Ton

Periodo objetivo deseado (TD)=2.5 seg

Deformación de corte máxima (γ_c) = 1.5

Amortiguamiento efectivo del sistema (β) = 14%

Carga Máxima= 140.34 Ton

Módulo de corte del elastómero a usar (G) = 3.80 Kg/cm²

b. Método de La Fuerza Lateral Equivalente

b.1. Calculamos el desplazamiento de diseño

Utilizamos la ecuación (3.10):

$$D_D = \frac{gS_{D1}T_D}{4\pi^2 B_D}$$

Para hallar la aceleración espectral de diseño (S_{D1}), se necesita los mapas anexados por el ASCE 7-10, pero debido a la no existencia de mapas para nuestra región, se realiza el cálculo de esta aceleración utilizando las recomendaciones explicadas en la tesis: Análisis y Diseño de Estructuras con Aisladores Sísmicos en el Perú (24).

Siendo:

Z= 0.4 (Zona 3 – Cajamarca)

U=1 (Para estructuras aisladas ya que al dimensionar los aisladores no se utiliza un factor de reducción R)

$C=1$ (Debido a que para los periodos propios de la aislación, no existe amplificación de la aceleración máxima)

$S= 1.4$ (Tipo de suelo III)

$$S_{D1} = 0.56$$

Para hallar el B_D se necesita utilizar la ecuación (3.17)

$$B_D = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln \beta_D}$$

$$B_D = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(14)} = 1.34$$

Ahora reemplazamos los valores anteriores en la ecuación (3.10):

$$D_D = \frac{9.81 \times 0.56 \times 2.5}{4\pi^2 \times 1.34} = 25.89 \text{ cm}$$

b.2. Cálculo de la rigidez horizontal del sistema y de cada aislador

Sabemos que: $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, siendo $\omega = \frac{2\pi}{T}$; por lo que al despejar el K tendríamos

la siguiente expresión:

$$K_H = \frac{W}{g} \times \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

$$K_H = \frac{2757.70}{9.81} \times \left(\frac{2\pi}{2.5}\right)^2$$

$$K_H = 1775.651 \text{ Tn/m}$$

$$K_{\text{Aislador}} = \frac{1775.651}{35}$$

$$K_{\text{Aislador}} = 50.733 \text{ Ton/m}$$

b.3. Establecemos las medidas del aislador

b.3.1. Cálculo del espesor total de goma

Utilizamos la ecuación (2.66):

$$\gamma = \frac{D_D}{H_r} \qquad H_r = \frac{D_D}{\gamma}$$

$$H_r = \frac{25.89}{1.5} = 17.26 \text{ cm}$$

b.3.2. Cálculo del área del sistema y de cada aislador

Utilizamos la ecuación (2.65):

$$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad A = \frac{K_H \times t_r}{G}$$

$$A = \frac{507.33 \times 17.26}{3.80} = 2304.239 \text{ cm}^2$$

$$d = 54.17 \text{ cm}$$

Elegimos un diámetro de 55 cm, por lo tanto la nueva área será:

$$A = \frac{\pi \times 55^2}{4} = 2375.829 \text{ cm}^2$$

b.4. Estimamos el valor de la capa de goma

$$t = 8 \text{ mm}$$

b.5. Cálculo del factor de forma S

Utilizamos la ecuación (2.69):

$$S = \frac{\theta}{4t} \text{ o } S = \frac{R}{2t}$$

$S = \frac{550}{4 \times 8} = 17.19$; siendo este factor de forma mayor que 10, lo cual es correcto.

Nota: Se recomienda que el valor S sea mayor a 10 en los aisladores, ya que esto asegura que la rigidez vertical será la adecuada y no presentará valores bajos que no serían deseados (17).

b.6. Se determina el número de capas de goma, dado por.

$$n \times t = H_r$$

$$n = \frac{17.19}{0.8} = 21.5740 = 22$$

Entonces el nuevo $H_r = 17.60 \text{ cm}$

b.7. Se propone un valor para el espesor de las placas de acero t_s , por lo que el número de capas de acero será:

$$t_s = 3 \text{ mm}$$

$$n^\circ \text{ capas de acero} = n - 1$$

Entonces el número de capas de acero es 21.

b.8. Altura total del aislador

Sumando $H_r + t_s \times n^\circ$ capas de acero tenemos:

$$h = 17.60 + 0.3 \times 21 = 23.9 \text{ cm}$$

Si consideramos el espesor de las placas de anclaje, tanto superior como inferior = 2.5 cm (de acuerdo al manual del DIS (25)), la altura total del aislador nos queda:

$$H = 28.90 \text{ cm}$$

b.9. Cálculo de la rigidez y la frecuencia vertical

Utilizamos la ecuación (2.74), ayudándonos de la ecuación (2.67); además sabiendo la relación existente entre la frecuencia vertical y la horizontal

$s = f_v / \sqrt{6} f_H$, tenemos:

$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2 + K} \quad K_v = \frac{E_c A}{H_r}$$

En la primera ecuación, K es el módulo de compresibilidad de la goma y la cual se considera que su valor es de 20394 Kg/cm².

Reemplazando valores en la primera ecuación tenemos:

$$E_c = \frac{6 \times 3.8 \times 17.19^2 \times 20394}{6 \times 3.8 \times 17.19^2 + 20394} = 5063.18 \text{ Kg/cm}^2$$

Luego con este valor podemos calcular la rigidez y frecuencia vertical.

$$K_v = \frac{5063.18 \times 2375.829}{17.60} = 683480.0828 \text{ Kg/cm}$$

$$f_v = \frac{17.19 \times \sqrt{6} \times 1}{2.5} = 16.840 \text{ Hz}$$

Verificamos que la frecuencia vertical es mayor a 10 por lo que nuestros cálculos están correctos.

b.10. Verificamos el periodo objetivo

$$K_H = 51.296 \text{ Ton/m}$$

T = 2.49, lo cual se aproxima al periodo planteado al inicio el cual es 2.5 seg

c. Verificaciones de Diseño

c.1. Verificación al Pandeo

Utilizamos la ecuación (2.87):

$$P_{crit} = \sqrt{P_E P_S}$$

c.1.1. Hallamos la carga de rigidez de corte efectiva

Utilizamos las ecuaciones (2.83) y (2.84), respectivamente:

$$P_s = G A_s \qquad A_s = A \frac{h}{t_r}$$

Siendo:

h= altura total del aislador

tr= altura total del caucho

$$A_s = \frac{2375.829 \times 23.9}{17.60} = 3226.27 \text{ cm}^2$$

$$P_s = 3.80 \times 3226.27 = 12259.82 \text{ Kg}$$

c.1.2. Hallamos la carga de rigidez de corte efectiva

Utilizamos la ecuación (2.86):

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2 3} E_c I \frac{h}{t_r}$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{2}\right)^4$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{55}{2}\right)^4 = 449180.2543 \text{ cm}^4$$

$$P_E = \frac{\pi^2}{23.9^2 \times 3} \times 5063.18 \times 449180.2543 \times \frac{23.9}{17.60} = 17787374.52$$

Entonces ahora reemplazamos en la ecuación (2.87):

$$P_{crit} = \sqrt{17787374.52 \times 12259.82} = 466.980 \text{ Tn}$$

El P_{crit} tiene que cumplir la siguiente condición: $\frac{P_{crit}}{P_{m\acute{a}x}} > 2$

Entonces: $\frac{446.980}{140.34} = 3.33 > 2$, por lo tanto es correcta la verificación por pandeo.

d. Hallamos desplazamiento máximo y total máximo

d.1. Desplazamiento máximo

Se utilizarán las ecuaciones (3.12) y (3.4):

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \qquad S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

Encontramos el k_{eff} con el 20% de aumento para G.

$$G_{eff} = 1.2 \times 3.80 = 4.56$$

Hallamos el nuevo K_H que vendría a ser el K_{eff}

$$K_{eff} = \frac{4.56 \times 2375.829}{17.60} = 61.556 \text{ Tn/m}$$

Por último hallamos el T_M

$$T_M = \sqrt{\frac{4x\pi^2 \times 2757.70}{61.556 \times 9.81 \times 35}} = 2.270$$

El B_M es 1.34 y el S_{M1} es 0.84

Entonces el valor de D_M es:

$$D_M = \frac{9.81 \times 0.84 \times 2.270}{4\pi^2 \times 1.34} = 0.353 \text{ m}$$

d.2. Desplazamiento total máximo

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

Siendo: $y= 12.80\text{m}$, $b= 15.86$, $d= 25.6$ y $e= 1.28$

$$D_{TM} = 0.353 \times \left[1 + 12.8 \times \frac{12 \times 1.28}{15.86^2 + 25.60^2} \right] = 0.429 \text{ m}$$

Revisamos de acuerdo a las propiedades de nuestro aislador en el catálogo de los aisladores elastoméricos DIS (25), para comprobar si el diseño está correcto. (Adjunto en los anexos)

e. Propiedades que utilizaremos en el programa ETABS v.9.7.0

e.1. Cálculo de Q , es decir la capacidad a cero deformación:

$$E_D = 2 \times \pi \times K_{eff} \times D_D^2 \times \beta$$

$$E_D = 2 \times 3.1416 \times 51.296^2 \times 0.14 = 3.024 \text{ Ton}$$

Despejando Q de la ecuación (2.61) obtenemos:

$$Q = \frac{E_D}{4(D_D - D_Y)}$$

$$Q = \frac{3.024}{4(0.2589 - 0.0176)} = 3.133 \text{ Ton}$$

e.2. Hallamos las rigideces: inicial (k_1) y de post-fluencia (k_2) dadas en el modelo bilineal:

$$k_2 = k_{eff} - \frac{Q}{D}$$

$$k_2 = 39.193 \text{ Ton/m}$$

Siendo: $D_y = 0.1 \times H_r = 0.0176$, podemos obtener:

$$k_1 = k_2 + \frac{Q}{D_y} = 217.230 \text{ Ton/m}$$

e.3. Hallamos la fuerza de fluencia

$$F_Y = Q + K_2 D_y$$

$$F_Y = 3.8232 \text{ Ton}$$

e.4. Hallamos el amortiguamiento efectivo

$$B_{eff} = \frac{2Q(D_D - D_y)}{\pi K_{eff} D_D^2} = 0.14$$

e.5. Relación entre la rigidez K_1 y K_2 .

$$\frac{K_1}{K_2} = 0.18$$

Para el diseño de aisladores ubicados encima de las columnas del primer piso, sólo cambiaría el peso sísmico y se trabajaría con el mismo procedimiento que los aisladores ubicados en la base del edificio. Es por ello que estos cálculos se resumen en un cuadro más adelante.

B.2. Diseño de Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento según Norma Chilena

Para este diseño se requiere saber tal como en el ASCE7-10, el desplazamiento de diseño pero en este caso la norma chilena fijan sus propios parámetros mostrados a continuación:

a. Datos iniciales

a.1 Cálculo del desplazamiento de Diseño y total de diseño

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \qquad D_{TD} = 1.1 \times D_D$$

Tabla 4. 19: Coeficiente sísmico para hallar desplazamientos según el tipo de suelo

Coeficiente sísmico de desplazamiento, CD y CM		
Tipo de suelo	CD (mm)	CM(mm)
I	200 Z	200 MM Z
II	300 Z	300 MMZ
III	330 Z	330 MMZ

Tabla 4. 20: Factor Z de acuerdo a la zonificación sísmica

Factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh 433	
Zona Sísmica	Z
1	3/4
2	1
3	1 1/4

Tabla 4. 21: Factor BD O BM de acuerdo al amortiguamiento

Amortiguamiento efectivo, β_D o β_M (porcentaje del valor crítico)	Factor BD o BM ($T_D > 2s$). Suelos I,II Y III
≤ 2	0.65
5	1
10	1.37
15	1.67
20	1.94
25	2.17
30	2.38
≥ 50	3.02

Como podemos ver el parámetro C_D se determina según la zona sísmica y el tipo de suelo. En nuestro caso nos encontramos en la zona sísmica 3 y el tipo de suelo es II. Entonces: $C_D = 330 \times \frac{5}{4} = 413 \text{ mm}$.

Para hallar el B_D , consideramos el amortiguamiento $\beta_D = 14\%$, entonces el valor

$$\text{de } B_D \text{ es } 1.61. \text{ Según la ecuación: } D_D = \frac{413}{1.61} = 25.62 \text{ cm}$$

$$D_{TD} = 1.1 \times 25.62 = 28.18 \text{ cm}$$

a.2 Cálculo del desplazamiento máximo y total máximo

$$D_M = \frac{C_M}{B_M} \qquad D_{TM} = 1.1 \times D_M$$

Tabla 4. 22: Factor de Amplificación para el Sismo Máximo Posible

Factor de Amplificación para el sismo máximo posible (Probabilidad de excedencia del PGA igual a 10% en 100 años)	
Zona sísmica	MM
1	1.2
2	1.2
3	1.2

Utilizamos la fórmula: $CM = 330MM \times Z = 330 \times 1.2 \times \frac{5}{4} = 495$

$$D_M = \frac{495}{1.61} = 30.75 \text{ cm}$$

$$D_{TM} = 1.1 \times 30.75 = 33.82 \text{ cm}$$

Por lo tanto la ficha técnica del aislador quedaría de la siguiente manera:

Número de Aisladores = 35

Peso sísmico de la Estructura (W) = 2757.70 Ton

Peso sísmico de la columna más crítica = 134.42 Ton

Periodo objetivo deseado (T_D) = 2.5 seg

Deformación de corte máxima admisible ($\gamma_{\text{máx}}$) = 2.5

Deformación de corte = 1.5

Amortiguamiento efectivo del sistema (β) = 14%

Tensión admisible de compresión, σ_{AC} = 80 Kg/cm²

Carga máxima, ($P_{\text{máx}}$) = 140.34 Ton

Desplazamiento de diseño, D_D = 25.62 cm

Desplazamiento máximo, D_M = 30.75 cm

b. Diseño del Aislador Elastomérico

b.1. Rigidez horizontal total, y de cada aislador en forma independiente:

$$K_H = \frac{W}{g} \times \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

$$K_H = \frac{2757.70}{9.81} \times \left(\frac{2\pi}{2.5}\right)^2 = 1775.651 \text{ Tn/m}$$

De cada aislador será:

$$K_H = \frac{1775.651}{35} = 50.733 \text{ Tn/m}$$

b.2. Establecemos el área del aislador:

$$A = \frac{P_{\text{Máx}}}{\sigma_{AC}}$$

$$A = \frac{14034}{80} = 1754.248 \text{ cm}^2$$

$$d = 47.26 \text{ cm}$$

Elegimos un diámetro de 55 cm entonces el área sería:

$$A = 2375.829 \text{ cm}^2$$

Calculamos un valor para H_r el cual es igual a:

$$H_r = \frac{D_D}{\gamma} \qquad H_r = \frac{25.62}{1.5} = 17.08 \text{ cm}$$

b.3. Calculamos el valor del módulo de corte, dado de la siguiente manera:

$$G = \frac{K_H H_r}{A} \qquad G = \frac{507.33 \times 17.08}{2375.829} = 3.65 \text{ Kg/cm}$$

b.4. Estimamos el valor de la capa de goma: $t = 8 \text{ mm}$

b.5. Cálculo del factor de forma S

$$S = \frac{\theta}{4t} \text{ o } S = \frac{R}{2t}$$

$$S = 17.19$$

b.6. Determinamos el número de capas de goma, dado por:

$$n \times t = H_r$$

$$n = 21$$

Entonces el nuevo $H_r = 16.80 \text{ cm}$

b.7. Se propone un valor para el espesor de las placas de acero $t_s = 3 \text{ mm}$, entonces el número de placas de acero es:

$$n^\circ \text{ capas de acero} = n - 1$$

$$n^\circ \text{ capas de acero} = 20$$

$$\sigma_s = 1.5 \frac{t_r}{t_s} \sigma_{AC} \qquad \sigma_{adm} = 0.75 \sigma_y$$

$$\sigma_s = 1.5 \frac{8}{3} 80 = 320 \qquad \sigma_{adm} = 1800$$

$$\sigma_s \leq \sigma_{adm}, \text{ cumple}$$

b.8. Altura total del aislador

$h = 22.8$ cm. A esto se le suma las placas de acero superior e inferior la cual entrega la altura total $H = 27.80$ cm; sabiendo que los espesores de cada placa de acero es de 2.5 cm.

b.9. Cálculo de la rigidez y la frecuencia vertical

$$\frac{1}{E_c} = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right) \quad s = \frac{f_v}{\sqrt{6f_H}}$$

En que K es el módulo de compresibilidad de la goma se considera que su valor es de 20394 Kg/cm²

$$E_c = 4544.20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$K_v = 642631.2558 \text{ Kg/cm}$$

$$f_v = 16.840 \text{ Hz, cumple}$$

b.10. Verificamos el periodo objetivo

$$K_H = 515.81 \text{ Kg/cm}$$

$$K_H = 51.581 \text{ Tn/m}$$

$$T = 2.48 \text{ seg}$$

c. Verificaciones de Diseño

c.1. Verificación al Pandeo

$$P_{crit} = \sqrt{P_E P_S}$$

c.1.1. Hallamos la carga de rigidez de corte efectiva

$$P_s = GA_s \quad A_s = A \frac{h}{t_r}$$

$$A_s = 3224.34 \text{ cm}^2$$

$$P_s = 11760.40 \text{ Kg}$$

c.1.2. Hallamos la carga por pandeo

$$P_E = \frac{1\pi^2}{3h^2} E_c I \frac{h}{t_r} \quad I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{2} \right)^4$$

$$I = 449180.2543 \text{ cm}^4$$

$$PE = 17531169.33 \text{ Kg}$$

$$P_{critc} = 454.063 \text{ Tn}$$

Tiene que cumplir

$$\frac{P_{crit}}{P_{m\acute{a}x}} > 2; \text{ entonces } 3.24 > 2, \text{ cumple}$$

c.2. Deformación angular máxima

$$\gamma_s = \frac{D_M}{H_r} \quad \gamma_{m\acute{a}x} = \gamma_s + \gamma_c \quad \gamma_c = 6s\varepsilon_c$$

$$\varepsilon_c = \frac{\frac{P_{m\acute{a}x}}{A}}{E_0(1 + 2ks^2)}$$

$$\gamma_s = 1.830$$

$$\gamma_c = 0.569$$

$$\gamma_{m\acute{a}x} = 2.399$$

$$\gamma_{m\acute{a}x \text{ propuesto}} = \frac{0.85\varepsilon b}{FS} = 3.117$$

$$\gamma_{m\acute{a}x} < \gamma_{m\acute{a}x \text{ propuesto}}, \text{ cumple}$$

Hallamos el K_{eff} con el 20% de amortiguado para G

$$G = 4.38$$

$$K_{eff} = 61.897 \text{ Tn/m}$$

d. Propiedades que utilizaremos en el programa ETABS V.9.7.0

d.1. Cálculo de Q, es decir la capacidad a cero deformación:

$$E_D = 2 \times 3.1416 \times 51.581^2 \times 0.14 = 2.978 \text{ Ton}$$

Despejando Q de la ecuación (2.61) obtenemos:

$$Q = \frac{2.978}{4(0.2562 - 0.0168)} = 3.110 \text{ Ton}$$

d.2. Hallamos las rigideces: inicial (k_1) y de post-fluencia (k_2) dadas en el modelo bilineal:

$$k_2 = 39.442 \text{ Ton/m}$$

Siendo: $Dy = 0.1 \times Hr = 0.0168$, podemos obtener:

$$k_1 = k_2 + \frac{Q}{Dy} = 224.572 \text{ Ton/m}$$

d.3. Hallamos la fuerza de fluencia, amortiguamiento efectivo y la relación entre la rigidez K_1 y K_2 .

$$F_y = 3.7728 \text{ Ton}$$

$$B_{eff} = \frac{2Q(D_D - D_y)}{\pi K_{eff} D_D^2} = 0.14$$

$$\frac{K_1}{K_2} = 0.1756$$

Cuadro 4. 2: Cuadro comparativo entre las normas: Chilena y de EE.UU. en cuanto a los parámetros de Diseño

PARÁMETRO	NORMA			
	ASCE 7-10		NORMA CHILENA	
	BASE	ENTREPISO	BASE	ENTREPISO
D_D (cm)	25.89	25.29	25.62	24.70
$K_{HAislador}$ (Ton/m)	51.296	54.357	51.581	52.094
K_v (Ton/m)	68348.008	78315.110	64263.126	69213.015
H_r (cm)	17.60	16.80	16.80	16.80
D (cm)	55.00	52.00	55.00	52.00
t (mm)	8.00	7.00	8.00	7.00
t_s (mm)	3.00	3.00	3.00	3.00
H (cm)	28.90	28.70	27.80	28.70
E_c (Kg/cm ²)	5063.18	6195.24	4544.20	5475.20
T (seg)	2.49	2.47	2.48	2.53
K_{eff} (Ton/m)	61.556	65.228	61.897	62.512
D_M (cm)	35.30	34.20	30.75	29.64
D_{TM} (cm)	42.90	41.70	33.82	32.60
Q (Ton)	3.133	3.470	3.110	3.253
K_2 (Ton/m)	39.193	40.638	39.442	38.924
K_1 (Ton/m)	217.230	247.176	224.572	232.559
F_y (Ton)	3.823	4.153	3.773	3.907
B_{eff}	0.14	0.15	0.14	0.15

C) Diseño de la Subestructura

Para poder complementar los diseños y poder dibujar los planos, realizaremos el diseño de los podios y las vigas del sistema de aislación.

C.1. Podios para los Aisladores ubicados en Base

Existen dos podios por cada aislador, uno ubicado en la parte superior de dicho aislador y el otro ubicado debajo de éste. El de la parte superior se diseñará teniendo en cuenta la altura a fin de que garantice que se pueda apoyar el edificio directamente sobre la zapata con gatas y reemplazar el aislador si fuese necesario.

El diseño de todo lo que esté por debajo de los aisladores debe cumplir con dos requerimientos importantes: debe ser diseñado para resistir la fuerza sísmica sin reducción y debe garantizar el acceso a los aisladores para su inspección o mantenimiento. La subestructura (y las vigas que forman parte del sistema de aislación) deberían diseñarse sin reducir las fuerzas, con la finalidad de que sea la superestructura la que entre en régimen inelástico si se excedieran las aceleraciones asumidas (24).

Los podios se predimensionan de acuerdo a las placas de anclaje ya diseñadas en el punto B y se refuerzan con el acero necesario para resistir el momento por la excentricidad de carga y el momento en la base generado por la fuerza cortante en el aislador para el desplazamiento máximo.

El diseño de los podios ubicados en la parte superior de los aisladores así como sus vigas de conexión de éstos, se lo ha realizado con la ayuda del programa ETABS v.9.7.0, el cual se detalla a continuación:

❖ Diseño de los Podios Superiores y sus Vigas de Conexión

El podio se creó como tipo frame section, diseñándolo como columna.

En la figura 4.14 nos indica la existencia de dos tipos de podios: el primer tipo de podio, es el que va sobre las columnas C_1 y C_3 , cuyas dimensiones son de $0.9 \times 0.9 \times 1\text{m}$; en cambio el segundo tipo de podio es el que se encuentra sobre la columna C_2 , cuyas dimensiones son de $1 \times 1 \times 1\text{m}$.

En la figura 4.15 se muestra las dimensiones de las vigas que conectan a dichos podios, las cuales son de dos tipos: 0.30x0.50m en todos los ejes, y 0.30x0.60m sólo la viga que se encuentra entre el eje 4 y 5, debido a que es aquí donde se asienta la escalera.

Una vez predimensionados los elementos realizamos el diseño, utilizando la herramienta Start Concrete Design, cuyos resultados se muestran en la figura 4.16.

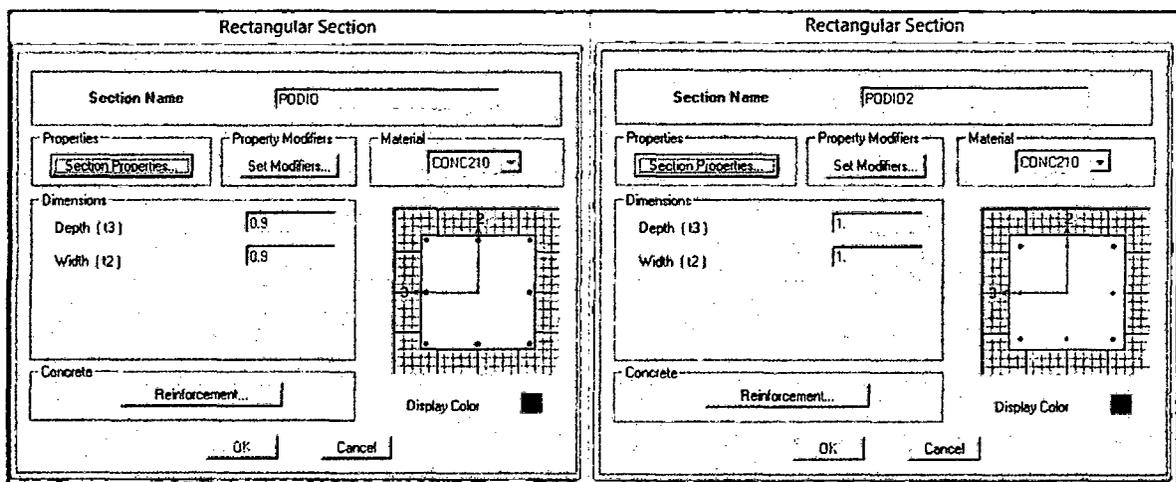


Figura 4. 14: Dimensiones de los Podios Superiores

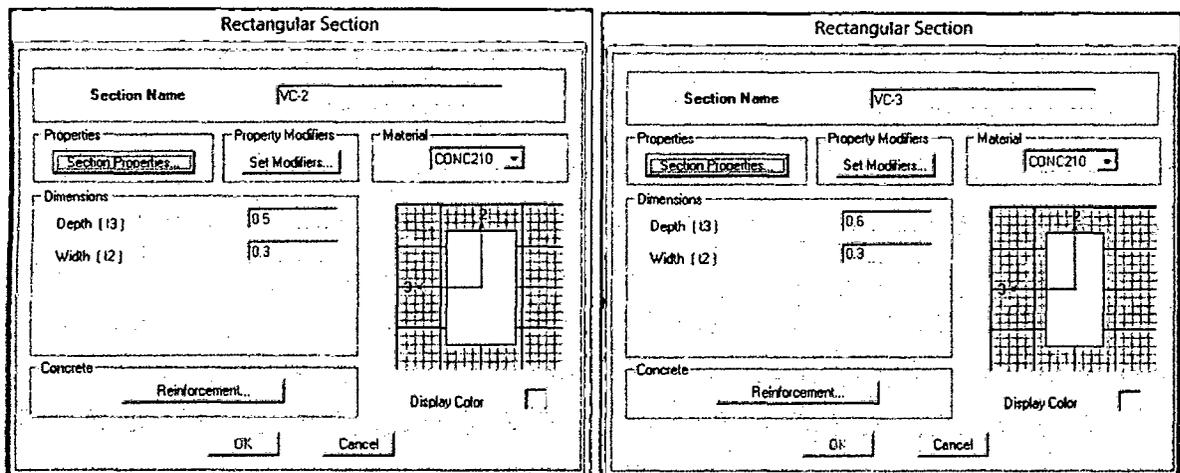


Figura 4. 15: Dimensiones de Vigas de Conexión Superiores

El acero longitudinal continuo en la parte superior, es decir que se coloca a lo largo de toda la viga es $2\phi 3/4"$, el cual hace un área de 5.7 cm^2 , suficiente para lo tramos AB, CE, y EF, pero para el tramo BC, tendríamos que colocar adicionalmente $2\phi 5/8"$, lo cual hace un área de 9.66 cm^2 .

Ahora bien el acero longitudinal continuo en la parte inferior, es $2\phi 3/4"$, el cual hace un área de 5.7 cm^2 , suficiente para lo tramos AB, CE y EF, pero para el tramo BC tendríamos que colocar adicionalmente $3\phi 1/2"$, lo cual hace un área de 9.57 cm^2 . El acero transversal se considerará de $3/8"$, distribuido según como se muestran en los planos anexos.

Una vez realizado el diseño de todas las vigas de conexión y de los podios superiores se realizarán los planos. (Véase en el Anexo E).

❖ **Diseño de los Podios Inferiores y sus Vigas de Conexión**

El sistema ubicado debajo de los aisladores consta de una losa de cimentación con vigas de cimentación y podios, en donde serán colocados los aisladores. El diseño de los podios que soportarán los aisladores se lo realizará como si fuera una columna corta, utilizando cuantía mínima que indica nuestra norma E.060, ya que no existe un diseño exclusivo para ello. Nota: Cuando el proceso de falla en columna se debe, a la falla inicial del material se clasifica a la columna como corta. Según el ACI si la relación de esbeltez $K \cdot l_u / r$ es menor a 22 la columna se clasificará como corta.

Para este caso: $\frac{1 \times 1.2}{\sqrt{1/12}} = 4.157 < 22$, columna corta.

Datos iniciales:

Carga Muerta (P_D)= 140.67 Ton

Carga Viva (P_L)= 30.78 Ton

Excentricidad (e) = 42.9 cm

f'_c = 210 Kg/cm²

f_y = 4200 Kg/cm²

b = 90 cm

h = 90 cm

Recubrimiento= 4cm

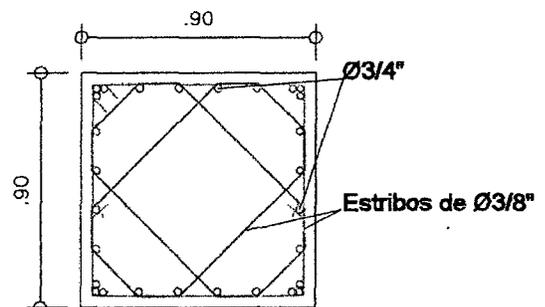


Figura 4. 18: Podio Inferior tipo 1 (0.9x0.9 m)

Diseño:

- ✓ Hallamos el d' , P_u y M_u :

$$d' = \frac{1.905}{2} + 0.9525 + 4 = 5.905 \text{ cm}$$

$$P_u = 1.4 \times 140.67 + 1.7 \times 30.78 = 249.264 \text{ Tn}$$

$$e = \frac{M_u}{P_u}, M_u = 0.429 \times 249.264 = 106.93 \text{ Tn} - m$$

Asumimos la cuantía mínima de 0.01

$$A_s = A's = \rho b d = 0.01 \times 90 \times (90 - 5.905) = 75.69 \text{ cm}^2$$

Utilizaremos $28 \phi 3/4$ ", quedando la nueva cuantía:

$$\rho = \frac{79.8}{7568.55} = 0.0105$$

- ✓ Hallamos C_b y a_b :

$$C_b = \frac{0.003 \times h}{0.003 + \epsilon} = \frac{0.003 \times 84.095}{0.0051} = 49.47 \text{ cm}$$

$$a_b = 0.85 \times C_b = 42.05 \text{ cm}$$

Verificamos si falla por tensión:

$$f's = \epsilon_s E_s$$

$$\frac{\epsilon_s}{0.003} = \frac{c_b - d'}{c_b}, \quad \epsilon_s = \frac{(49.47 - 5.905) \times 0.003}{49.47} = 0.0026$$

$$f's = 0.0026 \times 2 \times 10^6 = 5861.87, \text{ falla por tensión}$$

- ✓ Calculamos la fuerza resistente, si esta es mayor a la actuante nuestro diseño es correcto:

$$P_{nb} = 0.85 \times f'c \times a_b \times b + A's \times f_y - A_s \times f_y$$

$$P_{nb} = 0.85 \times 210 \times 42.05 \times 90 = 675.493 \text{ Tn}$$

Siendo el valor de ϕ dado por la siguiente relación:

$$\phi = 0.9 - \frac{2 \times P_u}{f'c \times b \times h}, \text{ si } P_u < 0.1 f'c A_g$$

$$\phi = 0.8997$$

Realizamos la verificación:

$$P_n = 0.85 \times f'c \times b \times d \times \left(1 - \frac{e'}{d} + \sqrt{\left(1 - \frac{e'}{d}\right)^2 + 2m\rho\left(1 - \frac{d'}{d}\right)}\right)$$

$$m = \frac{f'y}{0.85 \times f'c} = 23.53$$

$$\rho = \frac{As}{b \times d} = 0.0105$$

$$1 - \frac{e'}{d} = 0.025$$

$$1 - \frac{d'}{d} = 0.9298$$

$$P_n = 0.85 \times 210 \times 90 \times (90 - 5.905) \times (0.073) + \sqrt{(0.073)^2 + (2 \times 17.65 \times 0.0109 \times 0.9336)} = 1065.165 Tn$$

$$\phi P_n = 958.336 > P_u, \quad \text{es correcto}$$

C.2. Podios para los Aisladores ubicados en Entrepiso

Para el diseño de los podios ubicados en entrepiso también nos hemos ayudado del programa ETABS v.9.7.0, cuyos resultados se presentan a continuación:

Los podios utilizados son de dos tipos: Podio 1, de 80x80x50cm y Podio 2, de 96x96x50cm.

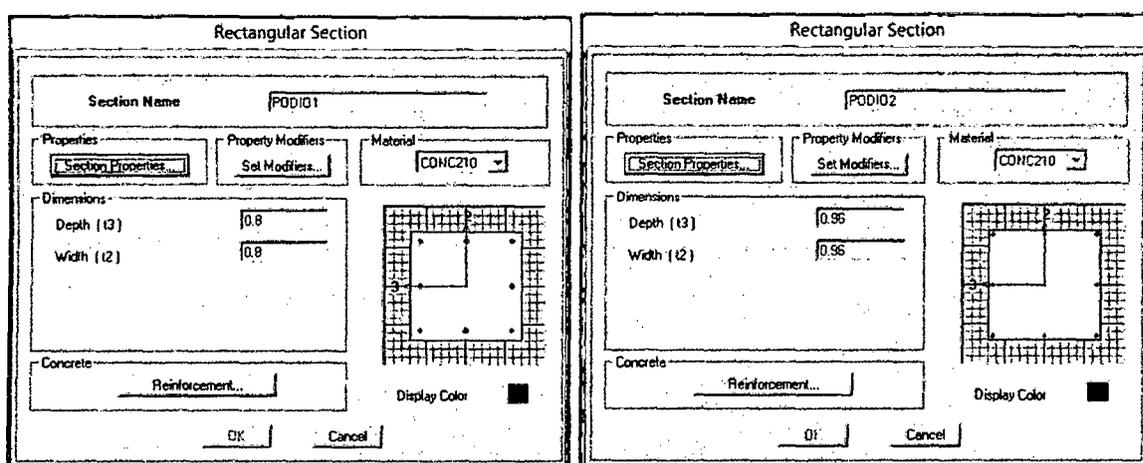


Figura 4. 19: Dimensiones de Podios ubicados encima del primer piso

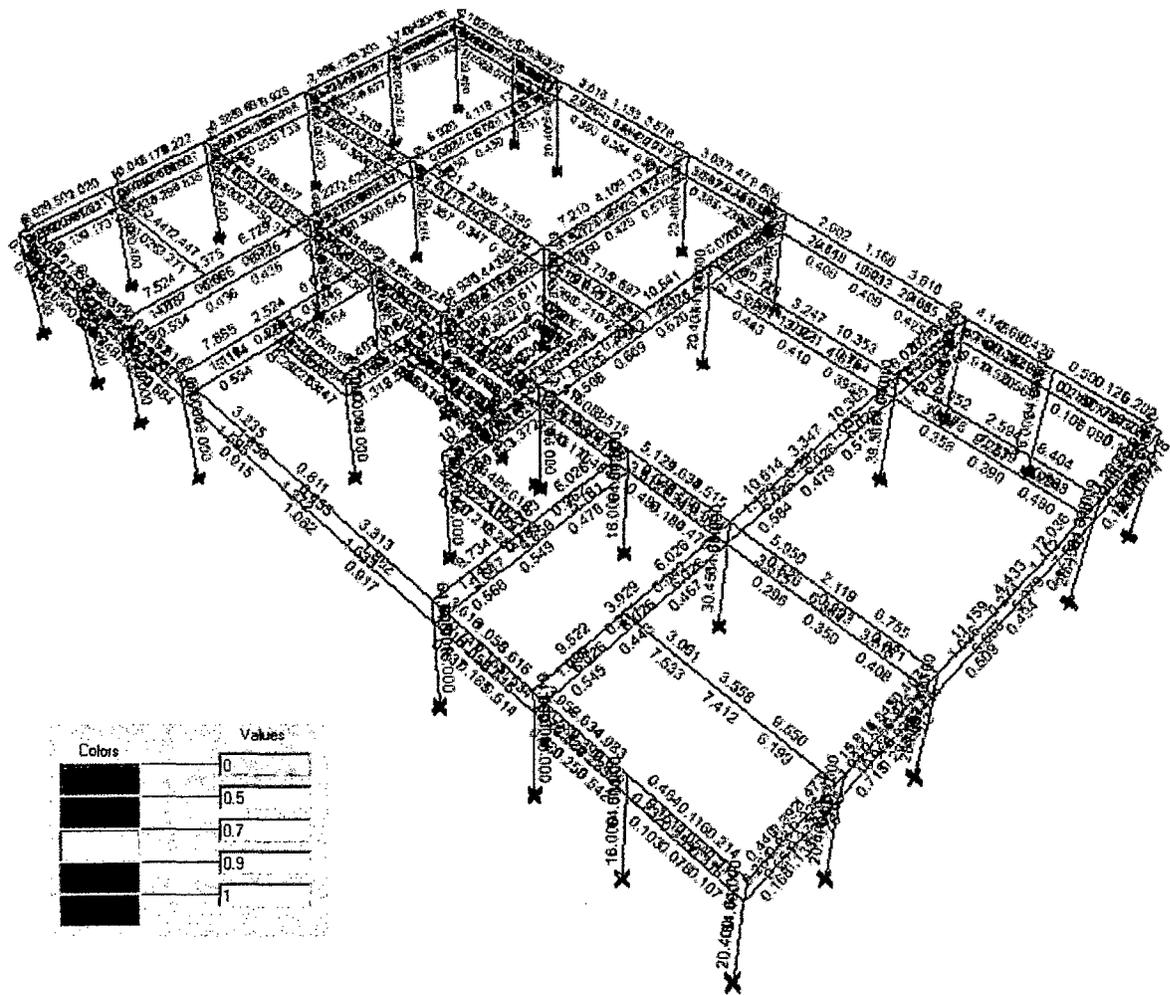


Figura 4. 20: Acero Longitudinal para los Podios ubicados encima del primer piso y sus Vigas de Conexión

Diseñaremos el eje 8A, como una muestra:

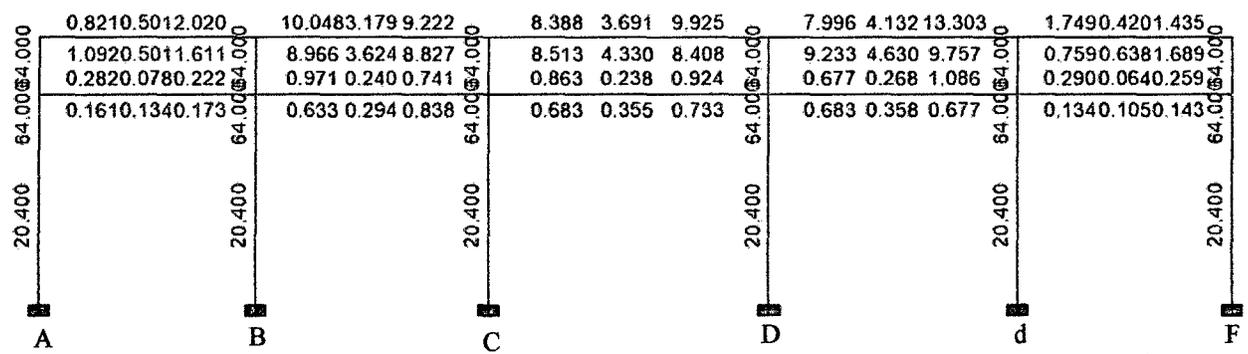


Figura 4. 21: Acero Longitudinal de las Vigas de Conexión y Podios del eje 8A

El área de acero del podio 1 es de 64 cm^2 , si utilizamos fierros de $\frac{3}{4}$ ", necesitaríamos $24 \phi \frac{3}{4}$ ", mientras que para el podio 2 que tiene 92.16 cm^2 , necesitaremos $28 \phi \frac{3}{4}$ ".

Para el diseño de las vigas se realizará el mismo proceso explicado en los diseños anteriores, vigas de conexión de los aisladores ubicados en la base de la edificación. El detallamiento de los aceros en las vigas se los puede encontrar en los planos anexos.

4.3.4. Modelo de la Estructura Aislada

Una vez realizado el diseño del aislador se introducen los datos de entrada convenientes tanto para el primer modelo propuesto, los aisladores ubicados en la base, como para el segundo modelo propuesto, los aisladores ubicados en entrepiso, tal como se detalla en las figuras 4.22 y 4.23.

The figure displays two instances of the 'NLLink Directional Properties' dialog box. The left instance is for a base isolator with the following values: Property Name: AISLADOR, Direction: U1, Type: Isolator1, NonLinear: No, Effective Stiffness: 68348.008, and Effective Damping: 0. The right instance is for an intermediate floor isolator with the following values: Property Name: AISLADOR, Direction: U2, Type: Isolator1, NonLinear: Yes, Effective Stiffness: 51.296, Effective Damping: 0, Shear Deformation Location: Distance from End-J: 0, Stiffness: 217.23, Yield Strength: 3.8232, and Post Yield Stiffness Ratio: 0.1804. Both dialog boxes include 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

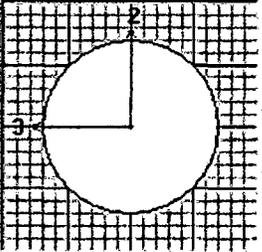
Figura 4. 22: Datos de Entrada para el Modelamiento de la Edificación con Aisladores en la Base en el programa ETABS v.9.7.0

Circle Section

Section Name AIS52

Properties:
 Property Modifiers:
 Material: ELASTOME

Dimensions: Diameter (t3) 0.52



Display Color

OK Cancel

Material Property Data

Material Name ELASTOMERC

Display Color: Color

Type of Material: Isotropic Orthotropic

Type of Design: Design None

Analysis Property Data	
Mass per unit Volume	0.2
Weight per unit Volume	2.2
Modulus of Elasticity	61952.42
Poisson's Ratio	0.4
Coeff of Thermal Expansion	9.900E-06
Shear Modulus	22125.8643

Design Property Data

OK Cancel

Figura 4. 23: Datos de Entrada para el Modelamiento de la Edificación con Aisladores en Entrepiso

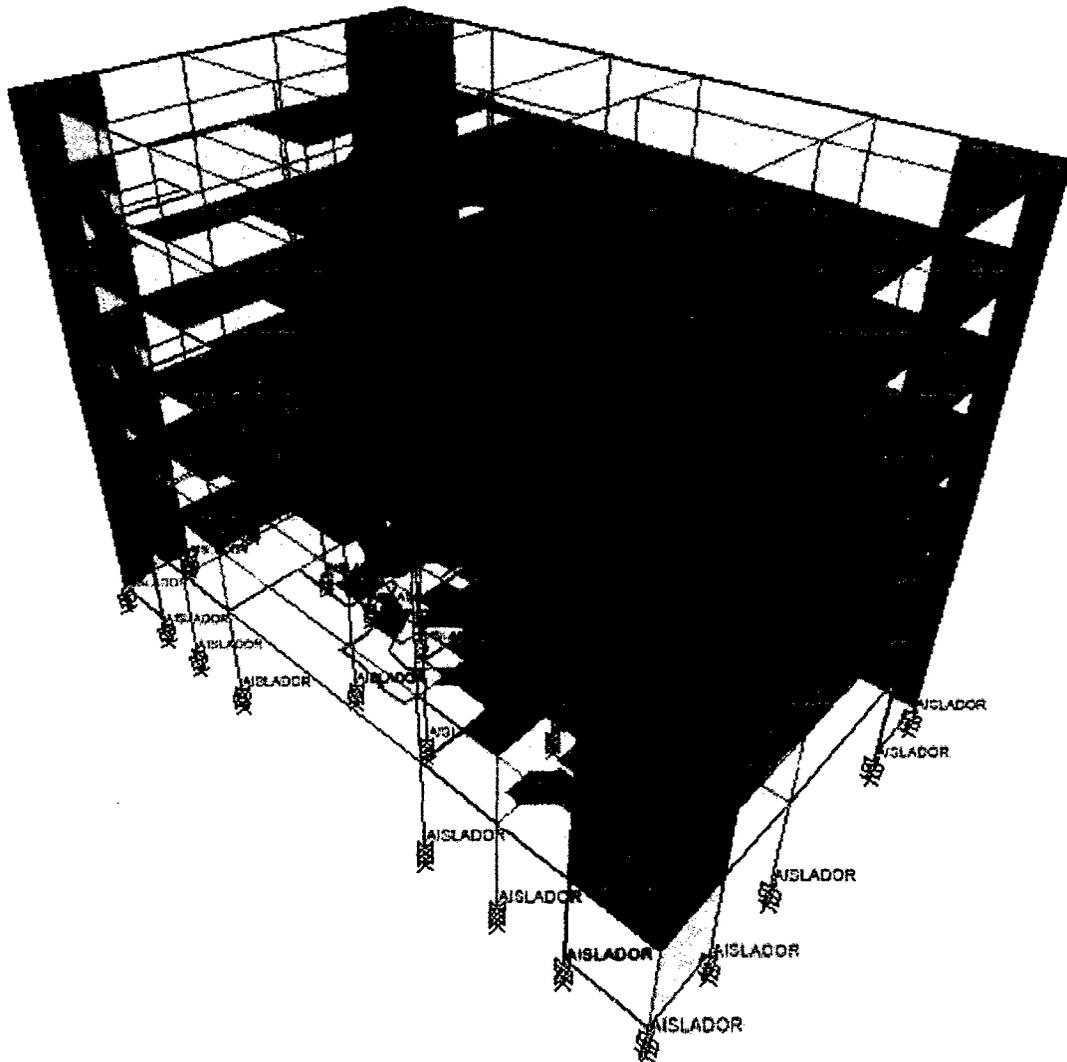


Figura 4. 24: Estructura con Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento ubicado en la Base

En la Figura 4.24 podemos notar que en el programa ETABS, ya viene predeterminado un aislador (NLLink), el cual sólo tendremos que introducir las propiedades convenientes, presentadas en la Figura 4.22, cuando éste se ubica en la base, que es lo convencional. En cambio sí lo queremos colocar encima del primer nivel tendremos que generarlo a través de las herramientas que nos proporciona el programa tal como, material properties y frame section indicados en la Figura 4.23.

En la figura 4.25 se muestra el modelo del edificio con Aisladores ubicados encima del primer nivel del edificio.

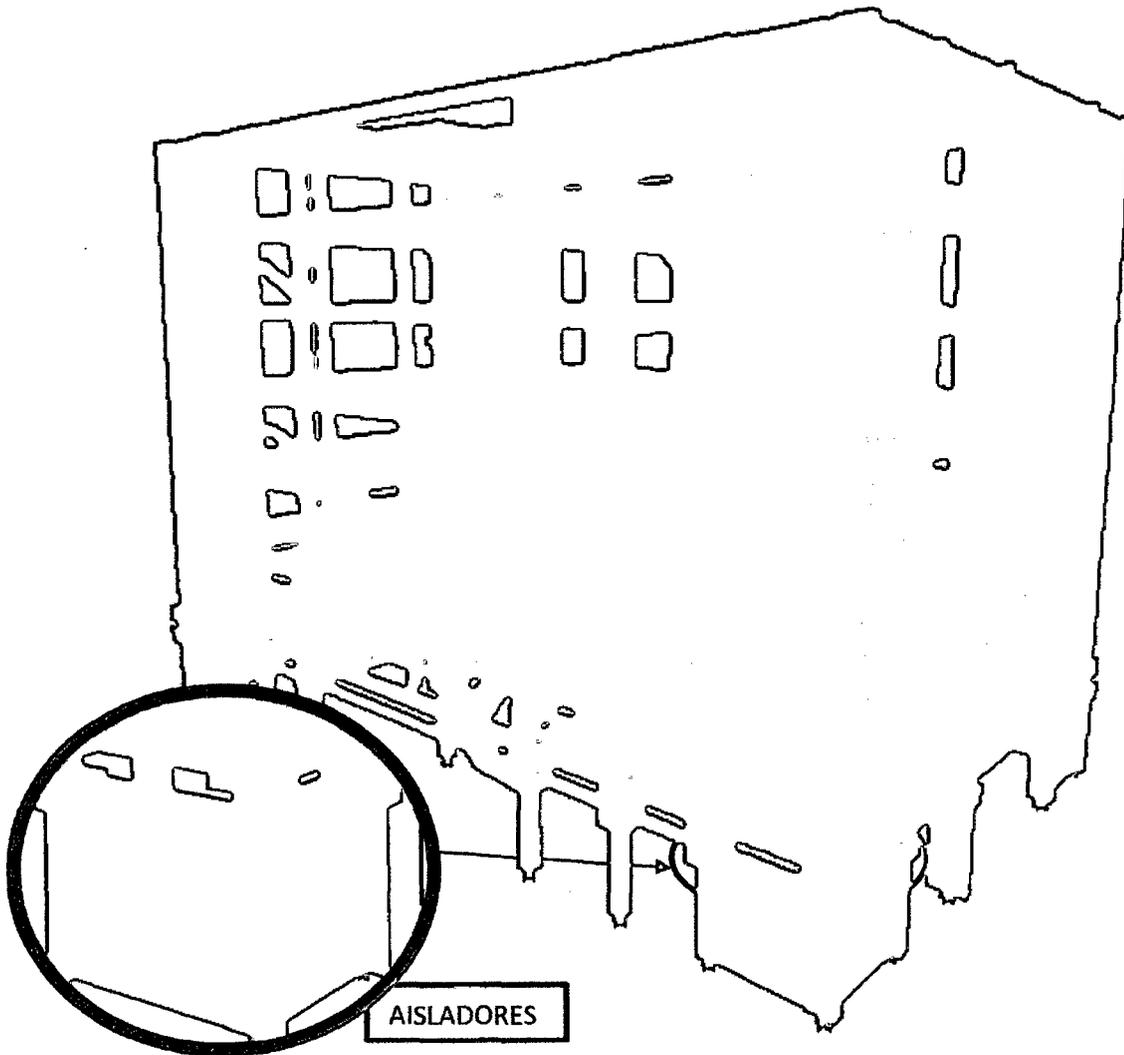


Figura 4. 25: Estructura con Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento ubicado en Entrepiso

4.4. RESULTADOS. VARIABLES DEPENDIENTES

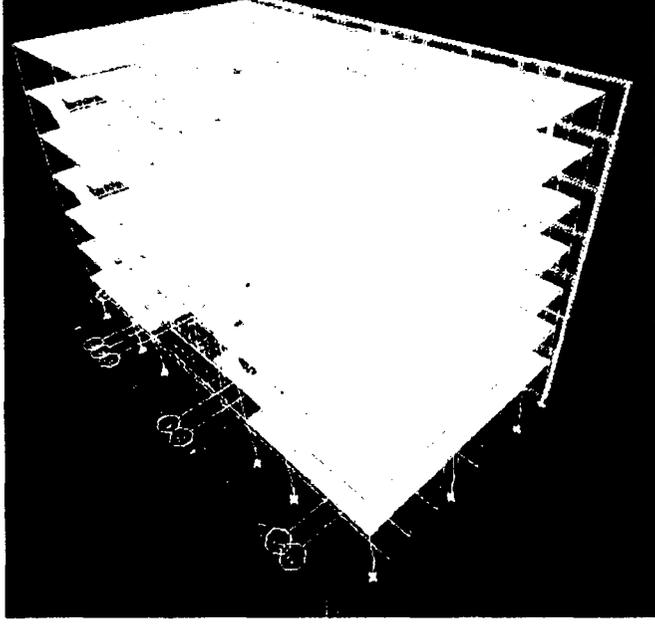
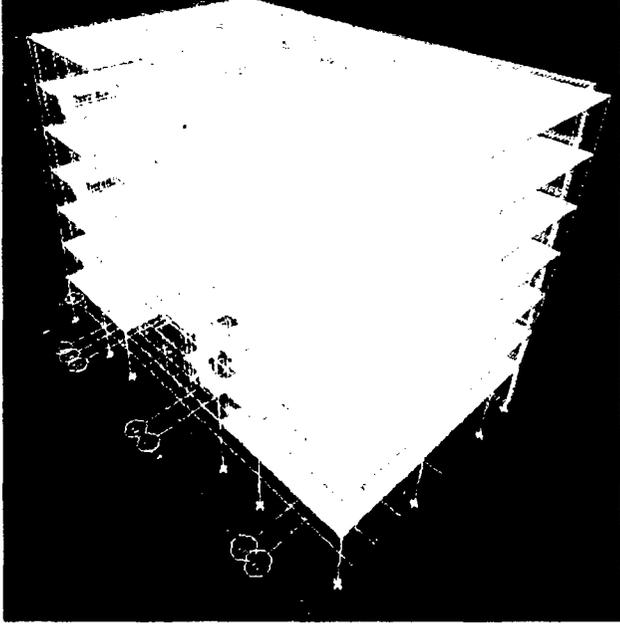
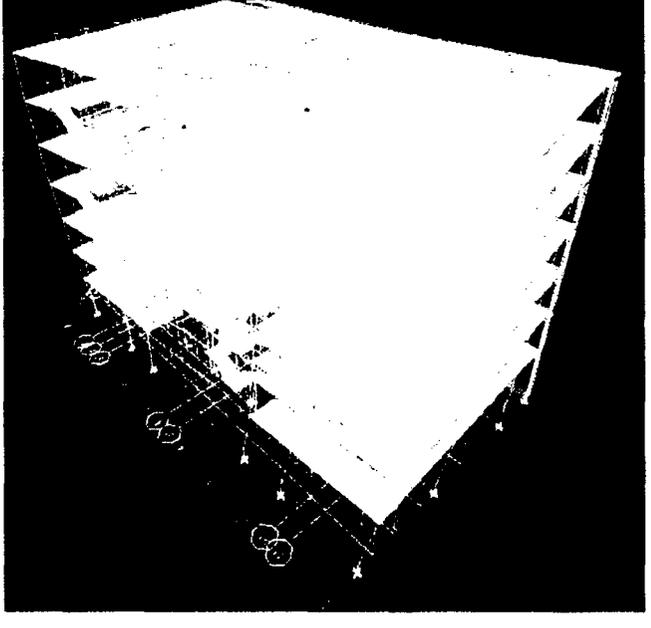
4.4.1. Vibraciones del Comportamiento sísmico. Flexibilización horizontal

En cuanto a las vibraciones del comportamiento sísmico hacemos referencia a los modos de vibración de la estructura, considerando los tres primeros ya que son los más importantes, es decir la traslación tanto en la dirección "X" como en "Y"; y por último la torsión. Los demás modos derivan de los anteriores.

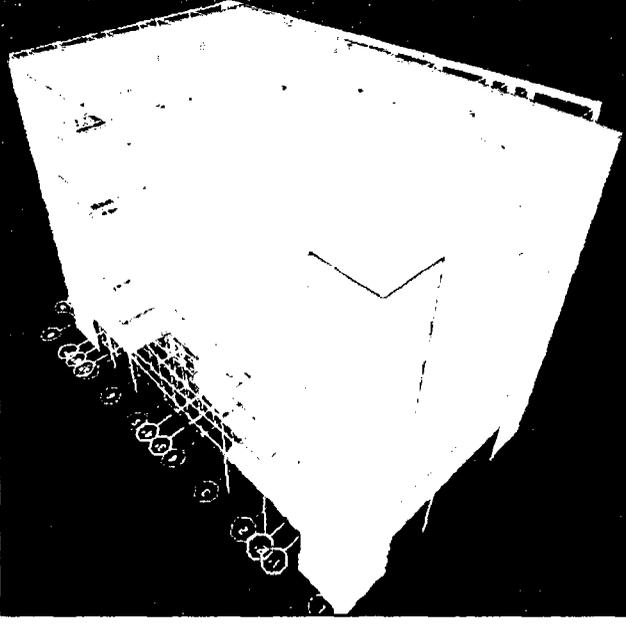
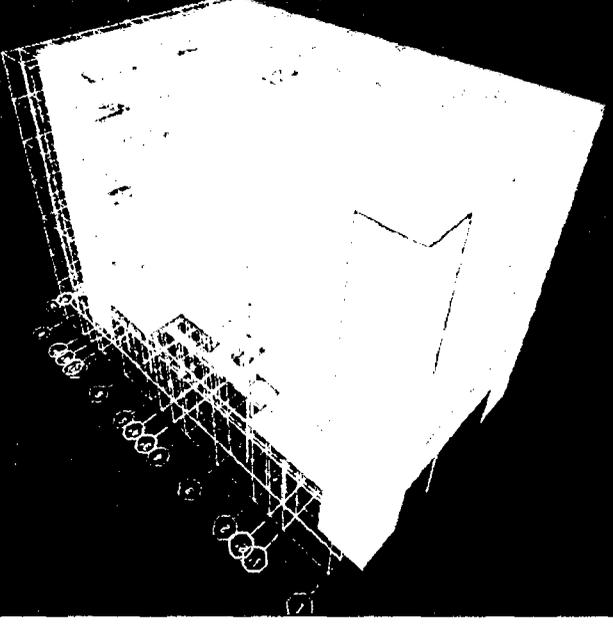
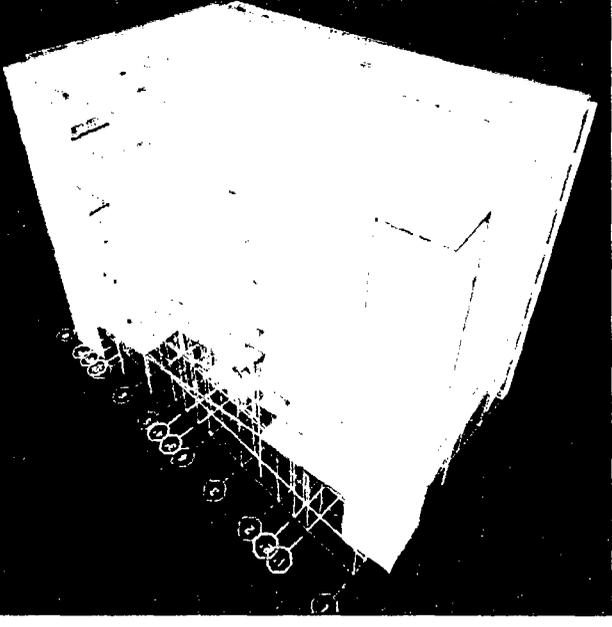
Cabe mencionar que la aislación sísmica provee a la estructura de suficiente flexibilidad horizontal para así diferenciar el periodo natural de la estructura con el periodo natural del sismo, es decir evita la resonancia.

Entonces la flexibilidad está relacionada con el periodo por lo que presentaremos a continuación los resultados obtenidos debido a la colocación de estos dispositivos, aisladores, primero ubicándolos en la base de la estructura y en un segundo modelo se los coloca por encima del primer nivel, es decir en entrepiso.

A. Modos y Periodos de la Estructura Convencional

Deformada del Modo 1	Deformada del Modo 2	Deformada del Modo 3
T=0.9256 seg	T= 0.8942 seg	T= 0.8402 seg
		

B. Modos y Periodos de la Estructura con Aisladores en la Base

Deformada del Modo 1	Deformada del Modo 2	Deformada del Modo 3
T=2.5179 seg	T= 2.4937 seg	T= 2.2226 seg
		

C. Modos y Periodos de la Estructura con Aisladores en Entrepiso

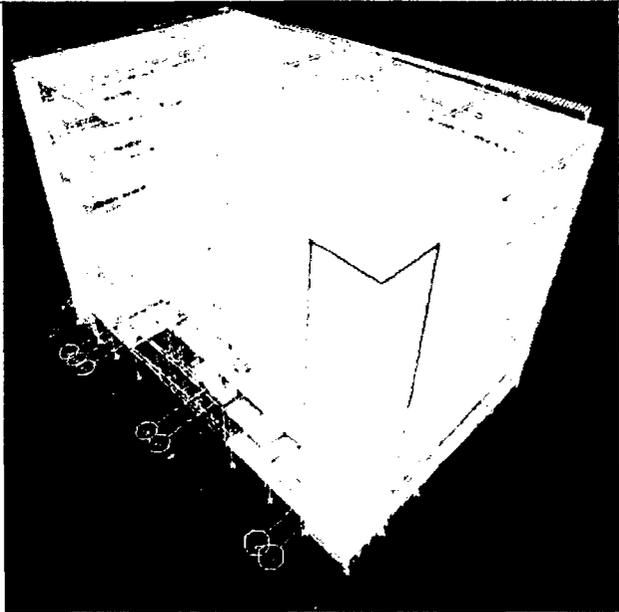
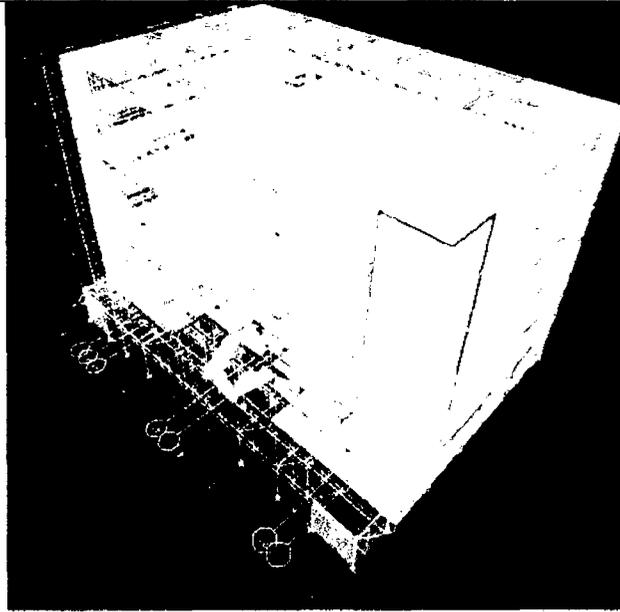
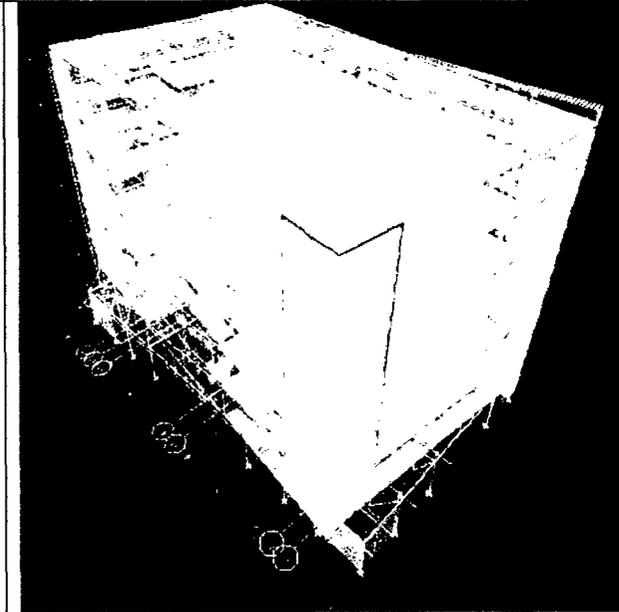
Deformada del Modo 1	Deformada del Modo 2	Deformada del Modo 3
T=2.6613 seg	T= 2.6328 seg	T= 2.3702 seg
		

Tabla 4. 23: Comparación entre el Periodo objetivo Diseñado y del Programa

Condición	Periodo (seg.)
Estructura Convencional	0.9256
E. Aislada en Base	2.5179
E. Aislada en entrepiso	2.6613

En el cuadro anterior podemos observar que el periodo objetivo utilizado para el diseño de los aisladores, es decir 2.5 seg. se acerca al periodo obtenido mediante el programa, comprobándose así la realización de un buen diseño de los aisladores tipo elastoméricos.

Con el aumento del periodo notamos una gran flexibilización de la estructura, con lo cual podemos intuir una disminución de las fuerzas sísmicas, comprobando lo dicho en los resultados posteriores.

En cuanto a la partición modal observamos que, el modo 1 ocurre en "Y", el modo 2 ocurre en "X" y el modo 3 ocurre en "Z".

4.4.1.1. Desplazamientos y Derivas

A continuación se presentarán los resultados de los desplazamientos y derivas obtenidas por piso de la edificación con aisladores, ubicados dichos dispositivos en un primer modelamiento en la base y en un segundo modelamiento encima del primer nivel, es decir en entrepiso.

La nomenclatura SA significa sistema de aislación

Tabla 4. 24: Resultados de los desplazamientos en "X" y en "Y" debido al Sismo Lima 66

PISOS	DESPLAZAMIENTO EN "X" (M)		DESPLAZAMIENTO EN "Y" (M)	
	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
Base	0.1043	0	0.1035	0
Piso 1	0.1066	0.0003	0.1061	0.0003
Aislador	-	0.1277	-	0.1266
Piso 2	0.1084	0.1294	0.1079	0.1291
Piso 3	0.11	0.1307	0.1093	0.1302
Piso 4	0.1117	0.132	0.111	0.1316
Piso 5	0.1132	0.1333	0.1123	0.1327
Piso 6	0.1147	0.1344	0.1138	0.134
Piso 7	0.116	0.1355	0.1148	0.1348

Tabla 4. 25: Resultados de los desplazamientos en "X" y en "Y" debido al Sismo Chimbote70

PISOS	DESPLAZAMIENTO EN "X" (M)		DESPLAZAMIENTO EN "Y" (M)	
	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
Base	0.0655	0	0.0655	0
Piso 1	0.0669	0.0002	0.0669	0.0002
Aislador	-	0.0751	-	0.075
Piso 2	0.068	0.076	0.0679	0.0762
Piso 3	0.069	0.0768	0.0689	0.0769
Piso 4	0.07	0.0776	0.0699	0.0777
Piso 5	0.071	0.0784	0.0708	0.0784
Piso 6	0.0718	0.0791	0.0717	0.0791
Piso 7	0.0726	0.0797	0.0725	0.0797

Tabla 4. 26: Resultados de los desplazamientos en "X" y en "Y" debido al Sismo Lima 74

PISOS	DESPLAZAMIENTO EN "X" (M)		DESPLAZAMIENTO EN "Y" (M)	
	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
Base	0.1106	0	0.1084	0
Piso 1	0.1129	0.0002	0.1111	0.0002
Aislador	-	0.1073	-	0.1054
Piso 2	0.1146	0.1088	0.1129	0.1073
Piso 3	0.1163	0.1101	0.1142	0.1084
Piso 4	0.1179	0.1114	0.1159	0.1097
Piso 5	0.1194	0.1126	0.117	0.1107
Piso 6	0.1208	0.1137	0.1185	0.1119
Piso 7	0.122	0.1148	0.1194	0.1128

En los cuadros 4.24, 4.25 y 4.26, notamos que en el primer nivel (donde ocurriría la falla por piso blando) cuando se utilizan los aisladores, indistinto a la ubicación de éstos, disminuye notablemente los desplazamientos relativos en este nivel. Así mismo podemos observar que los desplazamientos relativos en los demás niveles

son pequeños por ende sus derivas también lo serán, como lo veremos en cuadros más adelante.

Los resultados anteriores se pueden simplificar y entender mejor utilizando gráficos, así tenemos:

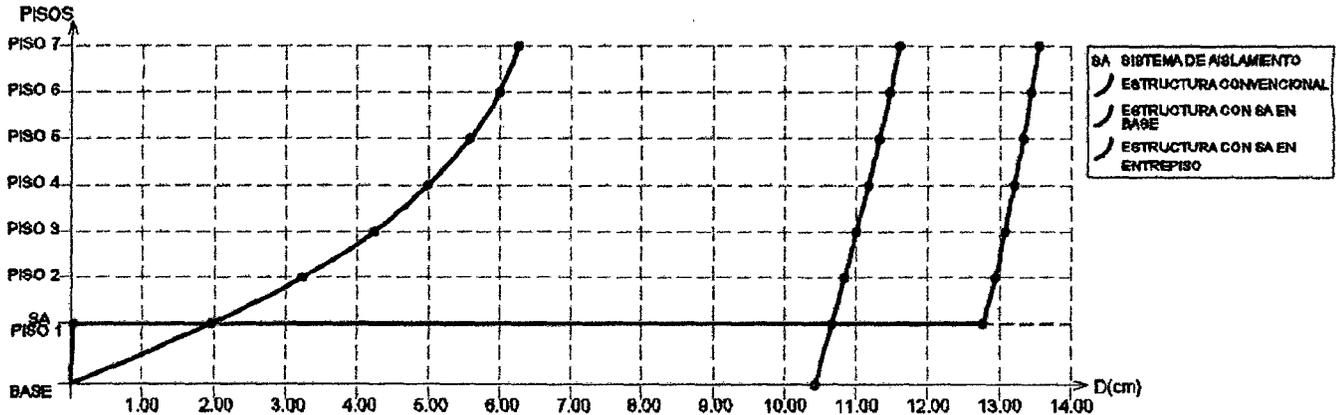


Figura 4. 26: Desplazamientos en la Dirección "X" debido al Sismo Lima66

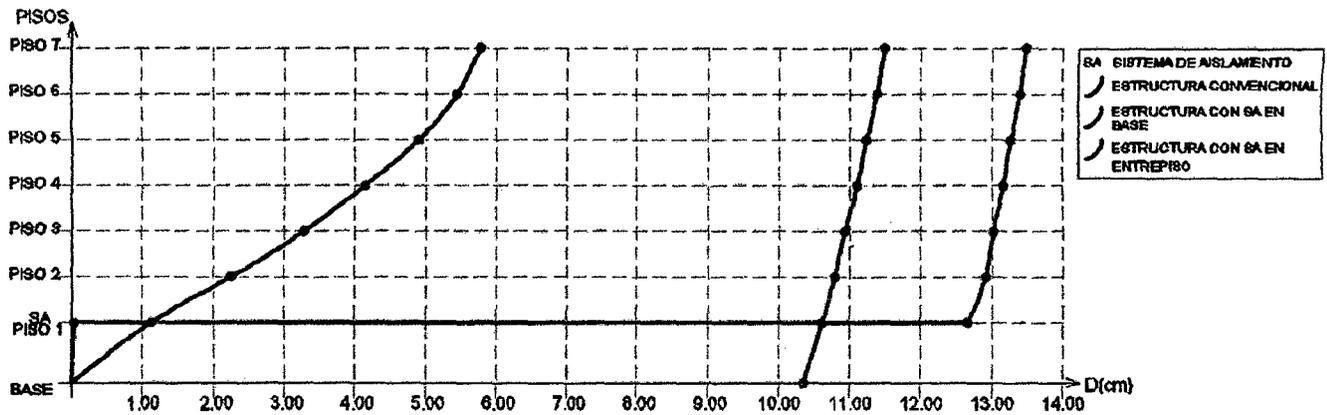


Figura 4. 27: Desplazamientos en la Dirección "Y" debido al Sismo Lima66

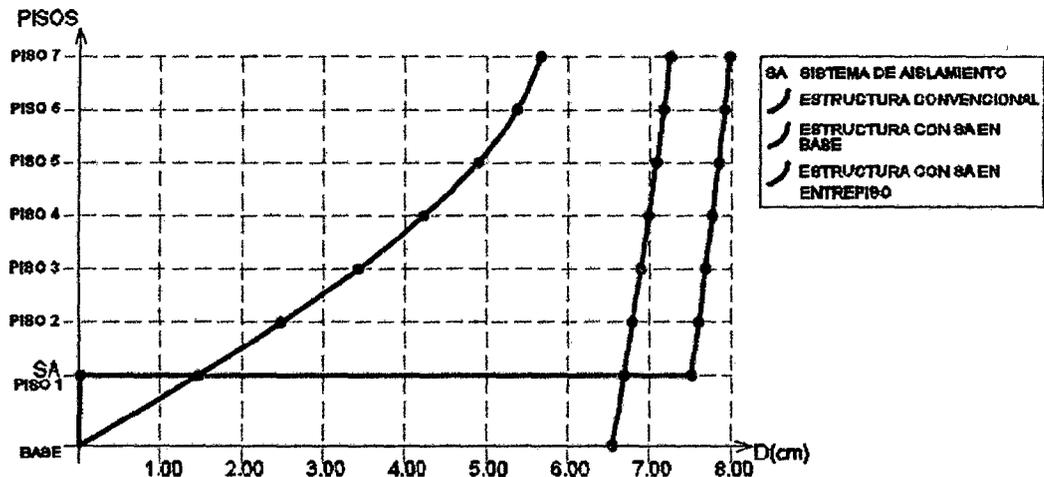


Figura 4. 28: Desplazamientos en la Dirección "X" debido al Sismo Chimbote70

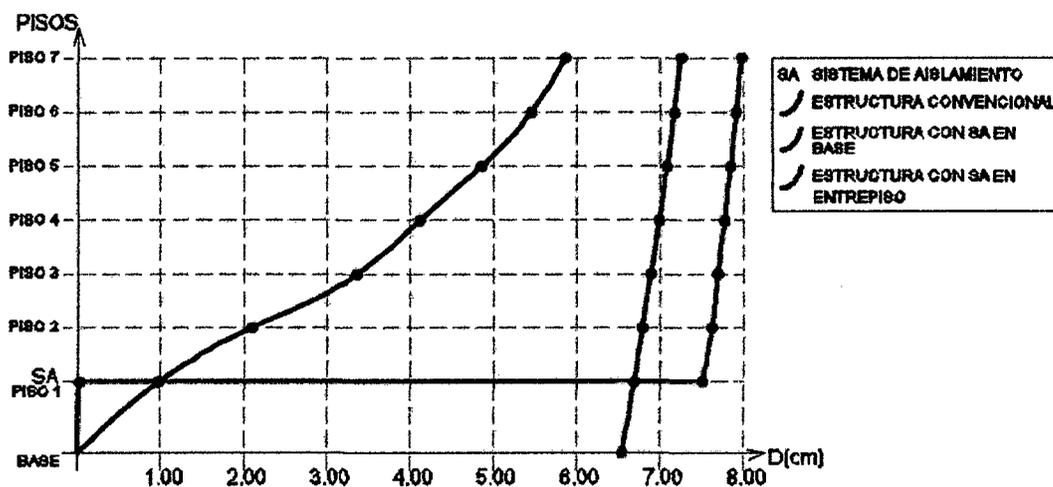


Figura 4. 29: Desplazamientos en la Dirección "Y" debido al Sismo Chimbote70

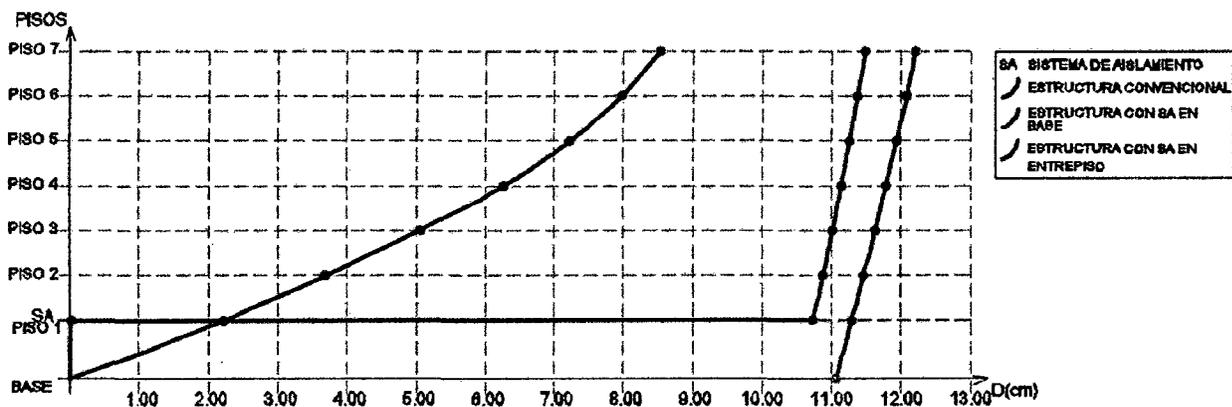


Figura 4. 30: Desplazamientos en la Dirección "X" debido al Sismo Lima74

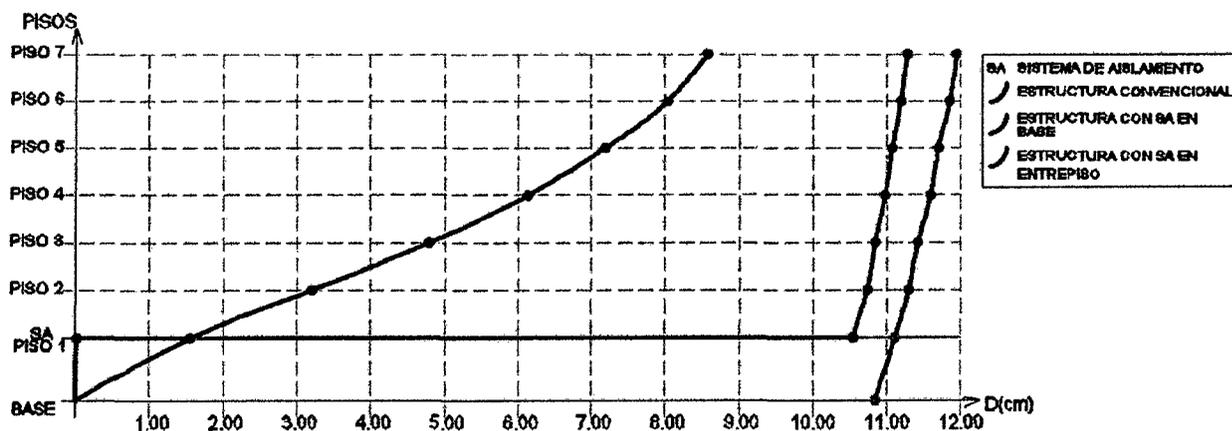


Figura 4. 31: Desplazamientos en la Dirección "Y" debido al Sismo Lima74

La primera observación que podemos realizar en los gráficos anteriores es que los desplazamientos absolutos son mayores en la edificación con aisladores, tanto para los ubicados en la base como los ubicados en entrepiso, que los desplazamientos en la

edificación convencional; pero los desplazamientos relativos, es decir en entrepisos son pequeños, por lo cual se puede garantizar una disminución de derivas. Por ejemplo en la Figura 4.26 podemos ver que el desplazamiento absoluto del edificio convencional es de 6.24 cm en la dirección "X", y el desplazamiento relativo entre los pisos es cerca de 1cm, ahora bien cuando colocamos aisladores en la base del edificio el desplazamiento absoluto es de 11.60 cm, sin embargo su desplazamiento relativo entre los pisos es menos de medio centímetro. De la misma manera sucede cuando los aisladores se ubican en entrepiso, es decir presentan desplazamientos absolutos mayores que el convencional pero desplazamientos relativos menores. Esto es debido a que, el sistema de aislación permite que la edificación se desplace más que lo convencional pero como un solo bloque, es decir tendiendo la gráfica a ser casi una recta paralela al eje "Y", como hemos podido observar en los gráficos anteriores, y no una semiparábola como la del edificio convencional.

La segunda observación que podemos realizar es, cuando los aisladores son ubicados sobre el primer nivel, disminuye el desplazamiento del primero piso, donde se está suscitando la falla por piso blando, por lo que podemos predecir la disminución de dicha falla. En los siguientes cuadros se demuestra de manera porcentual la reducción que generan los aisladores, en cuanto a los desplazamientos, y por ende derivas:

Tabla 4. 27: Comparación porcentual del desplazamiento relativo en la dirección "X" sin considerar el desplazamiento del aislador

SISMO	PISOS	DESPLAZAMIENTO EN X (M)			% REDUCCIÓN	
		CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
LIMA 66	PISO 1	0.0196	0.0023	0.0003	88.27%	98.47%
	PISO7-PISO1	0.0428	0.0094	0.0075	78.04%	82.48%
CHIMBOTE 70	PISO 1	0.0146	0.0014	0.0002	90.41%	98.63%
	PISO7-PISO1	0.0414	0.0057	0.0044	86.23%	89.37%
LIMA 74	PISO 1	0.022	0.0023	0.0002	89.55%	99.09%
	PISO7-PISO1	0.0627	0.0091	0.0073	85.49%	88.36%

Tabla 4. 28: Comparación porcentual del desplazamiento absoluto en la dirección "Y" sin considerar el desplazamiento del aislador

SISMO	PISOS	DESPLAZAMIENTO EN Y (M)			% REDUCCIÓN	
		CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
LIMA 66	PISO 1	0.0112	0.0026	0.0003	76.79%	97.32%
	PISO7-PISO1	0.0465	0.0087	0.0079	81.29%	83.01%
CHIMBOTE 70	PISO 1	0.0096	0.0014	0.0002	85.42%	97.92%
	PISO7-PISO1	0.0502	0.0056	0.0045	88.84%	91.04%
LIMA 74	PISO 1	0.0155	0.0027	0.0002	82.58%	98.71%
	PISO7-PISO1	0.0703	0.0083	0.0072	88.19%	89.76%

En las tabla 4.27 nos muestran la gran reducción en porcentaje de los desplazamientos relativos que se da en el primer piso (donde ocurre la falla por piso blando) en la dirección más crítica, dirección "X", cuando el sistema de aislación se ubica sobre el primer nivel o debajo de éste; pero cabe resaltar que la eficacia de los aisladores es debido a que se tomó en cuenta las recomendaciones para su uso, reforzando el edificio previamente, en conclusión, éstos aisladores están reduciendo los esfuerzos más del 70%, lo cual genera una disminución de las derivas, por ende disminución de la falla.

Así también observamos en la tabla 4.28, en donde la dirección crítica para el resto de niveles es "Y", que la reducción de los desplazamientos relativos, donde no ocurre la falla por piso blando, es de un promedio de 86% cuando los aisladores se ubican en la base y de un 88% cuando se ubican sobre el primer nivel, garantizando así también la reducción de las derivas en los demás niveles.

Una vez obtenidos los desplazamientos, podemos de esta manera calcular nuestras derivas, las cuales se presentan en las siguientes tablas, comparándolas con las de la estructura convencional:

Tabla 4. 29: Derivas en la dirección "X" debido al Sismo Lima 66

PISOS	DERIVAS EN X			% DE REDUCCIÓN	
	E. CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
PISO 1	0.0058	0.000846	0.000134	85.41%	97.69%
PISO 2	0.004904	0.000865	0.000629	82.36%	87.17%
PISO 3	0.004588	0.000864	0.000656	81.17%	86.29%
PISO 4	0.003705	0.000833	0.000651	77.52%	82.29%
PISO 5	0.003232	0.000793	0.000629	75.46%	79.86%
PISO 6	0.00254	0.000745	0.000597	70.67%	75.24%
PISO 7	0.001864	0.000702	0.000567	62.34%	67.97%

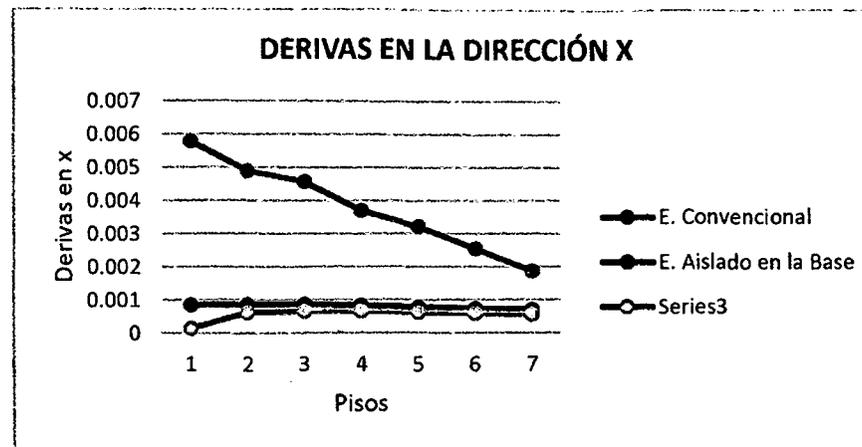


Figura 4. 32: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "X" debido al Sismo Lima 66

Tabla 4. 30: Derivas en la dirección "Y" debido al Sismo Lima 66

PISOS	DERIVAS EN Y			% DE REDUCCIÓN	
	E. CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
PISO 1	0.003615	0.00079	0.00013	78.15%	96.40%
PISO 2	0.004969	0.000797	0.000597	83.96%	87.99%
PISO 3	0.004677	0.00079	0.000616	83.11%	86.83%
PISO 4	0.004165	0.000753	0.000604	81.92%	85.50%
PISO 5	0.003354	0.000708	0.000578	78.89%	82.77%
PISO 6	0.002596	0.000658	0.000543	74.65%	79.08%
PISO 7	0.002027	0.000614	0.000511	69.71%	74.79%

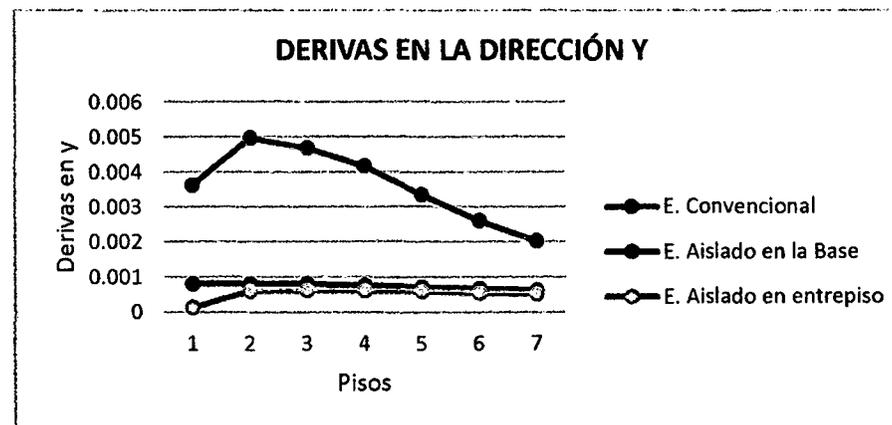


Figura 4. 33: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "Y" debido al Sismo Lima 66

Tabla 4. 31: Derivas en la dirección "X" debido al Sismo Chimbote 70

PISOS	DERIVAS EN X			% DE REDUCCIÓN	
	E. CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
PISO 1	0.004321	0.000541	0.00007	87.48%	98.38%
PISO 2	0.003924	0.000554	0.000326	85.88%	91.69%
PISO 3	0.003844	0.000552	0.000345	85.64%	91.52%
PISO 4	0.003593	0.000533	0.000342	85.17%	90.40%
PISO 5	0.00336	0.000508	0.000333	84.88%	89.82%
PISO 6	0.002972	0.000477	0.000317	83.95%	88.80%
PISO 7	0.002106	0.00045	0.000301	78.63%	84.95%

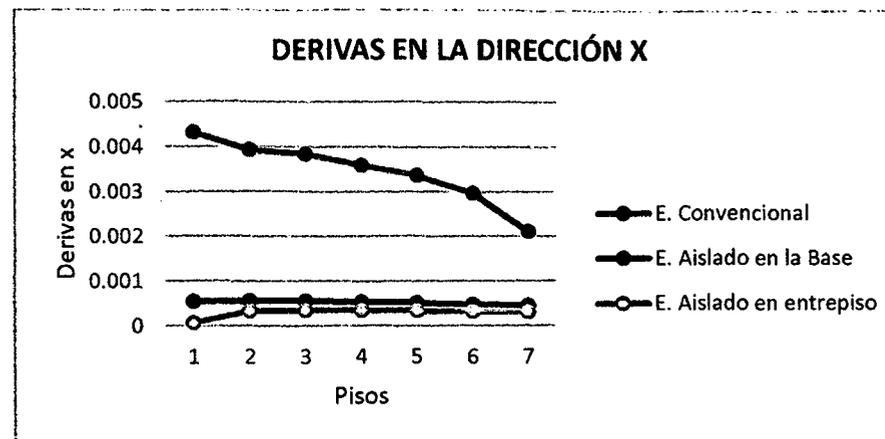


Figura 4. 34: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "X" debido al Sismo Chimbote 70

Tabla 4. 32: Derivas en la dirección "Y" debido al Sismo Chimbote 70

PISOS	DERIVAS EN Y			% DE REDUCCIÓN	
	E. CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
PISO 1	0.003139	0.000512	0.000068	83.69%	97.83%
PISO 2	0.004397	0.000518	0.000311	88.22%	92.93%
PISO 3	0.004581	0.000517	0.000331	88.71%	92.77%
PISO 4	0.004255	0.000496	0.000324	88.34%	92.39%
PISO 5	0.003741	0.000469	0.000313	87.46%	91.63%
PISO 6	0.003018	0.000437	0.000296	85.52%	90.19%
PISO 7	0.00238	0.000408	0.000278	82.86%	88.32%

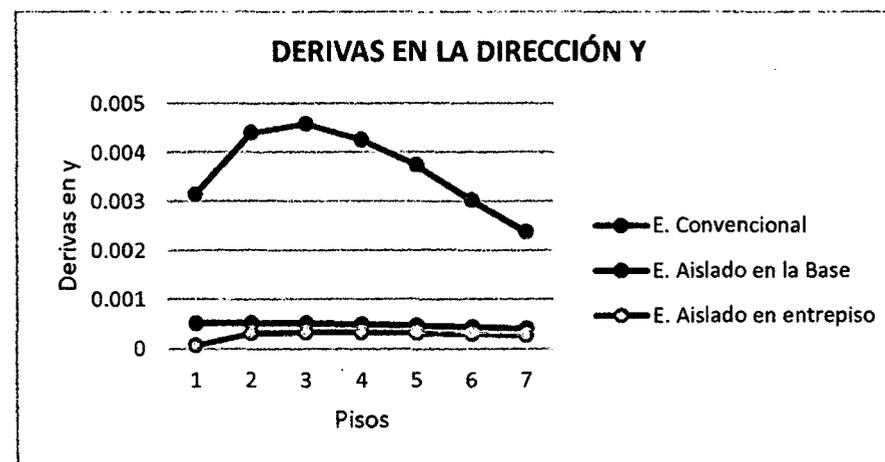


Figura 4. 35: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "Y" debido al Sismo Chimbote 70

Tabla 4. 33: Derivas en la dirección "X" debido al Sismo Lima 74

PISOS	DERIVAS EN X			% DE REDUCCIÓN	
	E. CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
PISO 1	0.007059	0.000771	0.000104	89.08%	98.53%
PISO 2	0.005897	0.00079	0.000541	86.60%	90.83%
PISO 3	0.005773	0.000795	0.000571	86.23%	90.63%
PISO 4	0.005446	0.000768	0.000572	85.90%	89.52%
PISO 5	0.005037	0.00073	0.000558	85.51%	88.64%
PISO 6	0.004654	0.000683	0.000532	85.32%	88.01%
PISO 7	0.003434	0.000638	0.000506	81.42%	84.51%

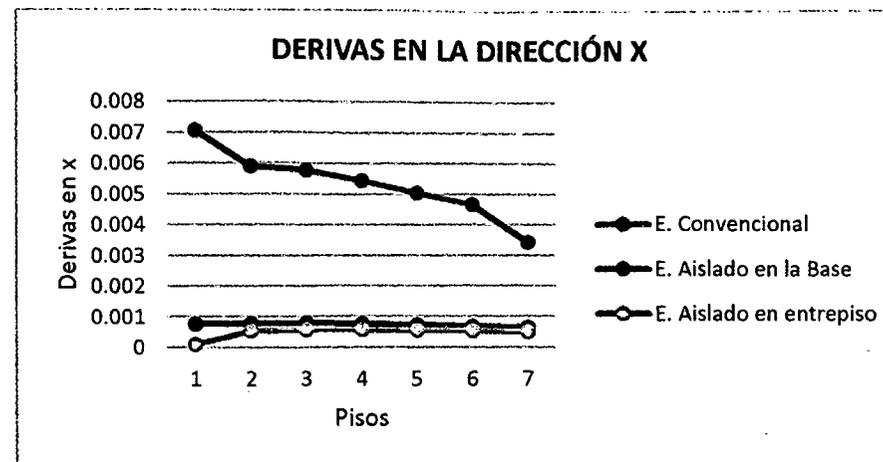


Figura 4. 36: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección "X" debido al Sismo Lima 74

Tabla 4. 34: Derivas en la dirección "Y" debido al Sismo Lima 74

PISOS	DERIVAS EN Y			% DE REDUCCIÓN	
	E. CONVENCIONAL	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO	SA EN BASE	SA EN ENTREPISO
PISO 1	0.00492	0.001232	0.000099	74.96%	97.99%
PISO 2	0.006598	0.001111	0.000499	83.16%	92.44%
PISO 3	0.006666	0.001018	0.00052	84.73%	92.20%
PISO 4	0.006094	0.000952	0.000516	84.38%	91.53%
PISO 5	0.00545	0.000882	0.000499	83.82%	90.84%
PISO 6	0.004549	0.000786	0.000471	82.72%	89.65%
PISO 7	0.003468	0.000718	0.000444	79.30%	87.20%

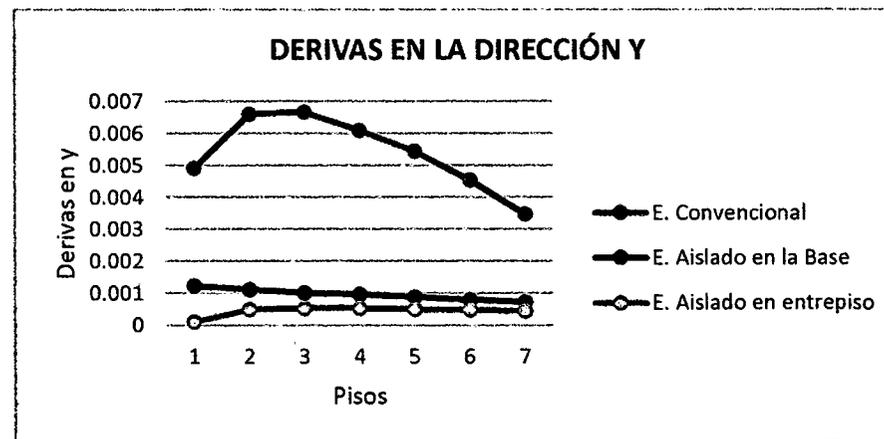


Figura 4. 37: Gráfica representativa de las Derivas en la Dirección en "Y" debido al Sismo Lima 74

En las tablas y gráficos anteriores se ha analizado porcentualmente la reducción que se da, de uno de los parámetros principales en la presente investigación, las derivas, debido a la utilización de aisladores ubicados en la base del edificio convencional en un primer modelo, y ubicados encima de las columnas del primer nivel de dicha edificación en un segundo modelo.

En las tablas 4.29, 4.31 y 4.33 se analizan la reducción de las derivas en la dirección "X", dirección crítica para el primer piso. Observándose que cuando los aisladores se colocan encima del primer nivel de la edificación, obtenemos mayor reducción de las derivas en dicho nivel (nivel que fallaría por piso blando) en un promedio de 98%, mientras que los aisladores ubicados en base de la edificación, reducen las derivas en un promedio de 87%. Por lo que podríamos decir que, los aisladores elastoméricos, indistinto a la ubicación que tengan, reducen el efecto de piso blando, en consecuencia ya no fallaría por esta irregularidad el edificio.

En las tablas 4.30, 4.32 y 4.34 se analizan la reducción de las derivas en la dirección "Y", dirección crítica para los demás niveles, que según lo esperado reducen este parámetro en un promedio del 70%, o incluso más, demostrando así la eficacia de los aisladores.

4.4.1.2. Disipación de Energía

Sabemos que por teoría el sistema de aislación disminuye la energía de entrada de los sismos, debido a que desacopla la superestructura de la subestructura. A continuación se presentan los resultados obtenidos en el programa ETABS v.9.7.0. con el cual se comprueba la reducción de energía.

A. Balance de Energía

En las siguientes gráficas se presentarán las curvas de la energía de entrada (input energy) tanto en la dirección "X" como "Y" para cada sismo tratado en la presente investigación, con la finalidad de evaluar el porcentaje de reducción de energía que genera el uso de los aisladores ubicados en la base o en entrepiso, frente a un edificio convencional; ya que sabemos que en un evento sísmico una parte de la energía que recibe la estructura se transforma en movimiento (energía cinética), otra parte se almacena como energía de deformación recuperable

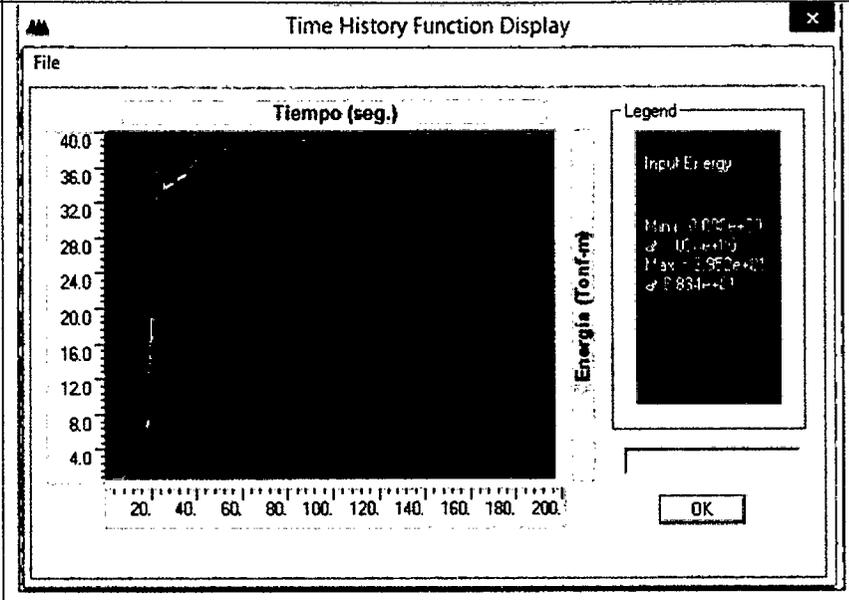
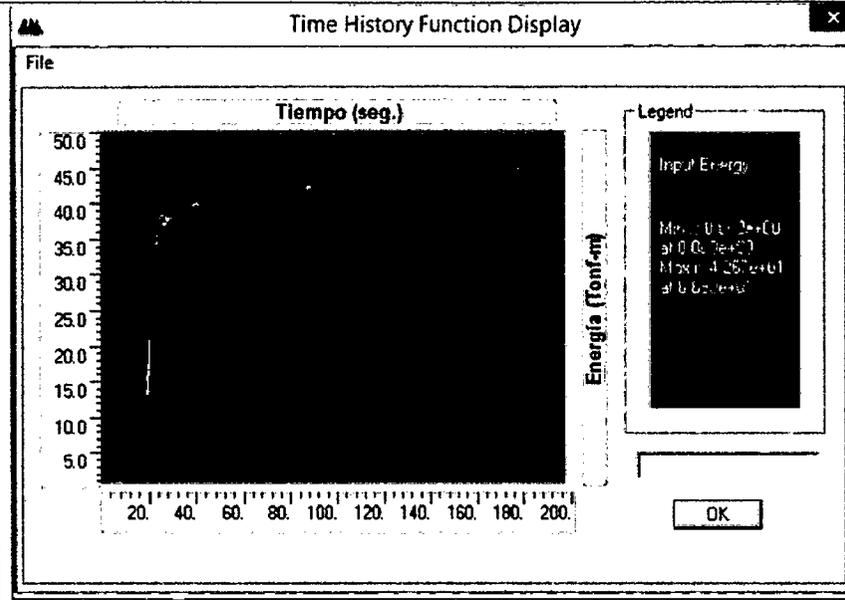
(energía elástica no disipada) y el resto de energía se disipa por medio del amortiguamiento en la estructura (energía de amortiguamiento) o se disipa a través de procesos de deterioro progresivo (energía de deformación plástica o histerética). El aislamiento sísmico ayuda a reducir el deterioro estructural debido a que se reduce la energía total de entrada al edificio (24).

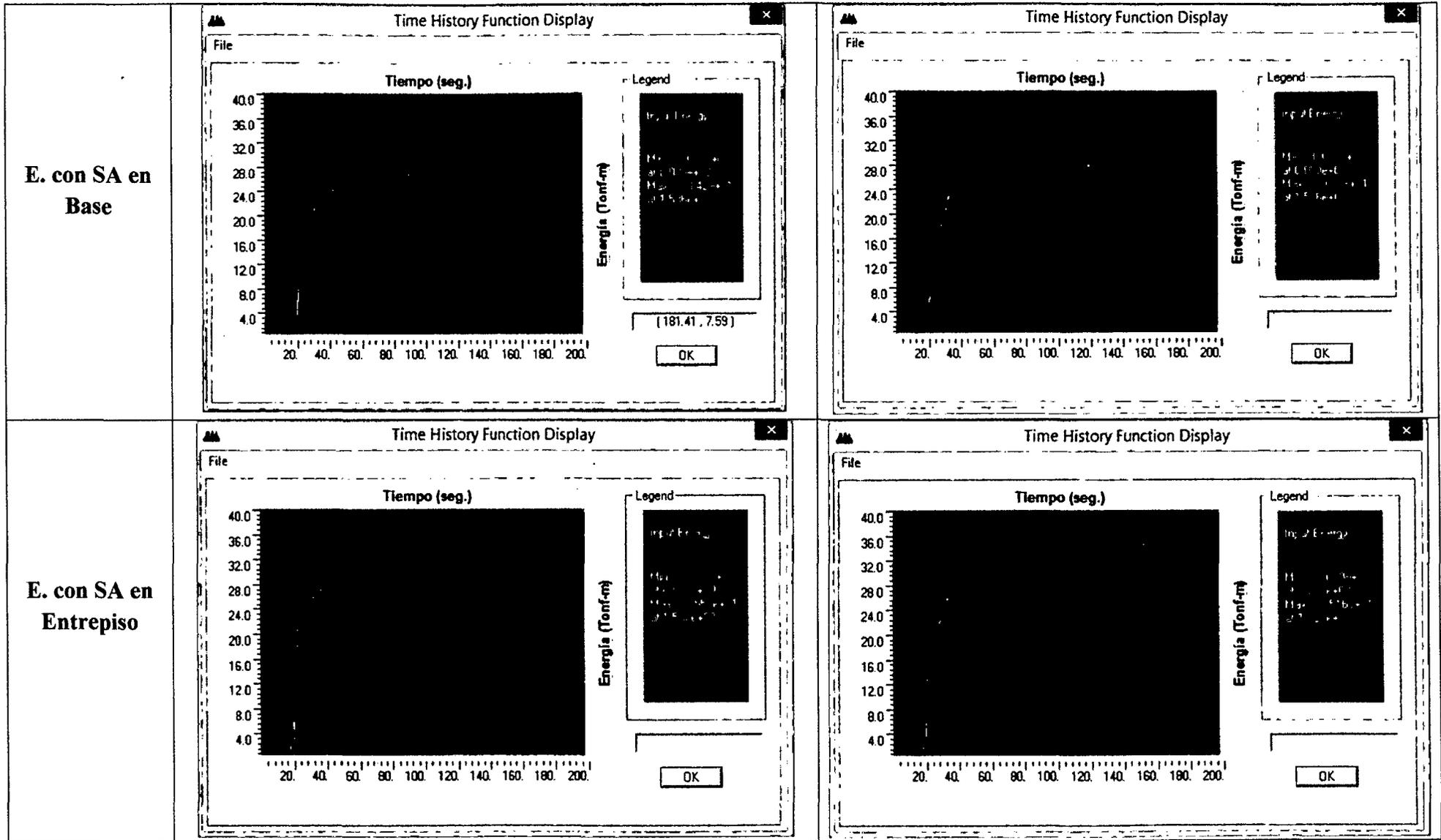
A.1. Curvas de Energía para el Sismo Lima 66

En la Dirección "X"

En la Dirección "Y"

E.
Convencional



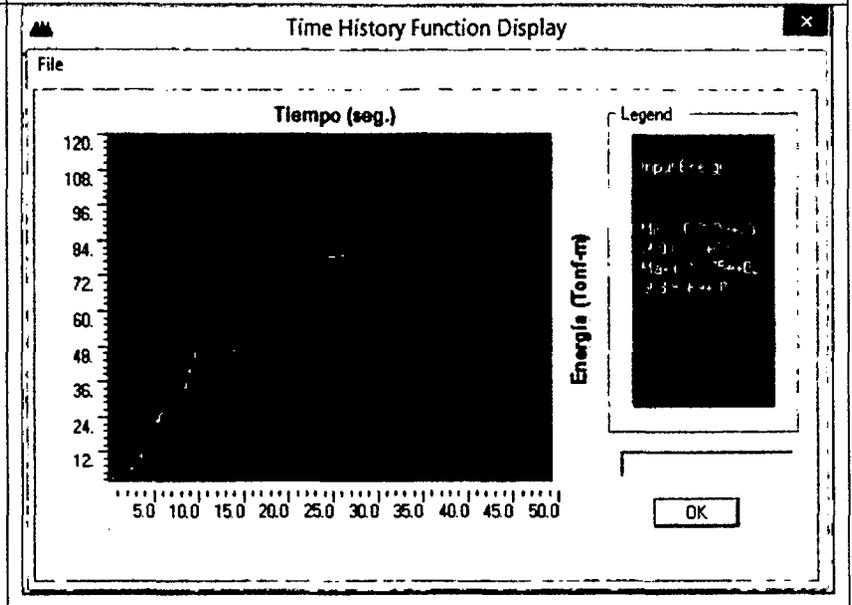
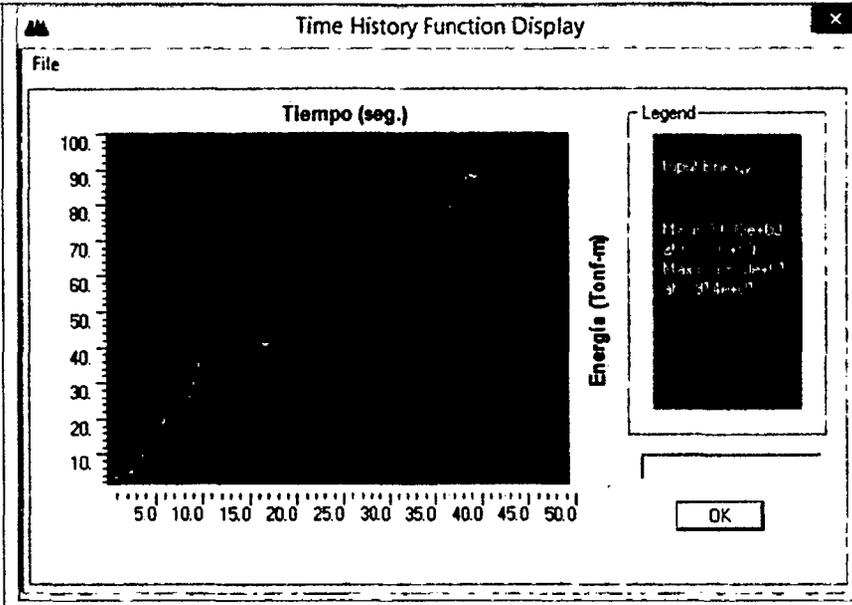


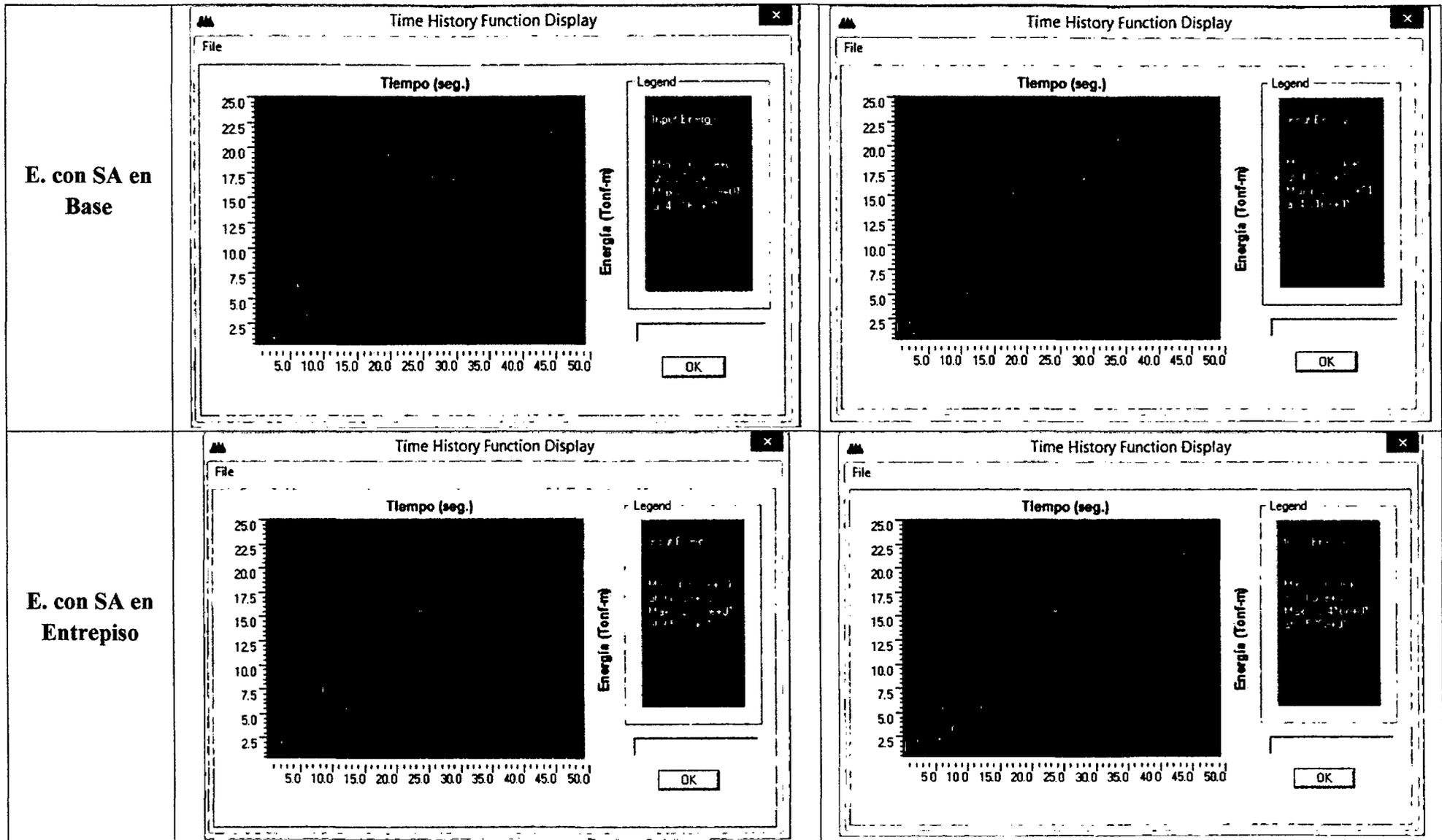
A.2. Curvas de Energía para el Sismo Chimbote 70

En la Dirección "X"

En la Dirección "Y"

E.
Convencional



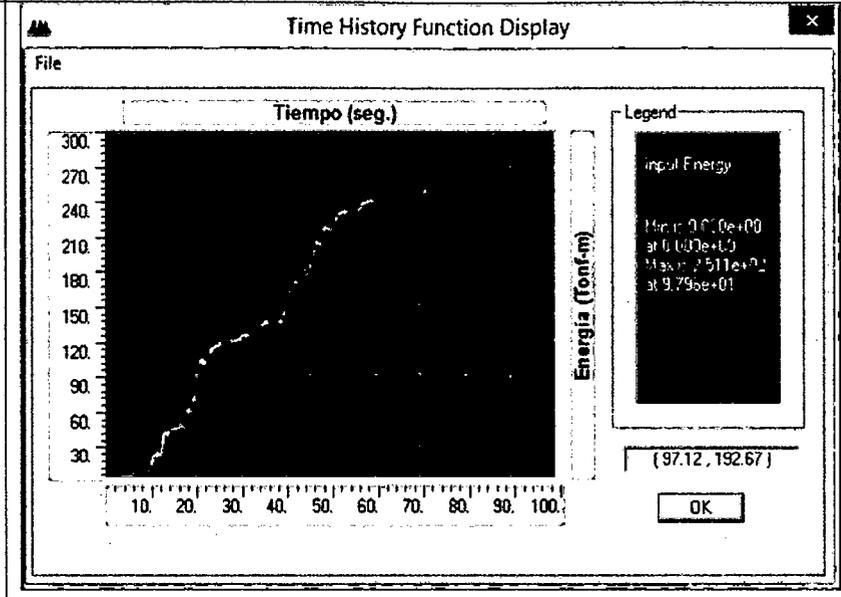
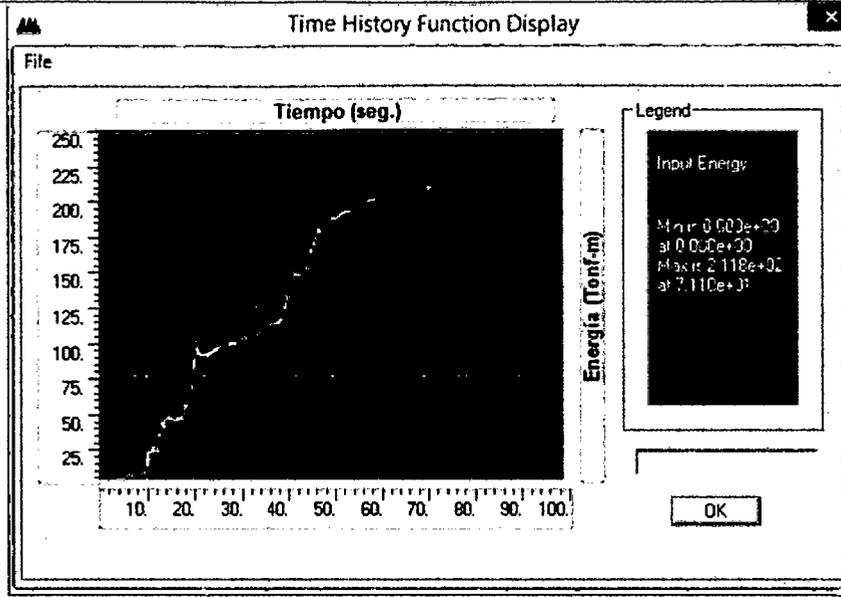


A.3. Curvas de Energía para el Sismo Lima 74

En la Dirección "X"

En la Dirección "Y"

E.
Convencional



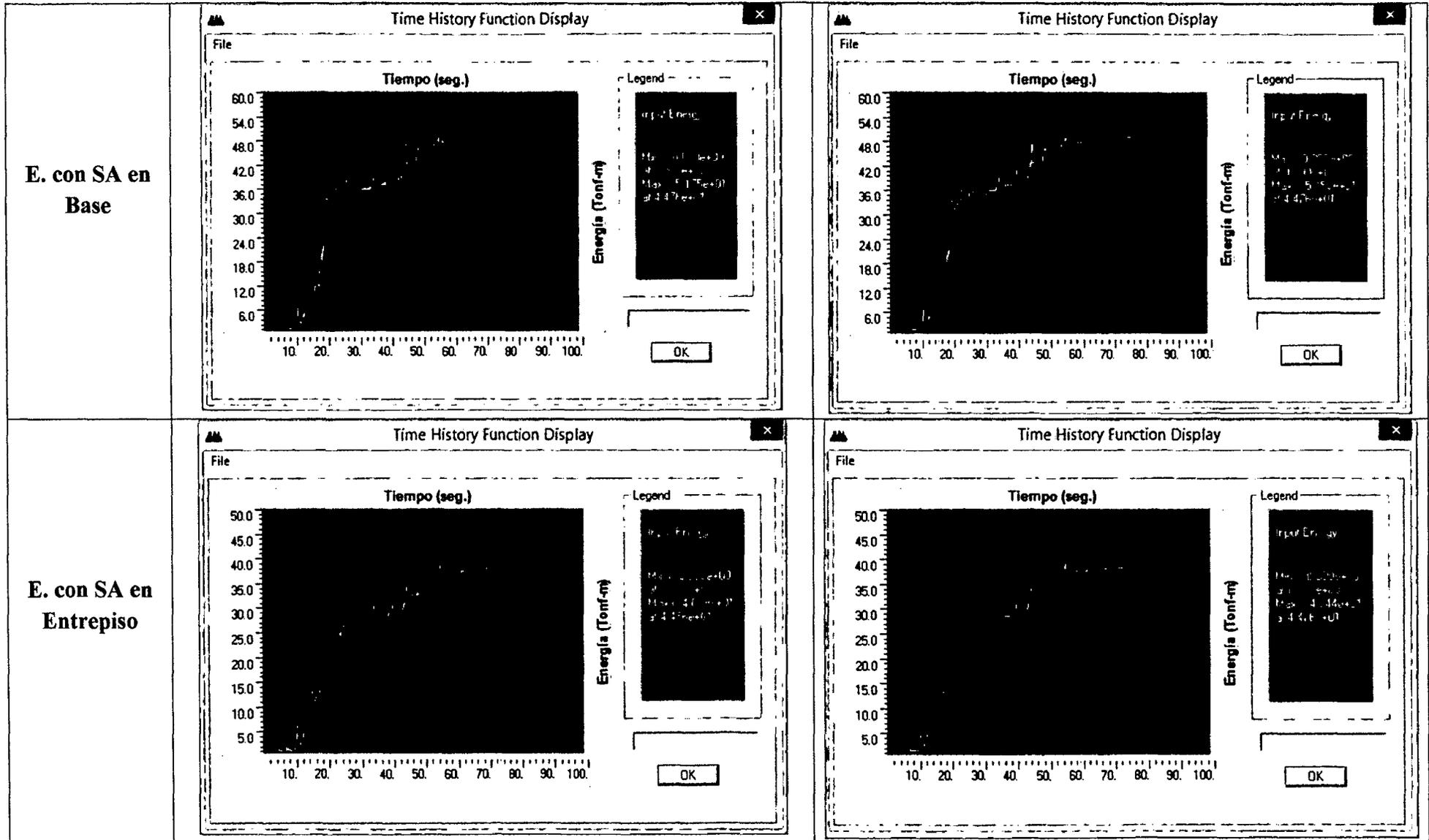


Tabla 4. 35: Porcentajes de reducción de la Energía de Entrada debido a los Aisladores

SISMO	DIRECCIÓN	ENERGÍA DE ENTRADA DE LA EDIFICACIÓN			% REDUCCIÓN	
		Convencional	Aislado Base	Aislado Entrepiso	Aislado Base	Aislado Entrepiso
LIMA 66	Dirección "X"	42.67	30.42	35.57	29%	17%
	Dirección "Y"	39.52	30.35	35.16	23%	11%
CHIMBOTE 70	Dirección "X"	89.9	22.83	23.9	75%	73%
	Dirección "Y"	107.5	23.08	24.16	79%	78%
LIMA 74	Dirección "X"	211.8	51.75	40.29	76%	81%
	Dirección "Y"	251.1	51.9	40.44	79%	84%

Las figuras anteriores obtenidas del programa ETABS v.9.7.0, se han simplificado en la tabla 4.35, en donde podemos observar que la colocación de los aisladores en base o en entrepiso produce una gran reducción de la energía de entrada, debido a la los sismos descritos, tanto en la dirección "X" como en "Y". Así mismo observamos que se reduce en menor porcentaje la energía de entrada debido al sismo de Lima 66, en comparación con los porcentajes de energía que se reduce con los sismos de Chimbote 70 y Lima 74.

Sin embargo como hemos podido verificar en el acápite anterior los aisladores actúan de manera similar en cuanto a reducción de desplazamientos y derivas (parámetros importantes para evaluar la falla por piso blando) en los tres casos de sismo presentados.

B. Curva de Histéresis

A partir de estos gráficos (Fuerza de corte vs. Desplazamiento lateral) podemos identificar el comportamiento de los aisladores elastoméricos, comprobando su forma bilineal. Concentrándose en el centro de éstos la energía que se va a disipar.

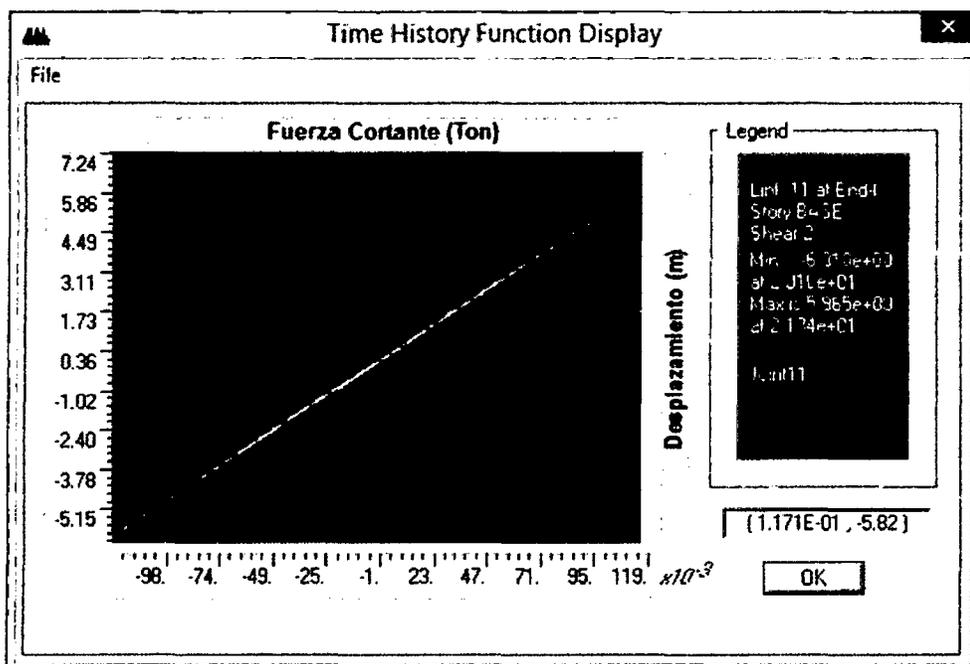


Figura 4. 38: Curva de Histéresis del Aislador en Base debido al Sismo de Lima 74

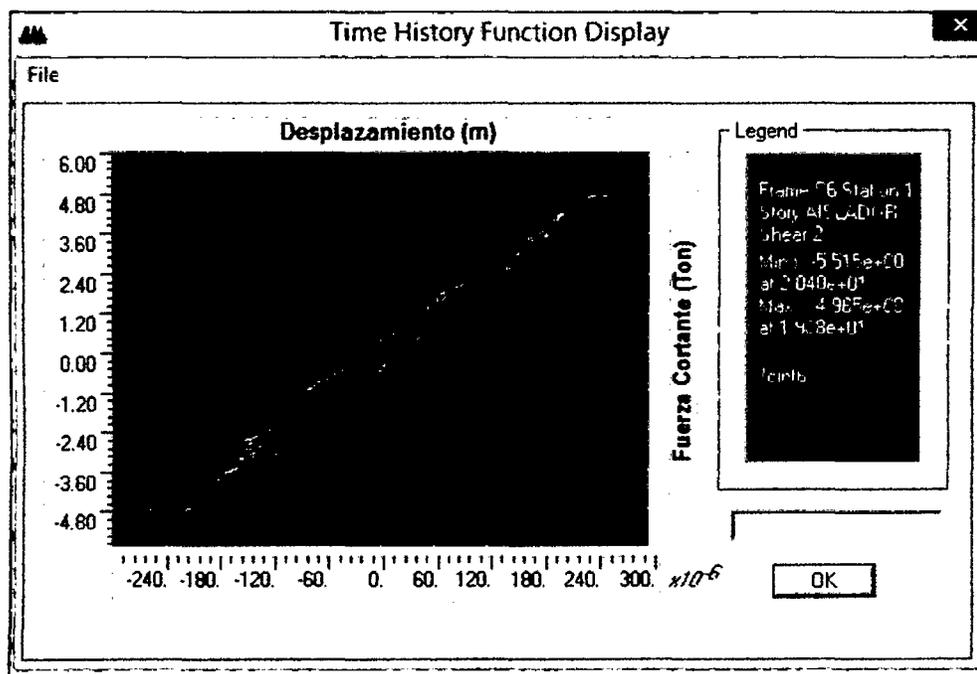


Figura 4. 39: Curva de Histéresis del Aislador en Entrepiso debido al Sismo de Lima 74

4.4.1.3. Otras Variables

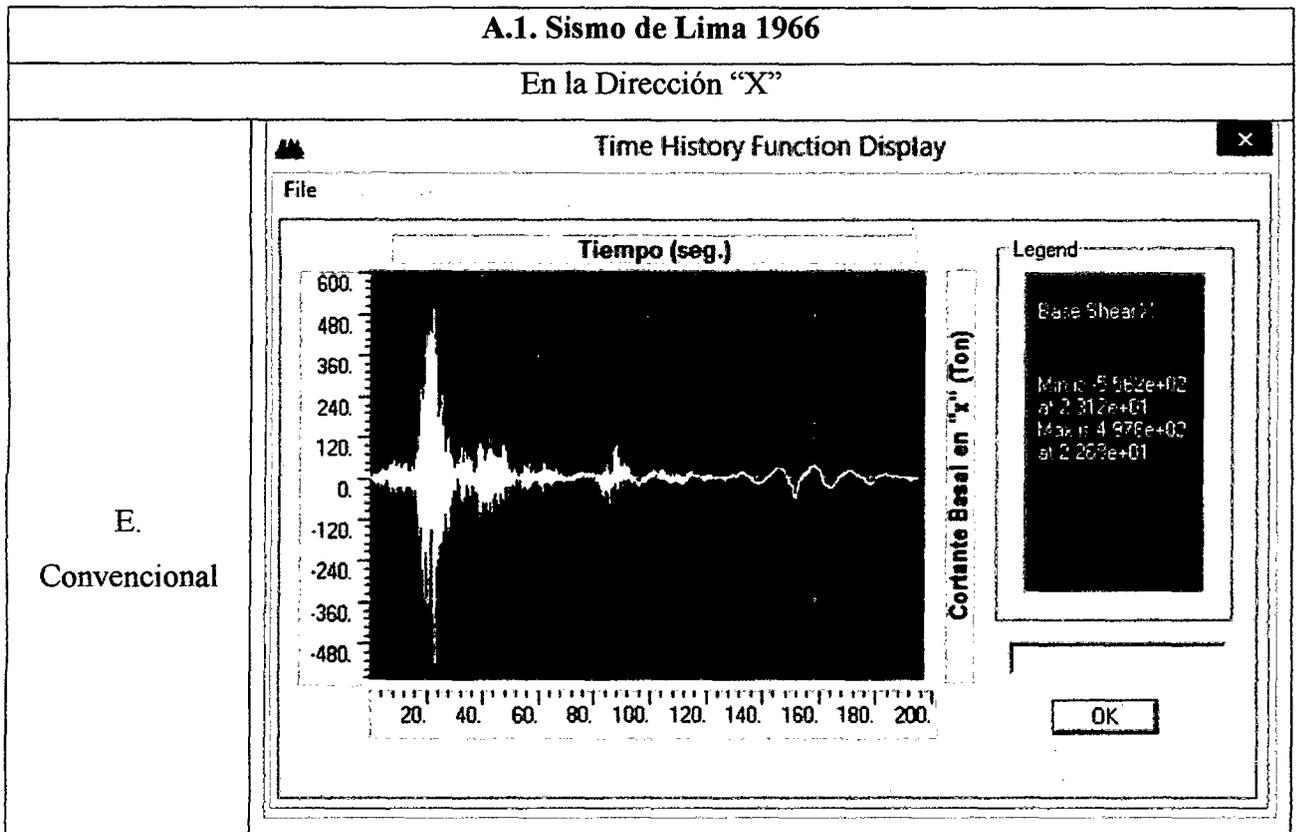
A. Cortante Basal en el Tiempo y en Entrepisos

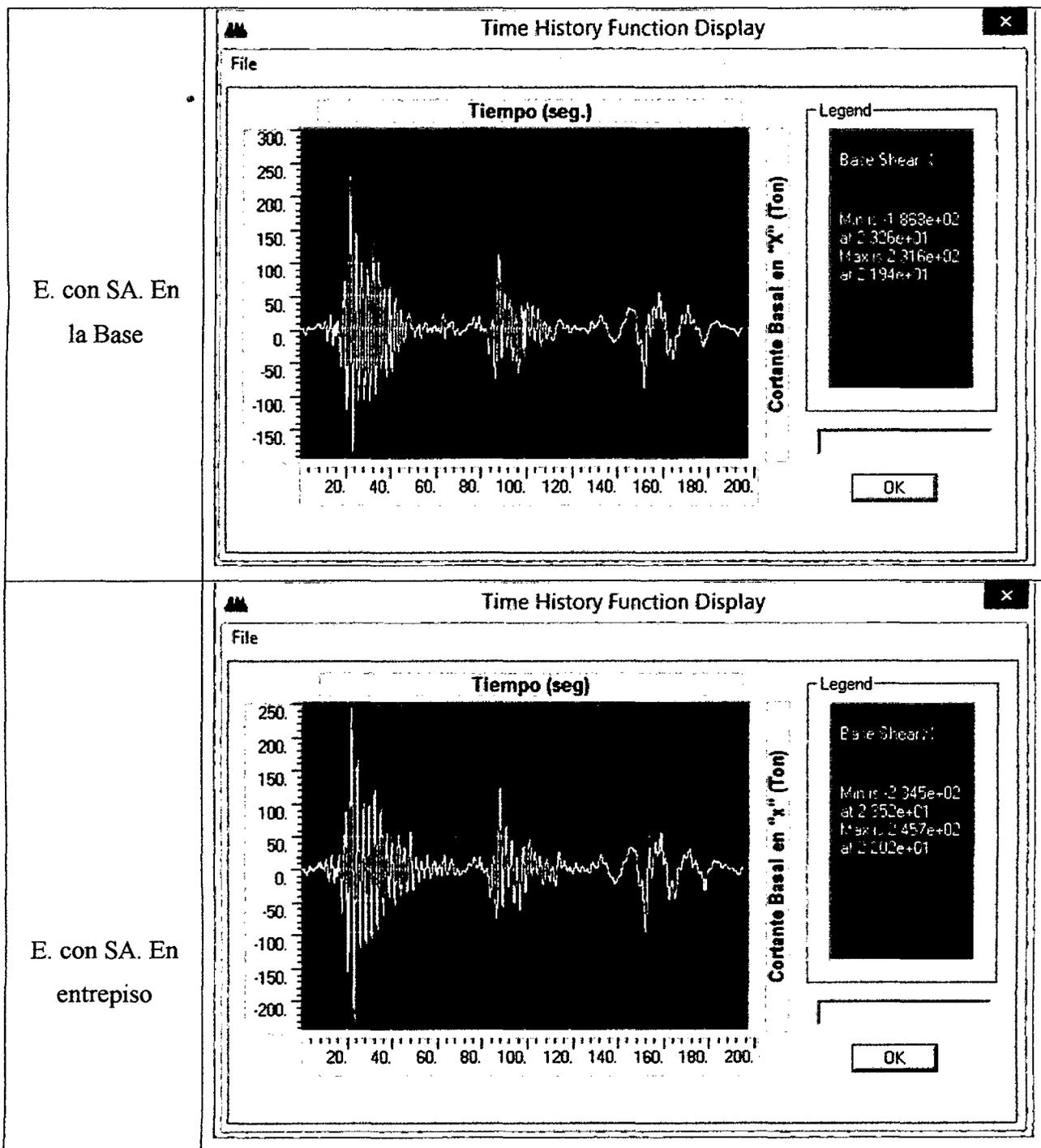
La forma como el edificio responde a la aceleración inducida por el sismo, determina la repartición de las fuerzas sísmicas tanto en altura como en cada uno de los elementos estructurales que la conforman.

Es decir la cortante basal en entrepisos, nos servirá para entender el nivel de esfuerzos de los elementos estructurales; así también el grado de daño en cada elemento.

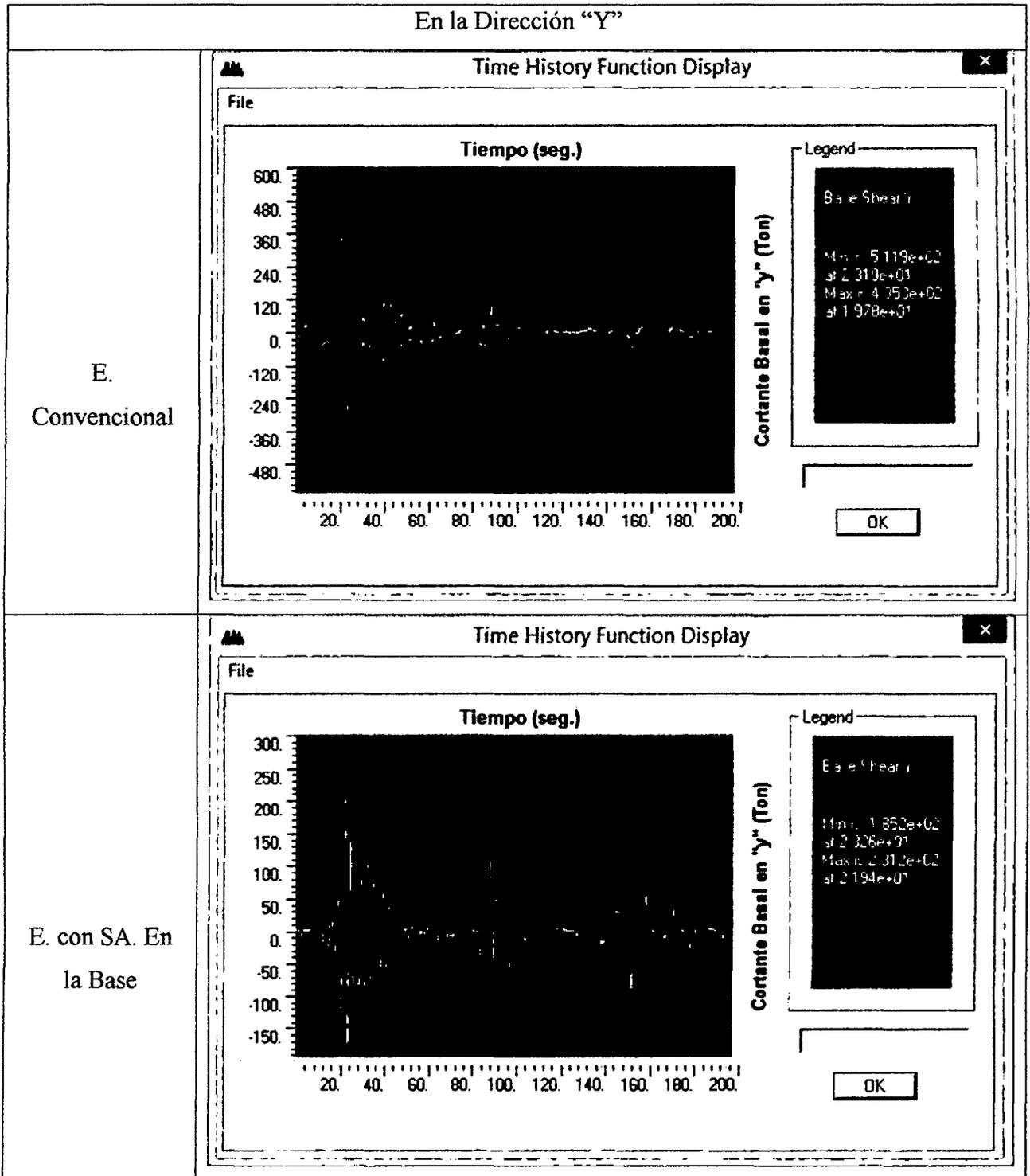
Los resultados presentados a continuación nos servirán para saber, en qué porcentaje se disminuye este parámetro, por ende el daño en los elementos, al colocar los aisladores.

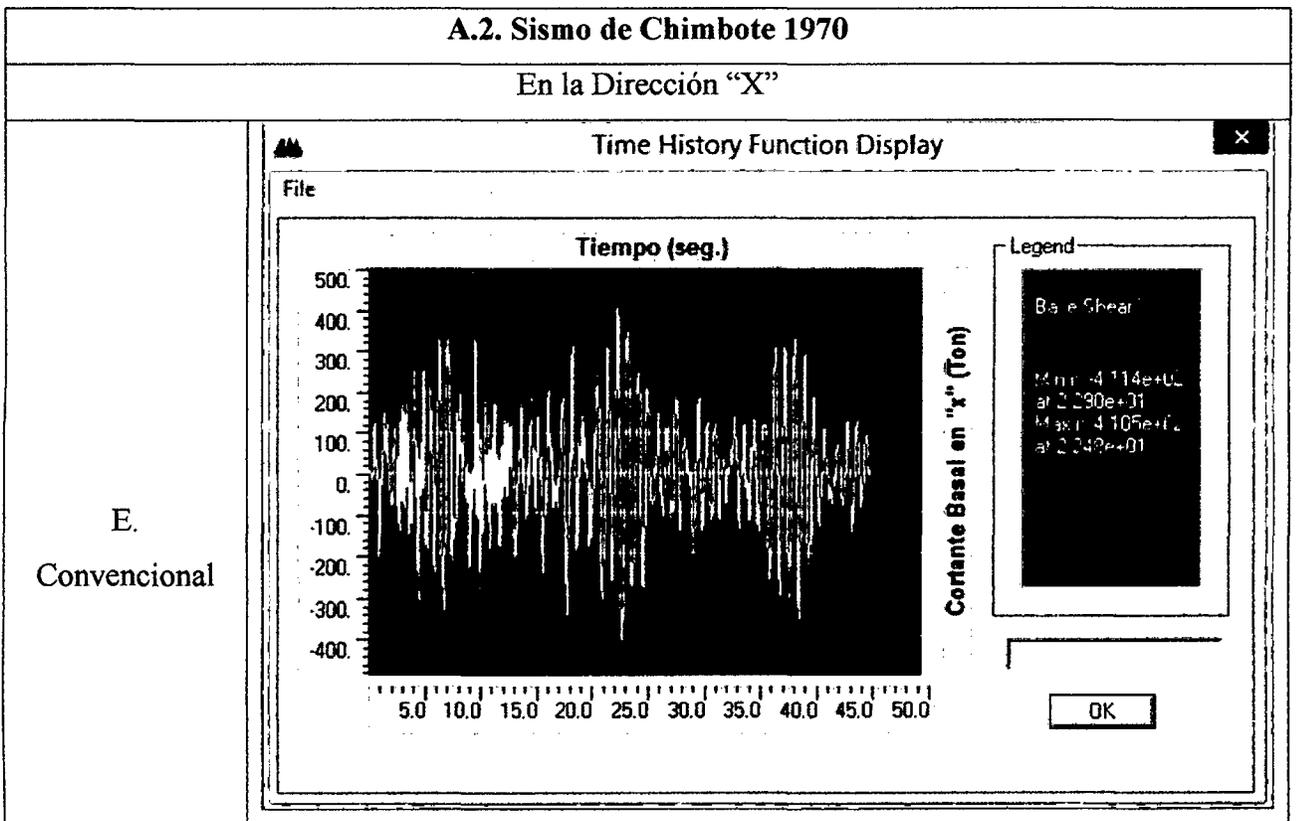
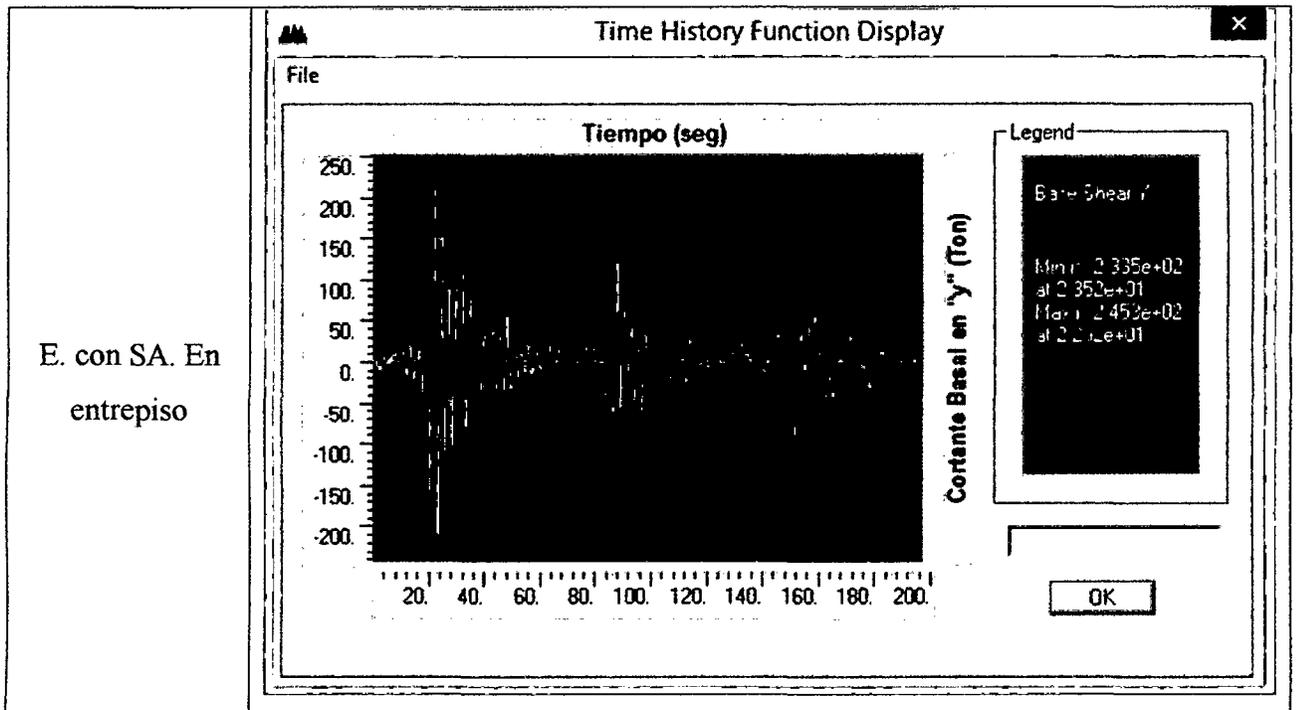
Primero presentaremos la cortante basal en el tiempo, debido a los tres sismos analizados en la presente investigación, después los resultados de la cortante basal en entrepisos debido al sismo Lima1966.

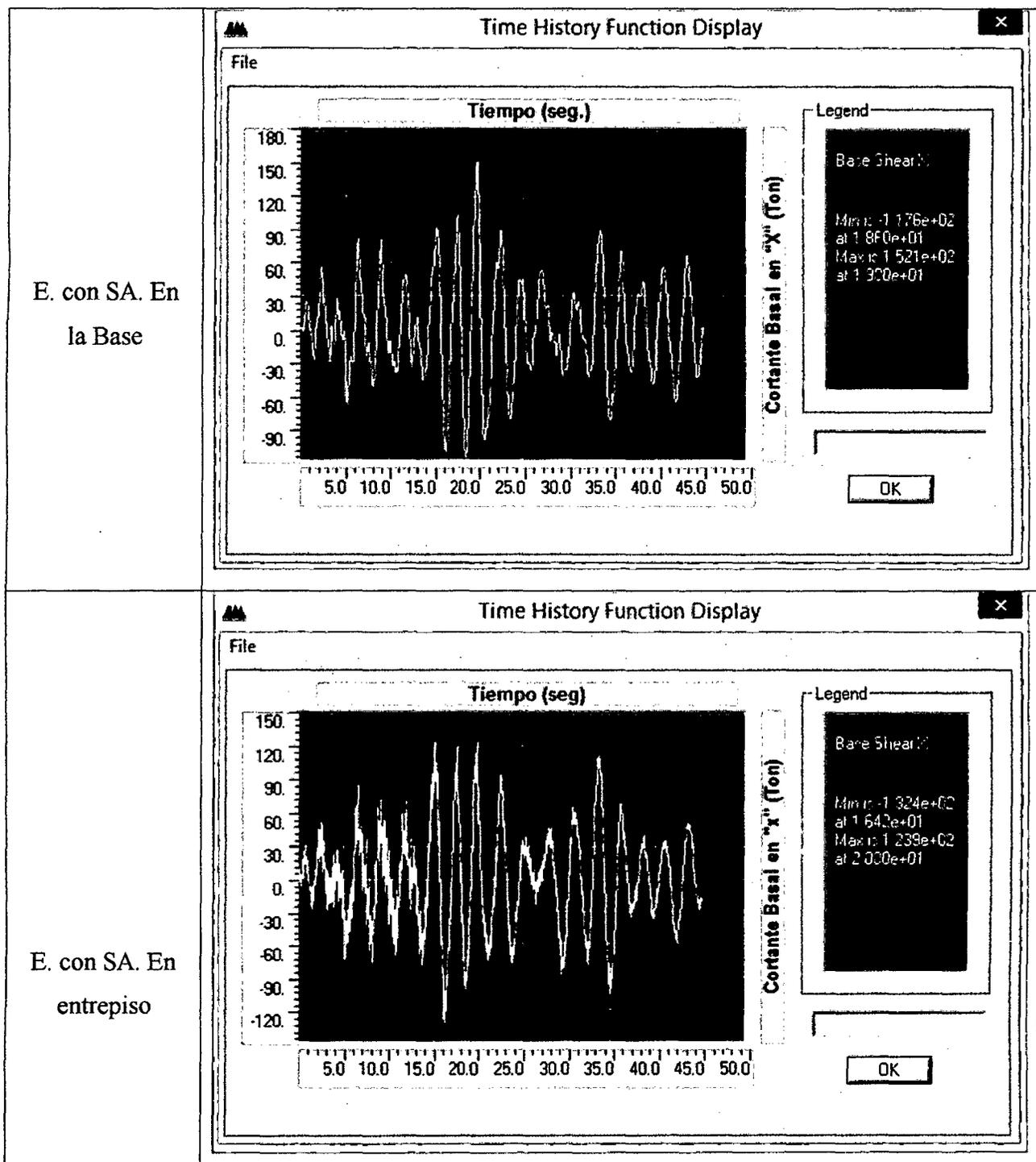


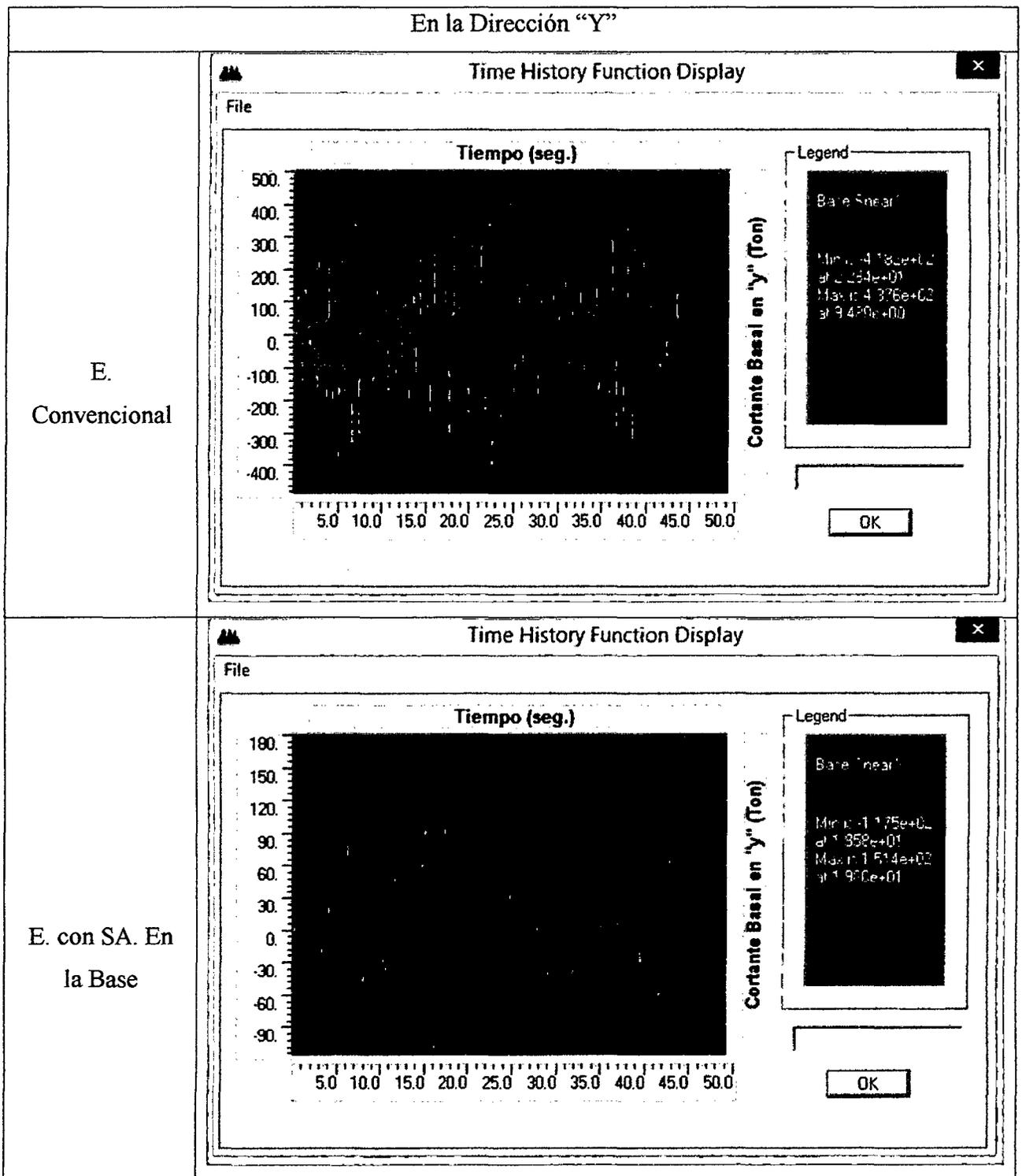


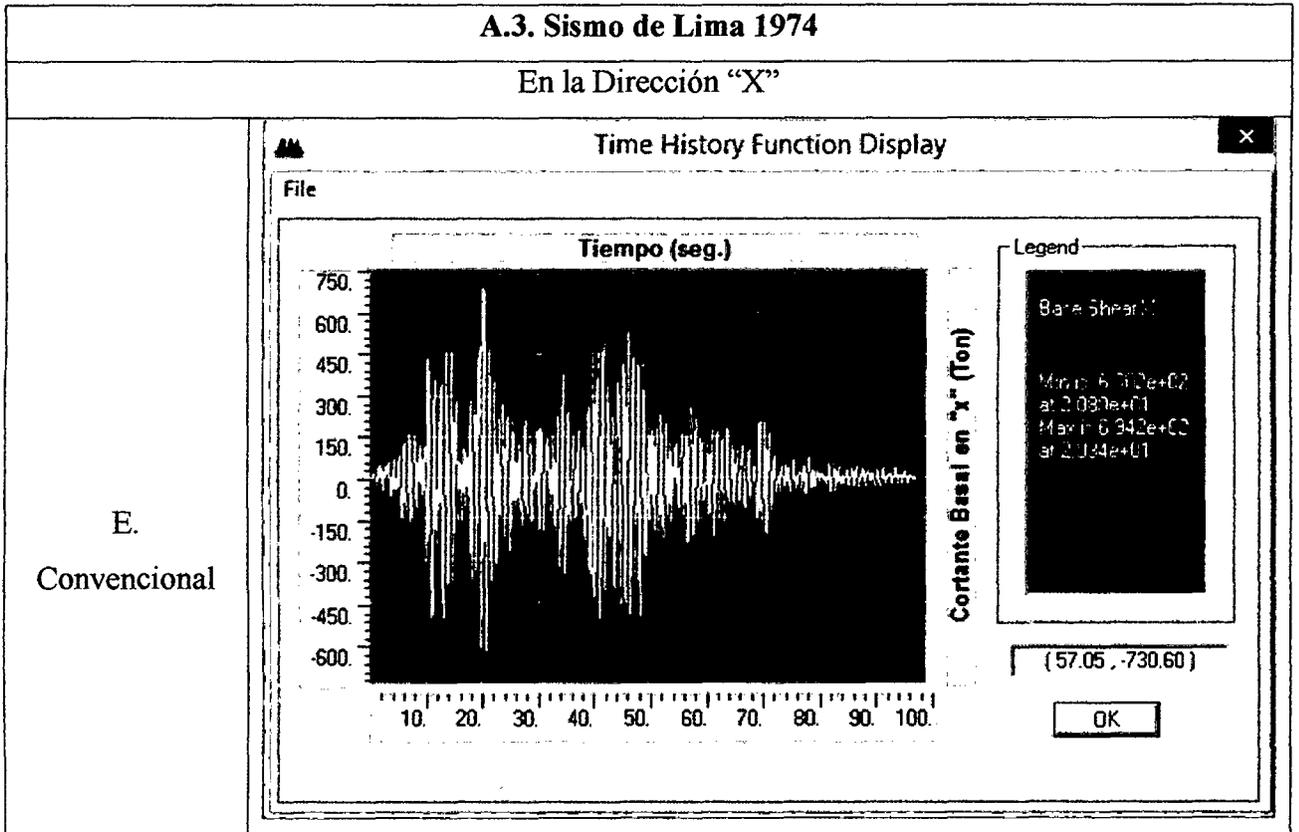
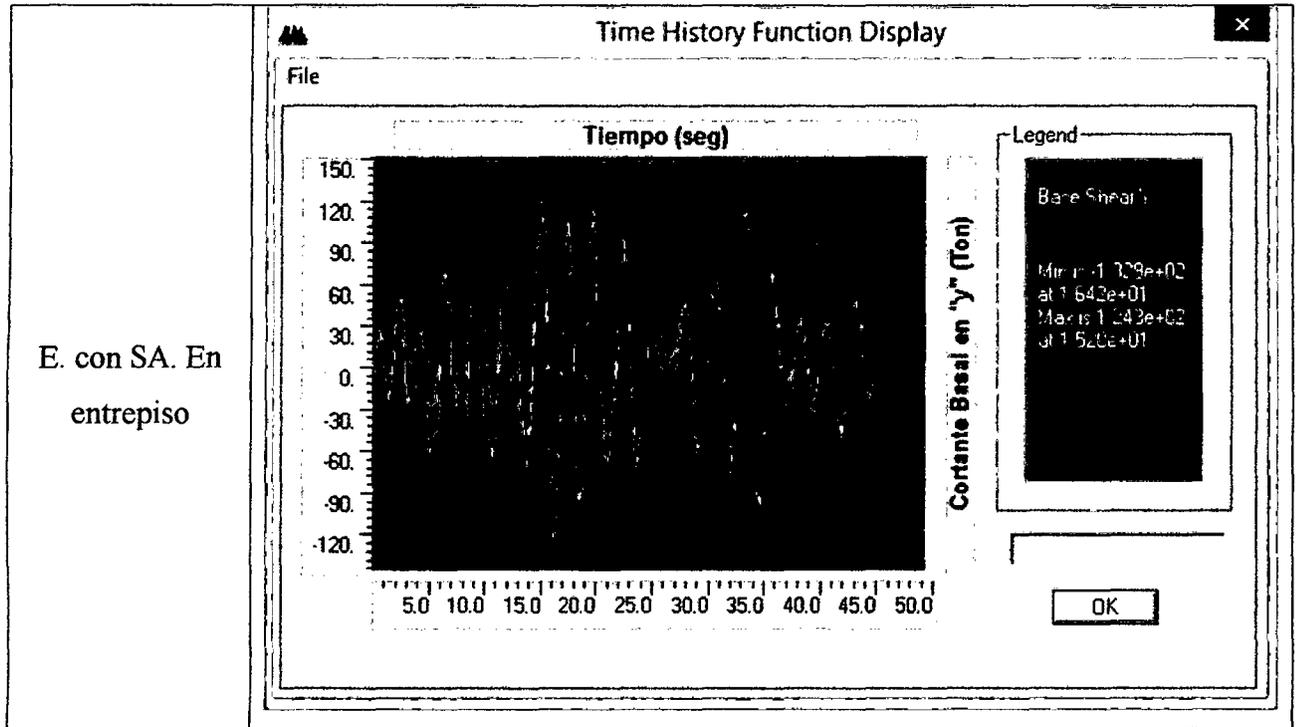
En la Dirección "Y"

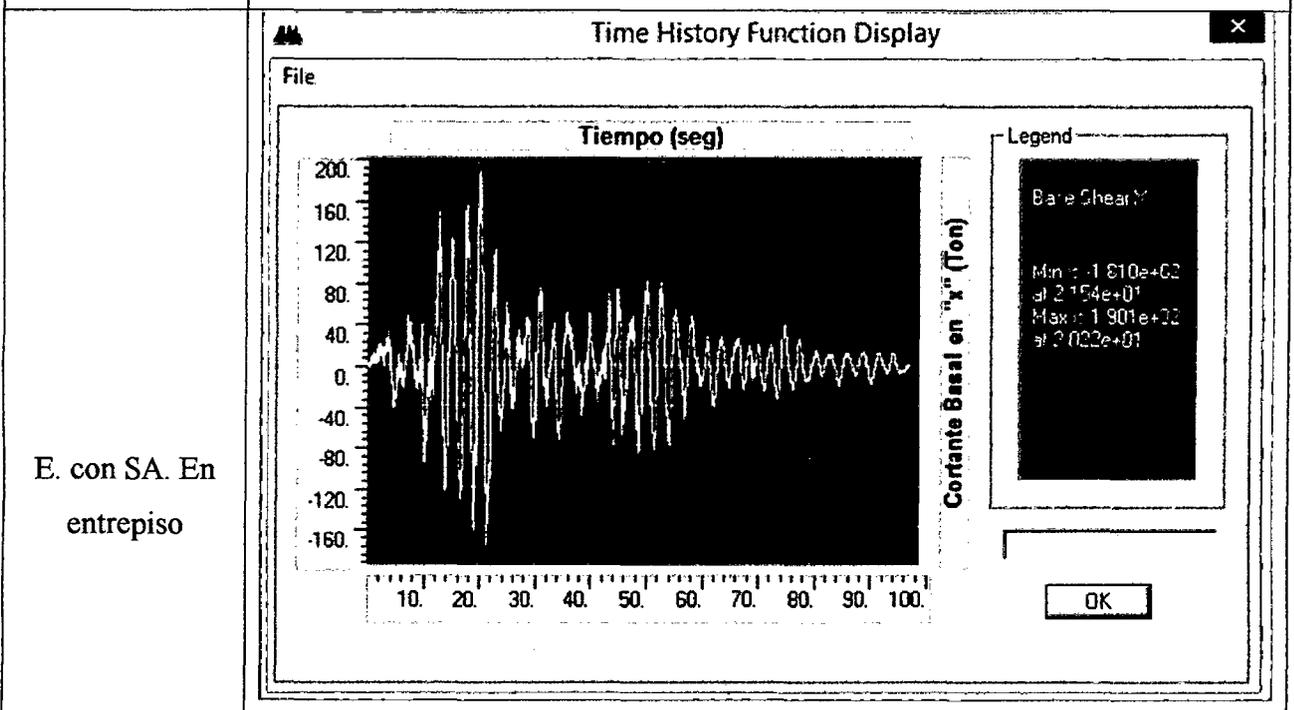
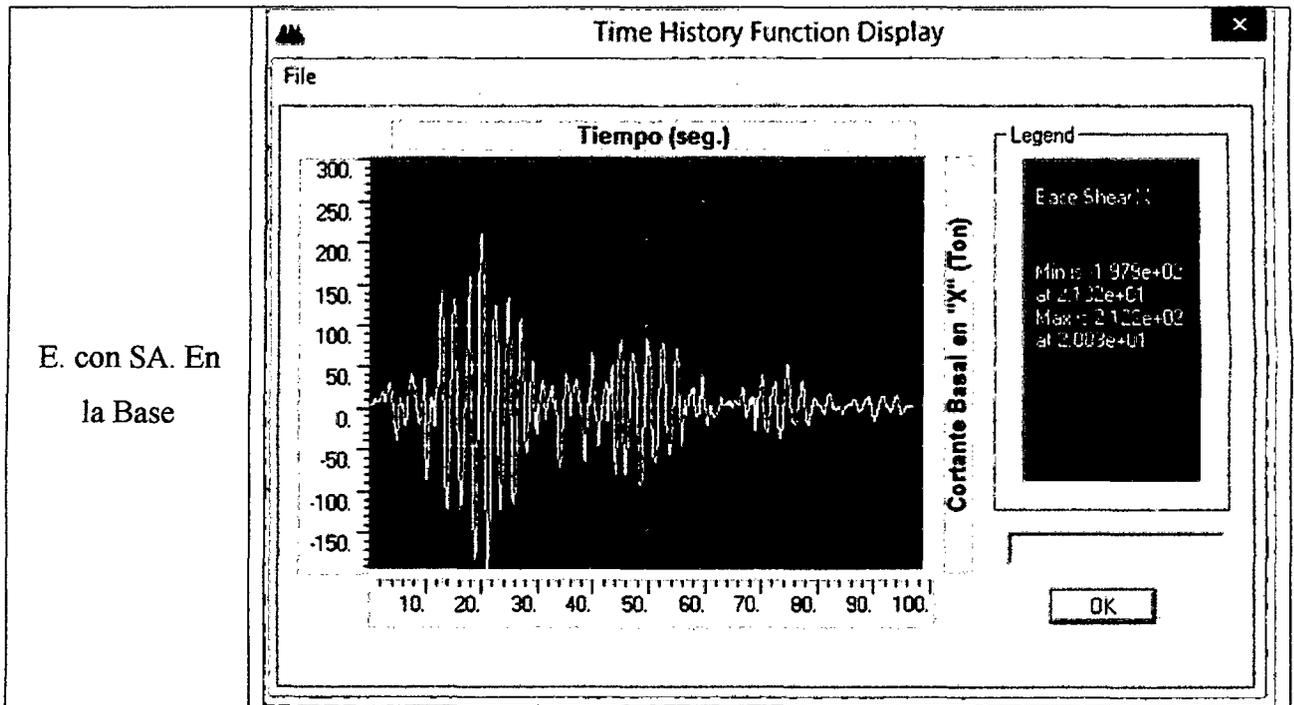


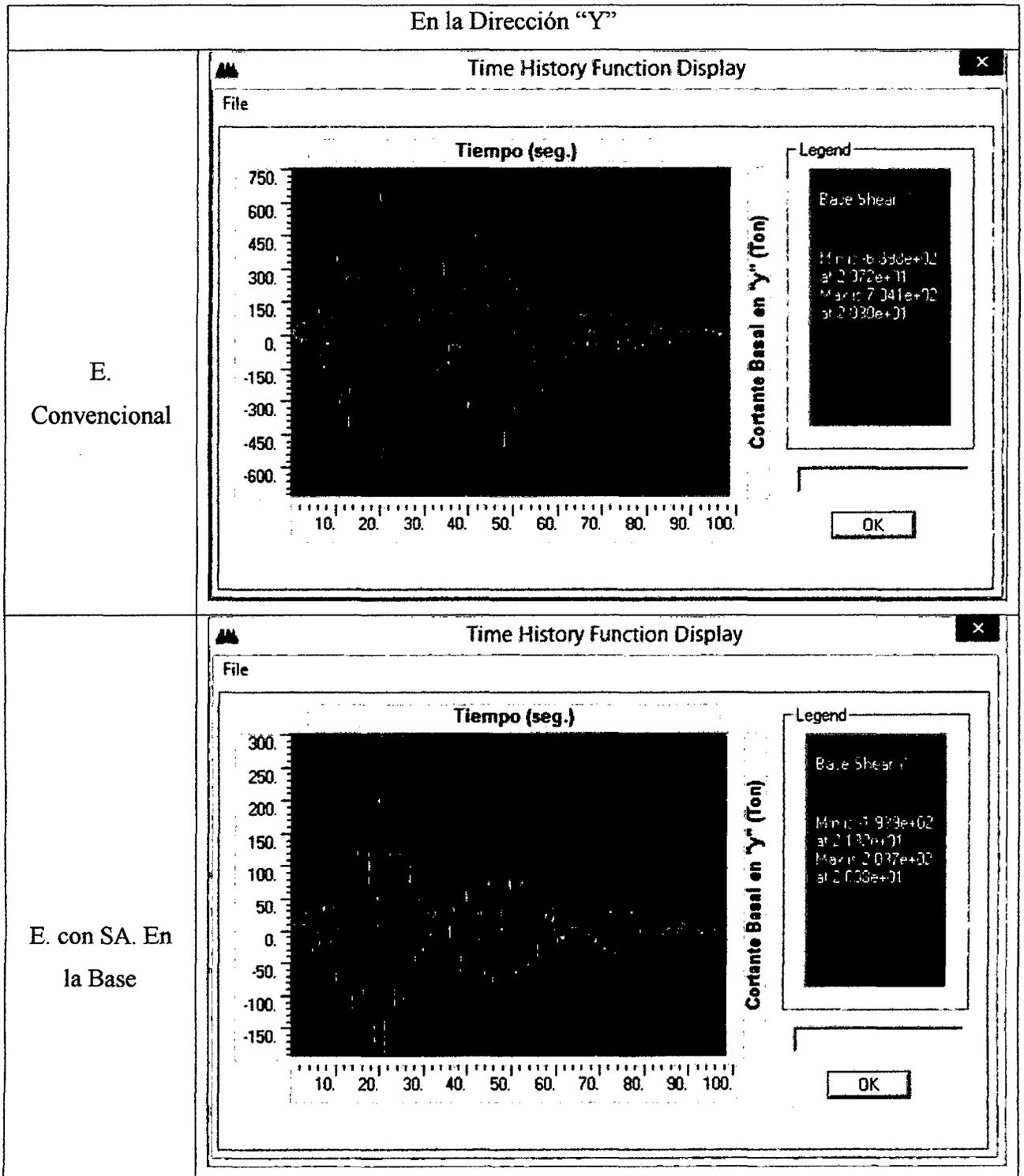




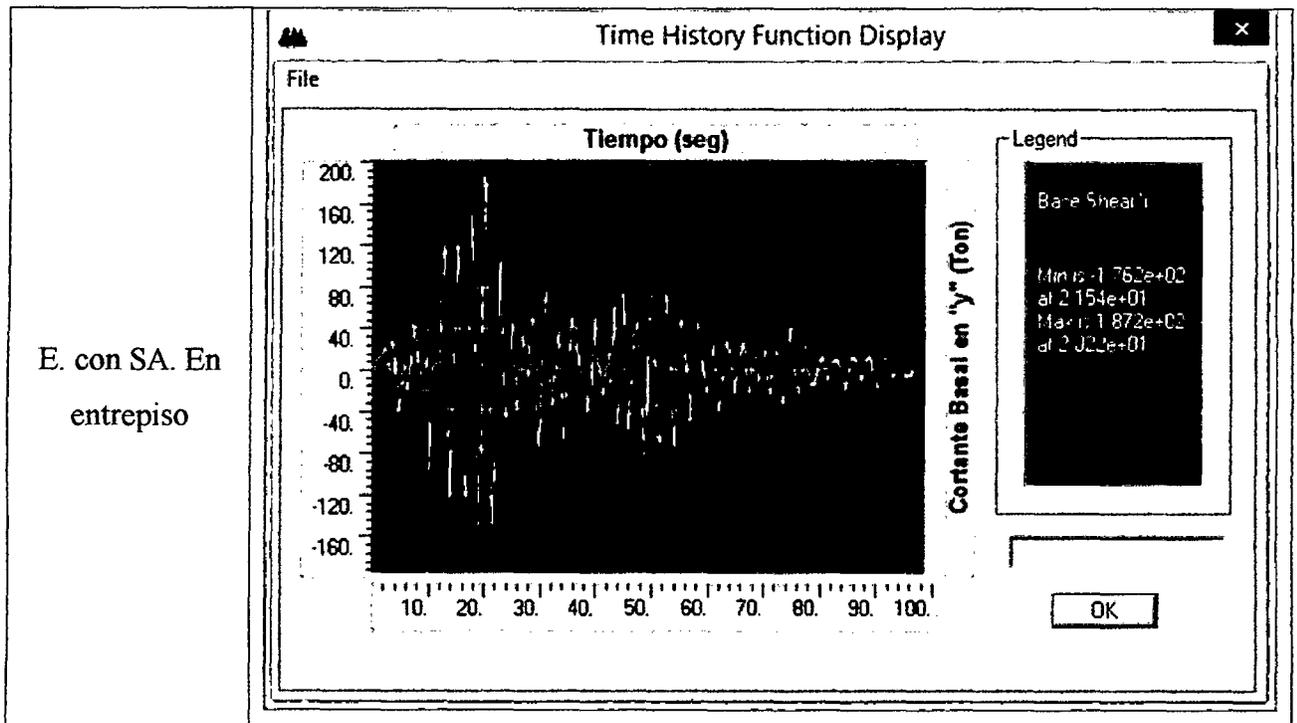








UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
 "ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
 PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"



Los resultados de los gráficos anteriores son simplificados en las tablas 4.36 y 4.37, en los cuales podemos notar que se da un gran porcentaje de reducción de las cortantes basales en el tiempo, tanto en la dirección "X" como en "Y".

Tabla 4. 36: Cuadro comparativo entre las Cortantes del Edificio Convencional y el Aislado en la dirección "X" debido al sismo Lima74

SISMO	DIRECCIÓN	CORTANTE EN BASE (Ton)			% REDUCCIÓN	
		E. Convencional	E. Aislado Base	E. Aislado Entrepiso	E. Aislado Base	E. Aislado Entrepiso
LIMA 1966	MAX XX	497.8	231.6	245.7	53.48%	50.64%
	MIN XX	-556.2	-186.8	-234.5	66.41%	57.84%
CHIMBOTE 1970	MAX XX	410.5	152.1	123.9	62.95%	69.82%
	MIN XX	-411.4	-117.6	-132.4	71.41%	67.82%
LIMA 1974	MAX XX	694.2	212.2	190.1	69.43%	72.62%
	MIN XX	-630.2	-197.9	-181	68.60%	71.28%

Tabla 4. 37: Cuadro comparativo entre las Cortantes del Edificio Convencional y el Aislado en la dirección "Y" debido al sismo Lima74

SISMO	DIRECCIÓN	CORTANTE EN BASE (Ton)			% REDUCCIÓN	
		E. Convencional	E. Aislado Base	E. Aislado Entrepiso	E. Aislado Base	E. Aislado Entrepiso
LIMA 1966	MAX YY	435.3	231.2	245.3	46.89%	43.65%
	MIN YY	-511.9	-185.2	-233.5	63.82%	54.39%
CHIMBOTE 1970	MAX YY	437.6	151.4	124.3	65.40%	71.60%
	MIN YY	-418.2	-117.5	-132.9	71.90%	68.22%
LIMA 1974	MAX YY	734.1	208.7	187.2	71.57%	74.50%
	MIN YY	-689.8	-193.9	-176.2	71.89%	74.46%

Las tablas 4.36 y 4.37 nos muestran las cortantes basales que varían respecto del tiempo, debido a los sismos Lima 1966, Lima 1974 y Chimbote 1970. Pudiendo notar que debido al sismo de Lima 1966, la reducción de la cortante basal en el tiempo de la edificación, se reduce en menor porcentaje, comparada con las otras.

Ahora si analizamos las cortantes en los demás pisos (cortante basal en entrepiso), podemos darnos cuenta que se reducen éstas utilizando aisladores ubicados en base o ubicados en entrepisos, en comparación con las cortantes en entrepiso del edificio convencional.

Tabla 4. 38: Porcentaje de reducción entre las cortantes en los pisos de la edificación convencional y aislada

PISOS	SISMO	LOCALIZACIÓN	CORTANTE EN LA DIRECCIÓN X			%REDUCCIÓN	
			CONVENCIONAL	BASE	ENTREPISO	BASE	ENTREPISO
PISO 7	LIMA66X MAX	ARRIBA	111.09	28.38	25.52	74.45%	77.03%
PISO 7	LIMA66X MAX	ABAJO	112.4	28.82	25.91	74.36%	76.95%
PISO 7	LIMA66X MIN	ARRIBA	-108.92	-22.83	-22.08	79.04%	79.73%
PISO 7	LIMA66X MIN	ABAJO	-110.28	-23.18	-22.42	78.98%	79.67%
PISO 6	LIMA66X MAX	ARRIBA	207.53	66.61	61.44	67.90%	70.39%
PISO 6	LIMA66X MAX	ABAJO	209.3	67.41	62.21	67.79%	70.28%
PISO 6	LIMA66X MIN	ARRIBA	-201.39	-53.78	-52.88	73.30%	73.74%
PISO 6	LIMA66X MIN	ABAJO	-203.29	-54.43	-53.51	73.23%	73.68%

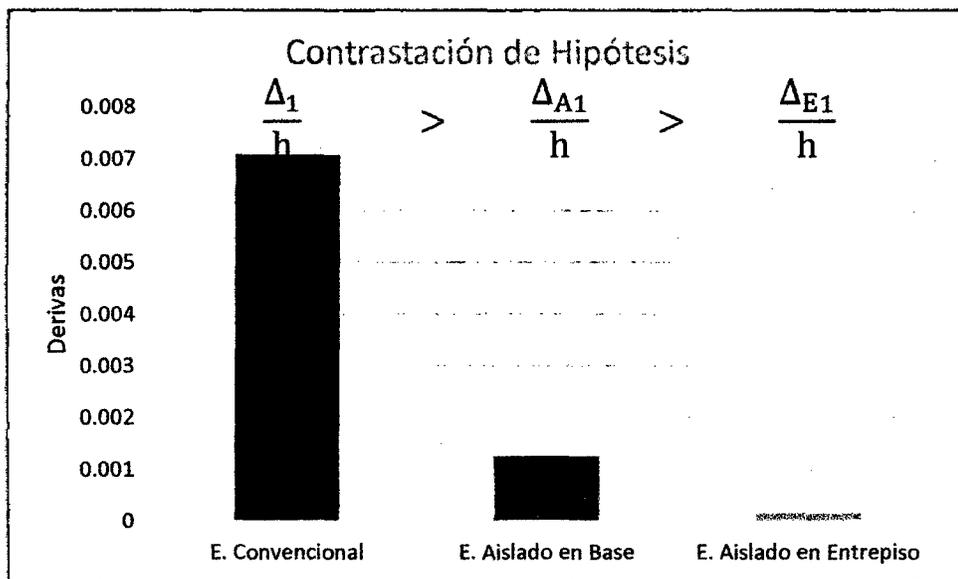
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA- E.A.P.I.C
"ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS COMO ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN
PARA EDIFICACIONES CON FALLAS POR PISO BLANDO"

PISO 5	LIMA66X MAX	ARRIBA	262.43	103.27	97.55	60.65%	62.83%
PISO 5	LIMA66X MAX	ABAJO	262.7	103.65	97.93	60.54%	62.72%
PISO 5	LIMA66X MIN	ARRIBA	-269.89	-83.63	-83.54	69.01%	69.05%
PISO 5	LIMA66X MIN	ABAJO	-270.88	-83.93	-83.86	69.02%	69.04%
PISO 4	LIMA66X MAX	ARRIBA	325.83	136.55	131.91	58.09%	59.52%
PISO 4	LIMA66X MAX	ABAJO	327.3	137.25	132.64	58.07%	59.47%
PISO 4	LIMA66X MIN	ARRIBA	-350.28	-110.8	-112.11	68.37%	67.99%
PISO 4	LIMA66X MIN	ABAJO	-351.44	-111.38	-112.73	68.31%	67.92%
PISO 3	LIMA66X MAX	ARRIBA	384.14	168.88	166.54	56.04%	56.65%
PISO 3	LIMA66X MAX	ABAJO	384.64	169.22	166.9	56.01%	56.61%
PISO 3	LIMA66X MIN	ARRIBA	-406.93	-137.11	-140.88	66.31%	65.38%
PISO 3	LIMA66X MIN	ABAJO	-407.92	-137.38	-141.18	66.32%	65.39%
PISO 2	LIMA66X MAX	ARRIBA	460.17	198.69	199.96	56.82%	56.55%
PISO 2	LIMA66X MAX	ABAJO	461.53	199.32	200.67	56.81%	56.52%
PISO 2	LIMA66X MIN	ARRIBA	-505.93	-160.44	-167.95	68.29%	66.80%
PISO 2	LIMA66X MIN	ABAJO	-507.9	-160.93	-168.53	68.31%	66.82%
PISO 1	LIMA66X MAX	ARRIBA	497.63	228.18	240.63	54.15%	51.64%
PISO 1	LIMA66X MAX	ABAJO	497.88	228.47	241	54.11%	51.59%
PISO 1	LIMA66X MIN	ARRIBA	-561.34	-183.86	-218.52	67.25%	61.07%
PISO 1	LIMA66X MIN	ABAJO	-561.13	-184.13	-219.64	67.19%	60.86%

En la tabla 4.38 notamos que, las cortantes basales en entrepiso se reducen en un promedio de 65%, comprobando de esta manera una vez más la eficiencia de los aisladores.

4.5. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Después de comparar y analizar los resultados obtenidos de la estructura convencional y de la estructura aislada, podemos decir que la hipótesis planteada en la sección 1.1.2.1 ha sido comprobada, es decir los aisladores de tipo elastoméricos ubicados en la base de la edificación en un primer modelo, y en un segundo modelo por encima del primer piso (entrepiso), en donde existe irregularidad por piso blando, disminuyen las derivas (parámetro principal a tomar en cuenta en una irregularidad por piso blando) notablemente permitiendo reducir la posibilidad de falla. Por lo tanto podemos decir que la hipótesis $H_0: \frac{\Delta_1}{h} > \frac{\Delta_{A1}}{h} > \frac{\Delta_{E1}}{h}$ es aceptada.



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ❖ Se ha logrado realizar el análisis dinámico de una Edificación con presencia de falla por piso blando, usando aisladores elastoméricos; concluyendo principalmente que estos dispositivos mitigan la falla por dicha irregularidad.
- ❖ Las derivas en el primer piso de la edificación en estudio, donde ocurre la falla por piso blando, se reducen en un promedio de 83%, cuando se ubican los aisladores elastoméricos en la base del edificio, mientras que cuando se ubican sobre las columnas del primer nivel, se reducen las derivas en un promedio de 97.8%.
- ❖ Al realizar la calificación y evaluación de irregularidad por piso blando del edificio en estudio, se ha modificado la altura del primer piso, a fin de que pueda presentar dicha irregularidad según la norma NTE - E.030, 2003; notando así algunos inconvenientes en ésta norma, debido a que sólo toma en cuenta la variación de alturas en un edificio, siendo muchas veces exagerada dicha variación para que un edificio califique como irregular; obviando por ejemplo la tabiquería, que contribuye a la rigidez lateral de los edificios.
- ❖ La norma ASCE 7-10, resulta más confiable para la calificación de irregularidad de rigidez - piso blando, ya que toma como parámetro principal para dicha calificación, a las derivas, las cuales nos dan la ventaja de considerar directamente el daño de la estructura, pues se basa tanto en la variación de alturas como en los desplazamientos de los pisos.
- ❖ La influencia de los aisladores elastoméricos, indistinto a su ubicación en base o en entrepiso, en las edificaciones con irregularidad por piso blando, es favorable tanto para la mitigación de dicha irregularidad, como para la disminución de la energía de entrada del sismo hasta un promedio del 60%. Resaltando esta disminución de energía, ya que genera así también una importante disminución de esfuerzos en la estructura.
- ❖ Debido a la reducción de la energía sísmica de entrada a la edificación, los valores de los parámetros tratados en la presente investigación, tal como la cortante basal en entrepiso, reduce su valor en comparación con la cortante basal

al mismo nivel de evaluación de la estructura convencional (sin utilizar aisladores), en un promedio de 65%, en la dirección crítica "X".

- ❖ Una importante ventaja desde la perspectiva estructural que genera el uso de aisladores elastoméricos es: disminuir considerablemente los esfuerzos que provocan momentos críticos debido al sismo, en los elementos componentes de la estructura (vigas, columnas, losas, placas, etc), pudiendo evitar incursiones inelásticas en las mismas, y por consiguiente evitar daños importantes o fallas visibles en estos elementos.
- ❖ Finalmente, el diseño de los aisladores elastoméricos se los realizó utilizando la norma ASCE7-10 y el catálogo de DIS. El diseño de los podios y vigas de aislación se lo ha realizado en el programa ETABS, siguiendo la norma E.060.

5.2. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda a los futuros proyectistas hacer uso del buen juicio para determinar si efectivamente existe peligro de falla por piso blando en sus diseños, para tal efecto se recomienda utilizar normas que califiquen mejor este tipo de falla. (ejemplo considerando la relación de derivas).
- ❖ La presente investigación recomienda evaluar experimentalmente en estructuras reales o a escala la utilización de aisladores en estructuras donde, necesariamente su geometría la comprometa a fallar por piso blando, "proyectadas inicialmente en el diseño", (como por ejemplo el uso del primer nivel como estacionamientos).
- ❖ Se recomienda así mismo el estudio de la aplicación de este método, a estructuras existentes con presencia de falla por piso blando. "No proyectadas inicialmente en el diseño".
- ❖ A los futuros investigadores se recomienda hacer una comparación económica, y estructural respecto a la utilización de estos dispositivos de aislación frente a otro tipo de alternativas de solución para la falla de piso blando, con el fin de optimizar recursos.
- ❖ Cuando se utilicen placas para el reforzamiento de cualquier edificación, es recomendable ubicarlas tanto exteriormente como interiormente, para un mejor comportamiento de dicha estructura frente a un sismo.

REFERENCIAS

1. Freeman, JR. 1932. Earthquake Damage and Earthquake Insurance: studies of a rational basis for earthquake insurance, also studies of engineering data for earthquake-resisting construction. New York, McGraw-Hill Book Co. Disponible en <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=wu.89053855664;view=1up;seq=418>.
2. Chopra AK., Clough DP. y Clough RW. 1972. Earthquake resistance of buildings with a "soft" first Storey. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1(4): 347-355
3. NZSEE Conference (2006, Bangladesh).2006. Soft First Story with Seismic Isolation System.
4. Todorovska, MI. 1999. Base Isolation by a Soft First Story with Inclined Columns. *Journal of Engineering Mechanics* (en línea). Disponible en <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281999%29125%3A4%28448%29>
5. World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations (10th, 2007, Turkey). 2007. Seismic Isolation for Soft-Story Buildings.
6. MO, YL. y Chang, YF. 1995. Application of Base Isolation Concept to Soft First Story Buildings. *Computers & Structures*. 55 (5): 883-896.
7. Carrillo Trujillo, CE.2008. Comparación de la Respuesta Sísmica incorporando y desacoplando la Mampostería y Técnicas de Reforzamiento. Tesis Ing. Civil. Sangolquí, Ecuador, Escuela Politécnica del Ejército.
8. Schenone Cano, MA; Urteaga Magán, JC. 2011. Evaluación del Criterio de Calificación de Irregularidad por Piso Blando según la norma E.030 y propuesta de modificación". Tesis Ing. Civil. Lima, Perú, Pontífice Universidad Católica del Perú. 95p.
9. Reglamento Nacional de Edificaciones.2010. E.030. 2003. "Norma de Diseño Sismorresistente" y E.060. 2003. "Norma de Concreto Armado". 3ed. Lima - Perú, Megabyte S.A.C.
10. INN 2003. NCh2745. "Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica". Santiago de Chile, Chile.
11. Comisión Ad-Hoc. 2001. "Norma Venezolana. Edificaciones Sismorresistentes". Caracas, Venezuela. Parte 1.

12. ASCE 7-10. 2010. "Minimum Design Loads for Building and Other Structures". US, American Society of Civil Engineers.
13. Código Ecuatoriano de la Construcción. 2002. Peligro sísmico, Espectros de Diseño y Requisitos Mínimos de Cálculo para Diseño Sismo-Resistente. Quito. Ecuador.
14. Structural Engineers Association. 1999. Seismic Design Manual: Code Application Examples. Gail Hynes Shea, Albany. Sacramento, California. 1v.
15. San Bartolomé, A. Blog de Investigaciones en Concreto Armado, con énfasis en las edificaciones de ductilidad limitada (en línea). Interacción Tabique Pórtico, problemas de Piso Blando. Disponible en <http://blog.pucp.edu.pe/item/11663/investigaciones-en-concreto-armado>.
16. Technical Committee for Building structures and elements of building. 2012. La norma es idéntica a la norma ISO 3010:2001, Basis for Design of Structures- Seismic action on structures. 1st ed. Ethiopian Standards Agency.
17. Naeim, F; Kelly, JM. 1999. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. USA, John Wiley & Sons, INC.289p.
18. Cheng, F.; Jiang, H.; and Lou, K. 2008. "Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control". New York, USA, CRC Press Taylor & Francis Group. 652p.
19. Saavedra Quezada, MA. 2005. Análisis de Edificios con Aisladores Sísmicos mediante procedimientos Simplificados. Tesis Ing. Civil. Valdivia-Chile, Universidad Austral de Chile. 161p.
20. Aguiar, R; Almazán, JL.; Dechent, P.; Suárez, V. 2008. Aisladores de Base Elastoméricos y FPS. Ecuador, Centro de Investigaciones Científicas- Escuela Politécnica del Ejército. 291p.
21. Otálora Suárez, LV. 2012. Estudio de Vulnerabilidad y Reforzamiento de una Estructura de tres pisos y cubierta en placa. Tesis Ing. Civil. Bogotá - Colombia, Universidad Militar Nueva Granada. 47p.
22. ASCE 41-06. 2007. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. USA, American Society of Civil Engineers – SEI.
23. Boza Farfán, ZE. y Galán Tirapo, DJ. 2013. Diseño de un Edificio Aporticado con Disipadores en arreglo Chevron. Tesis Ing. Civil. Lima-Perú, Pontífice Universidad Católica del Perú. 63p.

24. Korswagen Eguren, PA; Arias Ricse, JC. y Huaranga Huamaní, PG. 2012. Análisis y Diseño de Estructuras con Aisladores Sísmicos en el Perú. Tesis Ing. Civil. Lima-Perú, Pontífice Universidad Católica del Perú. 92p.
25. Dynamic Isolation Systems (DIS). 2007. Seismic Isolation: For Buildings and Bridges. Nevada-USA, McCarran. 20p.
26. AGOM INTERNATIONAL SRL. 2008. Seismic Isolation. Italy. 26p.
27. International Conference of Building Official (ICBO). 1997. Uniform Building Code. USA. 2V.
28. Villareal Castro G. 2013. Especificaciones con Sistemas de Protección Sísmica (diapositivas). Trujillo, Perú. 47 diapositivas.
29. Tornello, ME y Frau CD. 2010. Experiencias sobre Aislamiento Sísmico en Mendoza, Argentina. Diseño, Modelación y Construcción. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. 15(1):1-47.
30. Arriagada Rosas, JA. 2005. Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional). Tesis Ing. Civil. Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile. 240p.
31. Muñoz Peláez, A. 2013. Sistemas de Protección Antisísmica por Aislamiento (diapositivas). Lima, Perú. 18 diapositivas.
32. California Seismic Safety Commission. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. California, USA. Applied Technology Council.

CAPITULO VI: ANEXOS

ANEXO A:

SOLICITUD RECHAZADA POR EL ENCARGADO DE LA RESIDENCIAL "LOS OLIVOS"

De: César G. Lázaro C. (groot.lazaro@gmail.com)

Enviado: martes, 02 de septiembre de 2014 08:04:43 p.m.

Para: yazromerou@hotmail.com

groot.lazaro@gmail.com es de confianza. Mostrar siempre el contenido.

Srta. Yazmin Romero:

A su petición de realizar Ensayos del Esclerómetro, Toma de Fotografías y otras muestras en la "Residencial Los Olivos" le comunico que dicha solicitud fue DENEGADA.

Como le comenté vía telefónica que debería realizar la consulta a todos los propietarios de la Residencial, lo cual no fue aceptada, básicamente por el tema de SEGURIDAD a todos los vecinos y sus familias.

Sin otro particular, Le agradezco habernos considerado en sus estudios a realizar.

Saludos,

César Lázaro Chávez

Administrador Temporal

Residencial Los Olivos

© 2014 Microsoft

ANEXO B:

CATÁLOGO DIS PARA EL DISEÑO DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS
 TANTO UBICADOS EN LA BASE COMO EN ENTREPISO



Engineering

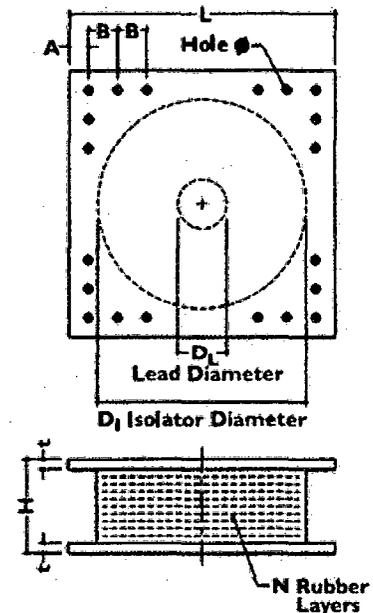
Isolator Engineering Properties

Isolator Properties: Metric Units

DEVICE SIZE				MOUNTING PLATE DIMENSIONS					
Isolator Diameter, D _I (mm)	Isolator Height, H (mm)	Number of Rubber Layers, N	Lead Diameter D _L (mm)	L (mm)	c (mm)	Hole Qty.	Hole Ø (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

(Fuente: Dynamic Isolation Systems (DIS), 2007)

Isolator Diameter, D_i (mm)	DESIGN PROPERTIES			Maximum Displacement, D_{max} (mm)	Axial Load Capacity P_{max} (kN)
	Yielded Stiffness, K_d (kN/mm)	Characteristic Strength Q_d (kN)	Compression Stiffness, K_c (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000



(Fuente: *Dynamic Isolation Systems (DIS)*, 2007)

Para el diseño de los aisladores en base se utilizó un diámetro del aislador de 55cm, mientras que para los aisladores ubicados en entrepiso, se utilizó un diámetro de 52 cm.

ANEXO C:

Procedimiento de Colocación de los Aisladores

El procedimiento de instalación de aisladores generalmente depende del tipo de estructura. En la presente investigación resaltaremos los pasos principales, basándonos en un catálogo de AGOM INTERNATIONAL SRL (26), el cual lo explica de la siguiente manera:

1. Compruebe antes de la instalación.

Con el fin de evitar errores colocaciones de los aisladores, todos los datos técnicos y la descripción, los impresos en la etiqueta de los mismos, se comprobarán y se comparan con las que se muestran en los planos.

2. Preparación de la Subestructura

Las subestructuras deberán llegar a un nivel de aproximadamente 30 mm más baja que el nivel final.

Se dejará algunos espacios vacíos en el podio inferior con el fin de colocar barras de anclaje en la placa de anclaje inferior de los aisladores. Una manera sencilla de dejar espacios vacíos es utilizar tubos de acero corrugado cementados con un diámetro de al menos el doble en comparación con el diámetro de las barras de anclaje.

Para nuestro caso si consideramos el nivel de emplazamiento del aislador +0.00, las barras de anclaje de 15 cm se ubicaran a un nivel -0.175.

3. Posición del aislador y condición de la subestructura

Los aisladores se colocan en el nivel final definido mediante el apoyo de una grúa hasta quedar encima de la placa de anclaje inferior y hacer coincidir con los orificios de la placa de anclaje inferior antes realizados; sabiendo que la desviación máxima desde el plano horizontal no debe exceder de 0.001 radianes.

Con el fin de fijar los aisladores y las barras de anclaje debe proporcionarse un encofrado alrededor de la parte inferior (normalmente el encofrado es de madera o de acero).

Para unir la placa anclaje inferior del aislador con el podio inferior debe proporcionarse un grouting autonivelante que puede ser un mortero de alta resistencia de fraguado rápido con resistencia a la compresión mayor a 45 MPA, tomando en cuenta que el espesor del mortero deber ser igual o menor a 40mm.

Así mismo el nivel del mortero no excederá el nivel inferior de la placa de acero de los aisladores para evitar la incrustación y comprometer así el futuro eventual reemplazo del aislador.

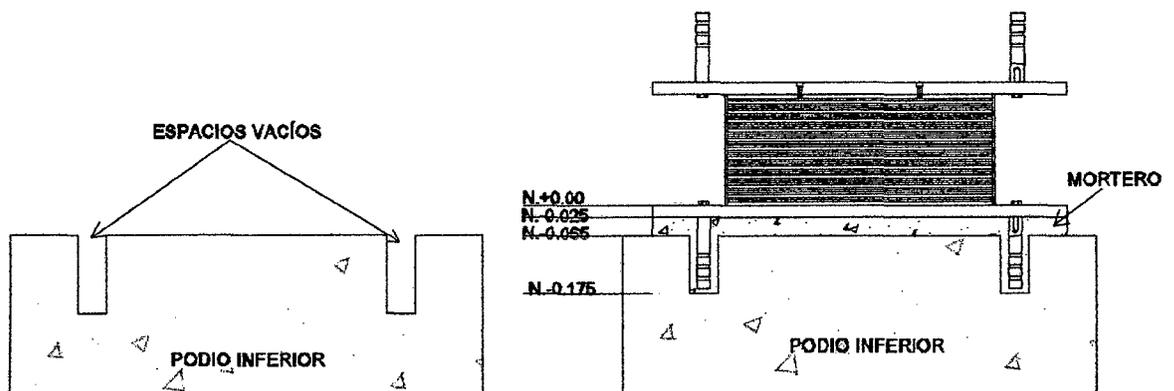


Figura 6. 1: Representación de los pasos 2 y 3 para la colocación de los aisladores

4. Posición de la superestructura- Vaciado de concreto in situ de la superestructura.

El encofrado del podio superior debe estar dispuesto alrededor de la placa superior de acero el aislador y sellado con cinta adhesiva o espuma para evitar fugas de concreto durante el vaciado.

El encofrado debe estar dispuesta de una manera adecuada para evitar la incrustación de la placa superior del aislador en el concreto y así no comprometer una sustitución eventual futura. Cuando el concreto haya alcanzado la resistencia adecuada los encofrados tienen que ser eliminados.

Al final de la construcción de los aisladores se deben limpiar y la pintura de las placas de acero deben ser reparados si se produjeron algunos daños durante la construcción.

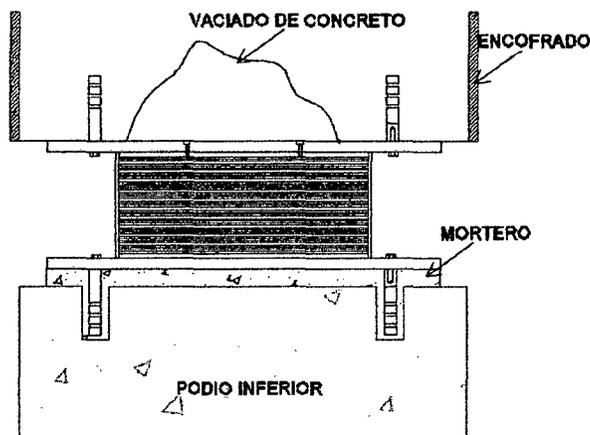
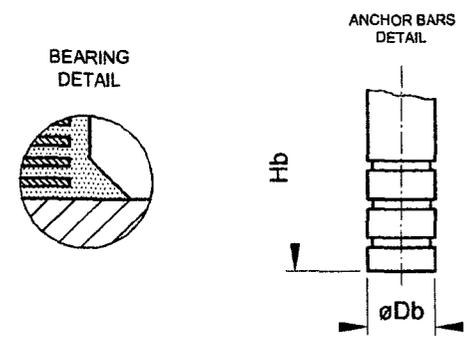
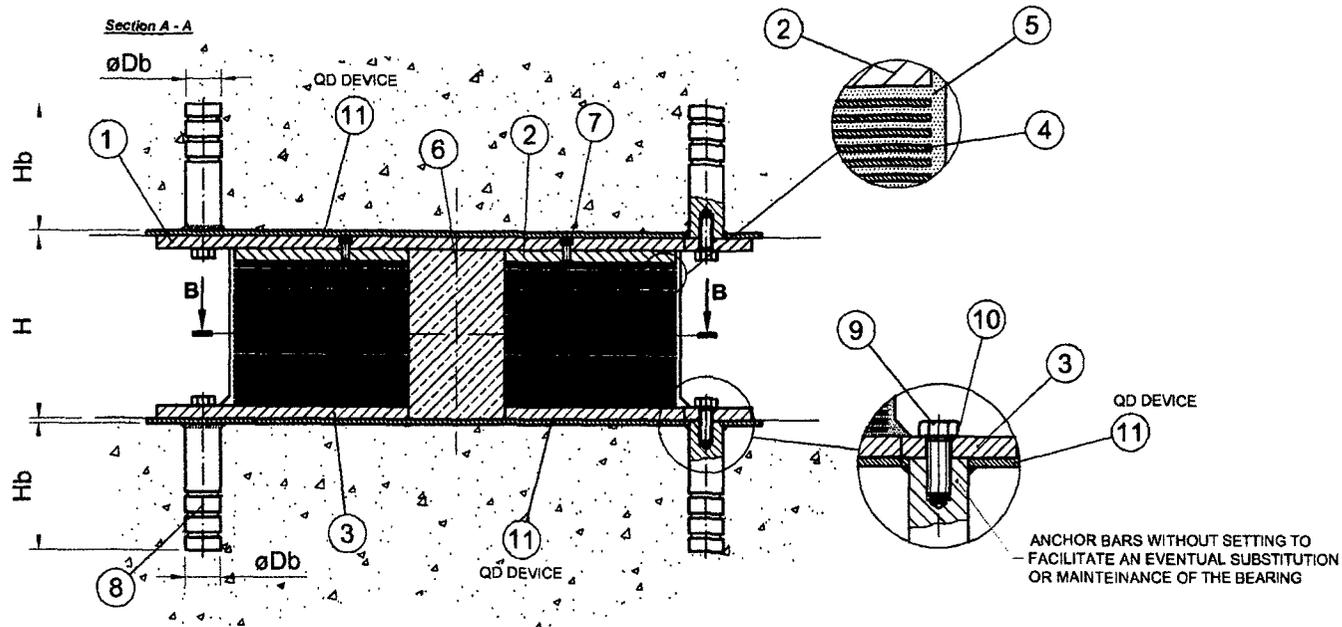
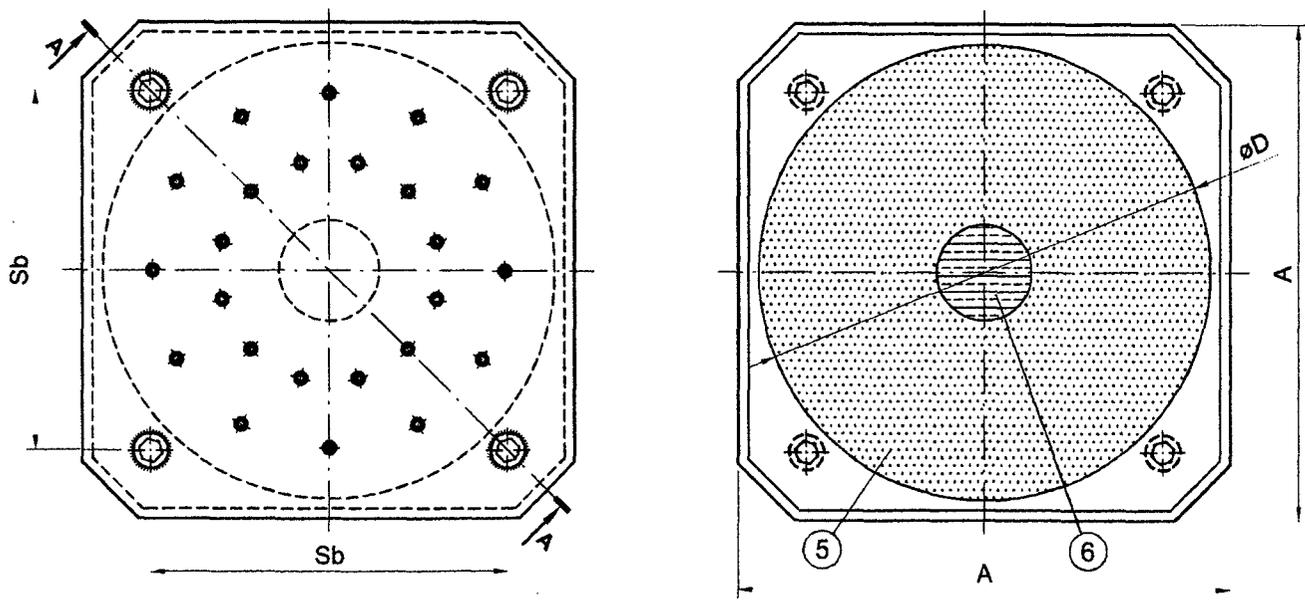


Figura 6. 2: Representación del paso 4 para la colocación de los aisladores

ANEXO D: Se adjunta una publicación hecha por la empresa AGOM INTERNATIONAL S.R.L., donde se indican las especificaciones, para los pernos utilizados en los aisladores, las barras de anclaje, las láminas de acero, etc.; según las dimensiones del aislador diseñado.



Section B - B



BEARING (ϕD)		$\phi 300$	$\phi 500$	$\phi 700$	$\phi 900$
OVERALL DIMENSIONS (A x A x H) [mm]		350x350x226	550x550x247	750x750x17	950x950x449
ANCHOR BAR (ϕDb x Hb) [mm]		$\phi 30$ x150	$\phi 40$ x175	$\phi 50$ x200	$\phi 60$ x250
ANCHOR BAR DISTANCE (Sb) [mm]		290	460	660	860
MAX VERTICAL SEISMIC LOAD [kN]		600	1900	3500	6000
HORIZ SEISMIC MOVEMENT [mm]		125	150	200	250
ROTATION [%]		5	5	5	5
HORIZONTAL STIFFNESS [kN/mm]		0.65	1.25	2.00	3.50
RUBBER G MODULUS [MPa]		0.9	0.9	0.9	0.9
DAMPING [%]		15	20	20	25

POS.	Q.TY	DESCRIPTION	DIMENSION	STANDARD	MATERIAL	NOTE
11	2	QD Device	-	EN 10025	S 275 JR	A
10	8	Washers	-	EN 20898	Zn coated	B
9	8	Anchor Bolts	-	EN 20898	Class 8.8 Zn coated	B
8	8	Anchor Bars	-	EN 10025	S 275 JR	B
7	-	Bolts	-	EN 20898	Class 8.8 Zn coated	B
6	1	Lead	-	-	Pure Lead 99%	-
5	1	Rubber Element	-	-	NR 6025 Sha	C
4	-	Steel Plates	-	EN 10025	S 275 JR	-
3	1	Lower Vulcanized Plate	-	EN 10025	S 275 JR	A
2	1	Vulcanized Plate	-	EN 10025	S 275 JR	-
1	1	Upper Plate	-	EN 10025	S 275 JR	A

NOTE - C RUBBER ACCORDING CUSTOMER'S SPEC. (EN 1337-3, CNR10018, BS5400, MSHTO)
 NOTE - B NUMBER OF BOLTS CALCULATED ACCORDING TO THE REFERENCE CODE
 NOTE - A PROTECTIVE ANTICORROSION TREATMENT
 FOR BEARING HEIGHT THE TOLERANCE IS: +5 mm ; - 1 mm

PROTECTIVE ANTICORROSION CYCLE
 1 Sand-blasting at white metal SA2.5
 2 Bicomponent epoxidic covering at high thickness Mean grey color: RAL7042
 Minimum thickness dry film a) Exposed surfaces: 200 micron
 b) Worked surfaces and contact surfaces of the concrete: 70 micron

DATE	03.07.2006	OBJECT	FIRST ISSUE	REVISION	00
CUSTOMER / PROJECT				NOT IN SCALE DRAWING	
LRB Bearings				DRAWN: RCP	
General Drawing				CHECKED: RCP	
AGOM				APPROVED: CC	
AGOM INTERNATIONAL S. r. l. Via Mesero, 12 20010 Ossona (MI)				DIPLOMA 00689	

ANEXO E:

PLANO U1: UBICACIÓN DE LOS AISLADORES EN LA BASE DE LA EDIFICACIÓN

PLANO U2: UBICACIÓN DE LOS AISLADORES EN ENTREPISO DE LA EDIFICACIÓN

PLANO A1 y A2: DETALLES DE AISLADORES UBICADOS EN BASE Y SUS SISTEMAS DE CONEXIÓN

PLANO A3, A4 y A5: DETALLES DE AISLADORES EN ENTREPISO Y SUS SISTEMAS DE CONEXIÓN.