

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO
ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA
CON AISLACIÓN Y SIN AISLACIÓN SÍSMICA DE BASE”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:
SEBASTIAN ZEGARRA ARAUJO**

**ASESORES:
DR. ING. HERMES ROBERTO MOSQUEIRA RAMÍREZ
DR. ING. MIGUEL ÁNGEL MOSQUEIRA MORENO**

**CAJAMARCA – PERÚ
2015**

Copyright © 2015 por Sebastian Zegarra Araujo
Todos los derechos reservados

A mis padres, Penélope y Alberto, que me han dejado el mejor legado: mi educación y mis valores, además a las personas que me han apoyado, de alguna u otra manera. A ellos y a los amigos que me alentaron en esta tarea, dedico el resultado... del que son, claro está, inocentes.

LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

EL ARTE DE UTILIZAR MATERIALES

Que tienen propiedades que sólo pueden ser estimadas

PARA CONSTRUIR ESTRUCTURAS REALES

Que sólo pueden ser analizadas aproximadamente

QUE SOPORTAN FUERZAS

Que no son conocidas con precisión

DE MANERA QUE NUESTRA RESPONSABILIDAD CON EL PÚBLICO
SEA SATISFECHA

Adaptado de un autor anónimo

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	v
LISTA DE ILUSTRACIONES	viii
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE GRÁFICOS	xii
LISTA DE ECUACIONES.....	xiv
AGRADECIMIENTOS	xvii
LISTA DE ABREVIACIONES	xviii
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
Capítulo I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
I.1.1 Planteamiento y Formulación del Problema.....	2
I.1.2 Justificación.....	4
I.1.3 Ámbito de Investigación/Delimitación del Problema.....	5
I.1.4 Tipo de Investigación.....	6
I.1.5 Objetivos	6
I.1.6 Hipótesis de Investigación	7
I.2 MÉTODO Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	8
I.2.1 Métodos de Investigación	8
I.2.2 Técnicas de Investigación.....	9
I.2.3 Limitaciones.....	10
Capítulo II. MARCO TEÓRICO.....	11
II.1 Estado de la Cuestión.....	11
II.1.1 Antecedentes Teóricos de la Investigación	11
Fundamento Teórico.....	12
II.2 FUNDAMENTO Y SISTEMAS DE AISLACIÓN BASAL	13

II.2.1	Tipos de Aislación Basal.....	13
II.2.2	Norma ASCE/SEI 2010 de Aislación Basal.....	33
II.2.3	Comportamiento del Sistema Aislado.....	38
Capítulo III.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
III.1	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL EDIFICIO.....	47
III.1.1	Características del Edificio Convencional.....	47
III.1.2	Características del Edificio Aislado.....	50
III.1.3	Modelamiento Computacional.....	51
III.2	ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL.....	55
III.2.1	Análisis Modal Tridimensional de la Estructura.....	55
III.2.2	Diseño de la Estructura.....	57
III.3	AISLAMIENTO BASAL DE LA ESTRUCTURA.....	59
III.3.1	Condiciones Generales en el Diseño de la Aislación Basal.....	59
III.3.2	Estudio de Alternativas de Aislación Basal para la Estructura.....	60
III.3.3	Procedimiento de diseño de sistema de aislación.....	62
III.4	ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA AISLADA.....	64
III.4.1	Análisis Modal Tridimensional de la Estructura.....	64
III.4.2	Diseño de la Estructura.....	66
Capítulo IV.	RESULTADOS.....	67
IV.1	ANÁLISIS Y DEMOSTRACIÓN DE RESULTADOS.....	67
IV.1.1	COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS.....	67
IV.1.2	RESULTADOS.....	81
	CONCLUSIONES.....	86
	RECOMENDACIONES.....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	88
Apéndice 1.	Resultados de la estructura convencional.....	91
Apéndice 2.	Catálogo de aisladores elastoméricos.....	104

Apéndice 3. Procedimiento de diseño para aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).	105
Apéndice 4. Resultados de la estructura aislada	113
Apéndice 5. Comparación de Resultados.	126
Apéndice 6. Verificación de elementos estructurales.	133
Apéndice 7. Costo de aisladores	147
Apéndice 8. Plano de ubicación de edificio del Hospital Regional de Cajamarca utilizado como modelo.	149
Apéndice 9. Plano de ubicación de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) en el edificio.	151

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración II-1, Terminología del sistema de aislación.....	14
Ilustración II-2, Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (LDR).....	16
Ilustración II-3, Componentes del aislador elastomérico de alto amortiguamiento HDR.....	16
Ilustración II-4, Gráfico fuerza de corte vs. Deformación lateral (HDR).....	17
Ilustración II-5, Componentes de un aislador con núcleo de plomo (LRB).....	21
Ilustración II-6, Componentes de un aislador de péndulo friccional (FPS).....	32
Ilustración II-7, Mecanismo de FPS.	33
Ilustración II-8, Modelo edificio aislado.	40
Ilustración II-9, Maneras de vibrar de un sistema aislado.....	45
Ilustración III-1, Diagrama de flujo, datos a ingresar en el programa Etabs.	52
Ilustración III-2, Datos de propiedades de elemento "Link".....	53
Ilustración III-3, Propiedades de direccionales U1 de elemento.	53
Ilustración III-4, Propiedades de direccionales U2 de elemento.	54
Ilustración III-5, Procedimiento de diseño aislador sísmico de base.	63
Ilustración IV-1, Modelo edificio convencional en Etabs.....	67
Ilustración IV-2, Edificio con losa y vigas de aislacion.....	68
Ilustración IV-3, Ubicación de aisladores.....	69
Ilustración IV-4, Modelo de estructura aislada.....	80
Ilustración 3-1, Diagrama de flujo de diseño de aislador con núcleo de plomo (LRB).....	105
Ilustración 3-2, Diagrama de flujo: Propiedades de aislador y capacidad de carga por gravedad.	106
Ilustración 3-3, Diagrama de flujo: Desempeño de aislador bajo DBE.....	109
Ilustración 3-4, Diagrama de flujo: Desempeño de aislador bajo MCE.....	110
Ilustración 3-5, Diagrama de flujo: Capacidad de carga por sismo.....	111
Ilustración 6-1, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 2.	135
Ilustración 6-2, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 3.	136
Ilustración 6-3, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 4.	137
Ilustración 6-4, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 5.	138
Ilustración 6-5, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 6.	139
Ilustración 6-6, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales - Base.	140
Ilustración 6-7, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 1.....	141
Ilustración 6-8, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 2.....	142
Ilustración 6-9, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 3.....	143
Ilustración 6-10, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 4.....	144

Ilustración 6-11, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 5.....	145
Ilustración 6-12, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 6.....	146

LISTA DE TABLAS

Tabla II.1, Propiedades de aislador de alto amortiguamiento HDR.	18
Tabla II.2, Compuestos del caucho natural.....	26
Tabla II.3, Coeficiente de amortiguamiento B.	37
Tabla III.1, Guía de Aisladores.	61
Tabla IV.1, Tamaño del dispositivo de aislación.	70
Tabla IV.2, Datos de sismo.	71
Tabla IV.3, Tipo de aislador y datos de carga.	71
Tabla IV.4, Dimensiones de aisladores.	72
Tabla IV.5, Propiedades de aisladores.....	72
Tabla IV.6, Capacidad de carga: Cargas por gravedad.	73
Tabla IV.7, Capacidad de carga: Sismo Base de Diseño (DBE).	74
Tabla IV.8, Capacidad de carga: Sismo Máximo Posible (MCE).	75
Tabla IV.9, Desempeño sísmico: Sismo Base de Diseño (DBE).....	75
Tabla IV.10, Desempeño sísmico: Sismo Máximo Posible (MCE).	76
Tabla IV.11, Datos a ingresar en programa Etabs.....	77
Tabla IV.12, Comparación de período y participación de masa modal.....	81
Tabla IV.13, Variación del desplazamiento de la estructura aislada con respecto a la convencional.	82
Tabla IV.14, Variación de la aceleración de la estructura aislada con respecto a la convencional.	83
Tabla IV.15, Variación de la fuerza cortante de la estructura aislada con respecto a la convencional.	84
Tabla IV.16, Variación del momento de volteo de la estructura aislada con respecto a la convencional.	85
Tabla 1.1, Modos de vibración de estructura convencional.	91
Tabla 1.2, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura convencional.	92
Tabla 1.3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura convencional.	93
Tabla 1.4, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura convencional.....	93
Tabla 1.5, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura convencional.	94
Tabla 1.6, Aceleración debido al sismo de IcaX en estructura convencional.....	95
Tabla 1.7, Aceleración debido al sismo de IcaY en estructura convencional.	96
Tabla 1.8, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.	97
Tabla 1.9, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaX en estructura convencional.	98
Tabla 1.10, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaY en estructura convencional.	99

Tabla 1.11, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.....	100
Tabla 1.12, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaX en estructura convencional.....	101
Tabla 1.13, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaX en estructura convencional.....	102
Tabla 1.14, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaY en estructura convencional.....	102
Tabla 4.1, Modos de vibración de estructura aislada.....	113
Tabla 4.2, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura aislada.....	114
Tabla 4.3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura aislada.....	115
Tabla 4.4, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura aislada.....	116
Tabla 4.5, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura aislada.....	117
Tabla 4.6, Aceleración debido al sismo IcaX en estructura aislada.....	117
Tabla 4.7, Aceleración debido al sismo IcaY en estructura aislada.....	118
Tabla 4.8, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.	119
Tabla 4.9, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.	120
Tabla 4.10, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.	121
Tabla 4.11, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.	122
Tabla 4.12, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.....	123
Tabla 4.13, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.....	124
Tabla 4.14, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.....	124
Tabla 5.1, Comparación de desplazamiento debido a espectro de respuesta.	126
Tabla 5.2, Comparación de desplazamiento debido a sismo Ica.	126
Tabla 5.3, Comparación de aceleración debido a espectro de respuesta.	127
Tabla 5.4, Comparación de aceleración debido a sismo de Ica.	128
Tabla 5.5, Comparación de fuerza cortante debido a espectro de respuesta.	129
Tabla 5.6, Comparación de fuerza cortante debido a sismo de Ica.	129
Tabla 5.7, Comparación de momento de volteo debido a espectro de respuesta.	130
Tabla 5.8, Comparación de momento de volteo debido a sismo de Ica.	131
Tabla 7.1, Costos de edificios aislados sísmicamente.....	147

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico II-1, Fuerza de corte vs. Deformación lateral (LRB).....	21
Gráfico II-2, Modelo de Takeda de aproximación bilineal.....	22
Gráfico II-3, Aceleración vs. Período para sistema aislado y empotrado.....	38
Gráfico II-4, Período vs. Desplazamiento para sistema empotrado y aislado.....	39
Gráfico III-1, Espectro de respuesta BF.....	56
Gráfico III-2, Espectro de respuesta DBE.....	65
Gráfico III-3, Espectro de respuesta MCE.....	65
Gráfico IV-1, Curvas de histéresis para los dos tipos de aisladores con núcleo de plomo.....	78
Gráfico IV-2, Desempeño de sistema de aislación.....	79
Gráfico IV-3, Comparación de período y participación de masa modal.....	81
Gráfico IV-4, Variación del desplazamiento de la estructura aislada con respecto a la convencional.	82
Gráfico IV-5, Variación de la aceleración de la estructura aislada con respecto a la convencional.	83
Gráfico IV-6, Variación de la fuerza cortante de la estructura aislada con respecto a la convencional.....	84
Gráfico IV-7, Variación del momento de volteo de la estructura aislada con respecto a la convencional.....	85
Gráfico 1-1, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura convencional.	92
Gráfico 1-2, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura convencional.....	93
Gráfico 1-3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura convencional.....	94
Gráfico 1-4, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura convencional.....	95
Gráfico 1-5, Aceleración debido al sismo de IcaX en estructura convencional.....	96
Gráfico 1-6, Aceleración debido al sismo de IcaY en estructura convencional.....	97
Gráfico 1-7, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.	98
Gráfico 1-8, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaX en estructura convencional.....	99
Gráfico 1-9, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaY en estructura convencional.....	100
Gráfico 1-10, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.....	101
Gráfico 1-11, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaY en estructura convencional.....	103
Gráfico 4-1, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura aislada.....	114
Gráfico 4-2, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura aislada.....	115
Gráfico 4-3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura aislada.....	116

Gráfico 4-4, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura aislada.....	117
Gráfico 4-5, Aceleración debido al sismo IcaX en estructura aislada.....	118
Gráfico 4-6, Aceleración debido al sismo IcaY en estructura aislada.....	119
Gráfico 4-7, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.	120
Gráfico 4-8, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.	121
Gráfico 4-9, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.	122
Gráfico 4-10, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.	123
Gráfico 4-11, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.....	125
Gráfico 5-1, Comparación de desplazamiento debido a espectro de respuesta.	126
Gráfico 5-2, Comparación de desplazamiento debido a sismo Ica.	127
Gráfico 5-3, Comparación de aceleración debido a espectro de respuesta.	128
Gráfico 5-4, Comparación de aceleración debido a sismo de Ica.	128
Gráfico 5-5, Comparación de fuerza cortante debido a espectro de respuesta.	129
Gráfico 5-6, Comparación de fuerza cortante debido a sismo de Ica.	130
Gráfico 5-7, Comparación de momento de volteo debido a espectro de respuesta.	131
Gráfico 5-8, Comparación de momento de volteo debido a sismo de Ica.	132

LISTA DE ECUACIONES

Ec. I-1 Riesgo sísmico.....	3
Ec. II-1 Factor de Forma	26
Ec. II-2 Factor de forma LRB	26
Ec. II-3 Rigidez vertical por capa	26
Ec. II-4 Módulo de compresión.....	27
Ec. II-5 Área reducida, sección cuadrada.....	27
Ec. II-6 Área reducida, sección circular.....	27
Ec. II-7 Deformación por compresión.....	27
Ec. II-8 Deformación de corte de compresión.....	27
Ec. II-9 Deformación de corte de rotación.....	28
Ec. II-10 Deformación de corte por desplazamiento.....	28
Ec. II-11 Deformación límite, cargas de gravedad.....	28
Ec. II-12 Deformación límite, cargas de sismo.....	28
Ec. II-13 Carga máxima a un desplazamiento Δ	28
Ec. II-14 Inercia de aislador, sección cuadrada.....	28
Ec. II-15 Inercia de aislador, sección circular.....	29
Ec. II-16 Altura total de aislador.....	29
Ec. II-17 Módulo de pandeo efectivo.....	29
Ec. II-18 Constante de pandeo, T.....	29
Ec. II-19 Constante de pandeo, R.....	29
Ec. II-20 Constante de pandeo, Q.....	29
Ec. II-21 Carga de pandeo, a $D=0$	29
Ec. II-22 Carga de pandeo reducida, $D=\Delta$	30
Ec. II-23 Fuerza característica.....	30
Ec. II-24 Rigidez de fluencia.....	30
Ec. II-25 Rigidez elástica HDR.....	30
Ec. II-26 Rigidez elástica LRB.....	30
Ec. II-27 Fuerza cortante a un $D=\Delta$	30
Ec. II-28 Rigidez efectiva.....	30
Ec. II-29 Período efectivo del edificio aislado.....	31
Ec. II-30 Área de histeresis.....	31
Ec. II-31 Amortiguamiento.....	31
Ec. II-32 Desplazamiento Sistema de Aislación.....	31

Ec. II-33 Aceleración Sistema de Aislación.....	31
Ec. II-34 Rigidez lateral de sistema FPS.....	33
Ec. II-35 Período en el sistema FPS.	33
Ec. II-36 Diseño, máxima carga vertical	34
Ec. II-37 Diseño, carga vertical promedio	34
Ec. II-38 Diseño, carga mínima	35
Ec. II-39 Aceleración de diseño para $T=1$ seg.....	36
Ec. II-40 Aceleración máxima para $T=1$ seg.	36
Ec. II-41 Factor de zona para sismo MCE.....	36
Ec. II-42 Desplazamiento de diseño D_D	37
Ec. II-43 Desplazamiento máximo D_M	37
Ec. II-44, Desplazamiento total de diseño D_{TD}	37
Ec. II-45, Desplazamiento total máximo D_{TM}	37
Ec. II-46 Ecuación de equilibrio Dinámico.....	40
Ec. II-47 Ecuación de equilibrio dinámico Sist. Aislado	40
Ec. II-48 Ecuación entre suelo y SA.....	41
Ec. II-49 Ecuación entre SA y Superestructura.....	41
Ec. II-50 Frecuencia Estructural	41
Ec. II-51 Factor de amortiguamiento.....	41
Ec. II-52 Forma matricial.....	42
Ec. II-53 Desplazamientos relativos	42
Ec. II-54 Ecuación de movimiento para ambas direcciones.....	42
Ec. II-55 Amortiguamiento Modal	42
Ec. II-56 Participación Modal.....	43
Ec. II-57 Frecuencias naturales de vibración.	43
Ec. II-58 Factores de participación.....	45
Ec. II-59 Porcentaje de masa efectiva.....	45
Ec. II-60 Porcentajes de amortiguamiento.	46
Ec. III-1 Fuerza cortante en la base.....	57
Ec. III-2, Distribucion de fuerza cortante.	57
Ec. III-3, Resistencia requerida U_1	58
Ec. III-4, Resistencia requerida U_2	58
Ec. III-5, Resistencia requerida U_3	58
Ec. III-6, Resistencia requerida U_4	58
Ec. III-7, Resistencia requerida U_5	58

Ec. III-8, Resistencia requerida U_6	58
Ec. III-9, Resistencia requerida U_7	58

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Cajamarca y a la facultad de Ingeniería y a mis maestros que me proporcionaron valores y conocimiento.

A mis asesores Miguel Ángel Mosqueira Moreno y Hermes Roberto Mosqueira Ramírez y a todos los involucrados en esta investigación, quienes con su orientación permitieron el desarrollo de este trabajo.

LISTA DE ABREVIACIONES

- A_b = Área garantizada de goma.
- A_g = Área bruta de goma, esto incluye la cobertura lateral.
- A_h = Área de la curva de histéresis, llamado también EDC o energía disipada por ciclo.
- A_{pl} = Área del núcleo de plomo.
- A_r = Área reducida de goma.
- B = Dimensión total de aislador.
- B_b = Dimensión garantizada de aislador.
- E = Módulo elástico de la goma.
- E_b = Módulo de pandeo.
- E_c = Modulo efectivo de compresión.
- E_∞ = Modulo de compresibilidad.
- f = Factor aplicado a la elongación para la capacidad de carga, $f = 1/\text{Factor de seguridad}$.
- F_m = Fuerza en aislador a un desplazamiento específico.
- g = Aceleración de la gravedad.
- G_y = Modulo de corte de la goma (a deformación por corte γ)
- H_r = Altura libre de pandeo.
- I = Momento de inercia del aislador.
- k = Constante de material (0.65 a 0.85 dependiendo de la dureza).
- K_d = Rigidez de fluencia, para los aisladores LRB es K_r .
- K_{eff} = Rigidez efectiva.
- K_r = Rigidez lateral antes de fluir.
- K_u = Rigidez lateral elástica.
- K_v = Rigidez vertical de aislador.
- K_{vi} = Rigidez vertical de capa i .
- N = Numero de capas goma del aislador.
- p = Perímetro garantizado.
- P = Carga vertical aplicada.
- P_{cr} = Carga de pandeo.
- P_y = Carga máxima vertical.

- Q_d = Fuerza característica.
- S_i = Factor de forma para la capa i .
- t_i = Espesor de la capa de goma.
- t_{sc} = Espesor de la cubierta lateral.
- t_{sh} = Espesor de las capas de acero.
- T_{pl} = Espesor de las placas de soporte.
- T_r = Espesor total de la goma.
- W = Peso sísmico total.
- Δ = Desplazamiento lateral aplicado.
- Δ_m = Desplazamiento máximo aplicado.
- Δ_y = Desplazamiento de fluencia de LRB.
- β = Amortiguamiento viscoso equivalente.
- ϵ_c = Deformación por compresión.
- ϵ_{sc} = Deformación de corte producido por la carga vertical.
- ϵ_{sh} = Deformación de corte producido por la el desplazamiento horizontal.
- ϵ_{sr} = Deformación de corte producido por una rotación.
- ϵ_u = Elongación mínima.
- θ = Rotación aplicada.
- σ_y = Esfuerzo de fluencia del plomo.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue comparar la respuesta sísmica de un edificio hospitalario con una cimentación convencional y con aisladores sísmicos de base. El edificio utilizado como modelo fue el hospital regional de Cajamarca sector "E". Los edificios hospitalarios son considerados esenciales por tanto no pueden presentar daños considerables durante y después de un evento sísmico.

Se realizó en primer lugar un modelo del edificio el cual se analizó en el programa Etabs, a continuación se aisló el mismo y para lograrlo se hicieron modificaciones complementarias al uso de aisladores, las cuales fueron: adición de losa y vigas de aislación por encima de la interfaz de aislación y reducción de rigidez de la estructura con la sustitución o eliminación de muros de corte, para luego diseñar los aisladores bajo las recomendaciones de la norma ASCE 7-10, al cabo se modeló el edificio aislado para su posterior análisis.

Para realizar el análisis y obtener la respuesta sísmica ambos modelos fueron sometidos al espectro de respuesta de la norma E30 y al sismo de Ica para posteriormente medir y comparar por piso el desplazamiento de centro de masa, la aceleración, la fuerza cortante y el momento de volteo de ambas estructuras, además de verificarse que los elementos estructurales soporten los esfuerzos a los que estarán sometidos. Se registraron las siguientes variaciones medidas con respecto al edificio convencional: de 2% a 51% en el desplazamiento, del 60 al 93% en las aceleraciones por piso, del 75 al 93% en la cortante por piso y momento de volteo. Finalmente se concluye que el uso de aisladores sísmicos de base, en este caso LRB, mejora el comportamiento estructural con respecto a uno convencional.

Palabras clave: aislación, interfaz de aislación, respuesta sísmica

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the seismic response of a hospital building with a conventional foundation and seismic isolators base. The building that used as a model was "Hospital Regional de Cajamarca - Sector E". The hospital buildings are considered essential therefore can't have substantial damage during and after a seismic event.

Addition of slab and beam isolation above: a model of the building which is discussed in Etabs program, then it was isolated and to achieve complementary to use isolators modifications were made, which were performed first interface isolation and reducing stiffness of the structure with the substitution or elimination of shear walls, then design the isolators under the recommendations of the ASCE 7-10 standard model, after is isolated for further analysis building.

To perform the analysis and obtain the seismic response both models were subjected to response spectrum of E30 standard and the earthquake in Ica and later measured and compared by floor: displacement of center of mass, acceleration, shear and moment turning both structures also verified that the structural elements bear the stresses to which are subject. The following variations measured over conventional building were recorded: from 2% to 51% in displacement, 60 to 93% in the accelerations per floor, 75 to 93% in shear floor and overturning moment. Finally concluded that the use of base seismic isolators, LRB in this case, improves the structural performance over conventional one.

Keywords: isolation, isolation interface, seismic response.



Capítulo I.

INTRODUCCIÓN

En el mundo acontecen eventos sísmicos, algunos de gran magnitud, especialmente los sucedidos en países que conforman el cinturón de fuego del Pacífico como el Perú; lo que ha despertado el interés del hombre por tener la capacidad de entender y enfrentar los sismos.

Los sismos afectan a las estructuras entre ellas a las consideradas esenciales, como son: los hospitales, centros educativos, estaciones de policía o bomberos, fábricas de precisión, etc., estas estructuras deben resistir y no deben quedar inutilizadas durante e inmediatamente después de ocurrido un evento sísmico.

así es como la ingeniería sísmica emerge a principios del siglo XX como una rama interdisciplinaria de dos áreas: la sismología, que se preocupa del tema desde el punto de vista de las ciencias de la tierra y la ingeniería estructural, que es parte de la ingeniería civil cuyo objetivo es generar construcciones confiables y seguras. Con el fin de mejorar la resistencia.

Áreas de la ingeniería civil que brindaron soluciones para mejorar la resistencia de las estructuras esenciales, que se siguen utilizando hoy en día como son: rigidizar la estructura, que amplificaba las aceleraciones en la estructura y esto comprometía no solo a los elementos estructurales sino también a los contenidos, y por otro lado la flexibilización de la estructura, que tenía como consecuencia derivas de entrepiso altas que sometían a los elementos estructurales a grandes esfuerzos.

Es así como se idearon diversos dispositivos para mitigar esta energía sísmica y que en la literatura técnica se denominan como sistemas de protección pasiva. Estos sistemas han tomado varias formas: disipadores pasivos, aisladores de base, deformación de fluidos viscoelásticos, extrusión de metales, etc.

El sistema pasivo que ha tomado mayor desarrollo es el de aislación en la base, esta se trata de apoyar a la estructura no directamente sobre el terreno sino que sobre aisladores que desacoplen el movimiento del suelo con respecto al de la estructura, reduciendo la respuesta sísmica.



La aislación basal tiene dos principios fundamentales que son: la flexibilización y el aumento de amortiguamiento, logrando reducir las aceleraciones y concentrando el desplazamiento en el sistema de aislación con la contribución de la amortiguación.

El desarrollo de la presente investigación tiene por objetivo comparar el comportamiento estructural de una edificación hospitalaria con y sin aislación sísmica de base; para lograrlo se compararon los siguientes parámetros: el desplazamiento lateral, la aceleración, la fuerza cortante y el momento de volteo.

Para lograrlo, se organizó el presente trabajo de investigación en tres partes que se diferencian claramente la primera: los aspectos metodológicos que va desde el capítulo I donde se desarrolla el problema de investigación al capítulo II que desarrolla el método, la metodología y las técnicas de investigación, en la segunda parte se precisa el marco teórico que se desarrolla del capítulo III al VII, y finalmente la tercera parte que está compuesta por la comprobación y verificación de resultados; posteriormente se tiene los apéndices y la bibliografía.

I.1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

I.1.1 Planteamiento y Formulación del Problema

I.1.1.1 Planteamiento del problema

En los últimos 20 años más de 100 hospitales en Latinoamérica y el Caribe dejaron de funcionar por efectos de los terremotos. La cuarta parte de estos colapsó catastróficamente y en el resto fallaron las líneas vitales o sus componentes funcionales y organizativos. La mitad de los 15 mil hospitales instalados en América Latina y el Caribe están ubicados en zona de elevada amenaza sísmica y en gran parte de éstos, se han tomado medidas de protección contra desastres (Ugarte, y otros 2007).

El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la tierra, por lo tanto está expuesto a este peligro, que trae consigo la pérdida de vidas humanas y pérdidas materiales. Es necesario efectuar estudios que permitan conocer el comportamiento más probable de este fenómeno para poder planificar y mitigar los grandes efectos que genera.



El ingeniero Mateo Casaverde Río¹ comenta: "Perú está ubicado en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo en el llamado círculo de fuego del océano Pacífico que concentra el 85% de la actividad sísmica mundial", ya que se ubica prácticamente sobre una gran falla geológica, la interacción entre la placa sudamericana y la de Nazca, en consecuencia nos encontramos expuestos a una amenaza sísmica entre intermedia y alta.

Se sabe que el daño parcial o colapso de las estructuras durante y después de un sismo es la mayor causa de víctimas, disturbios sociales y pérdidas económicas, pues la amenaza sísmica constituye un riesgo mayor si es acompañada por edificaciones vulnerables (Tafur Chilón 2011).

Riesgo sísmico = Peligrosidad Sísmica ⊗ Vulnerabilidad Ec. 1-1 Riesgo sísmico

Dónde: (a) *riesgo sísmico* es el resultado de la interacción del peligro sobre la vulnerabilidad (INDECI 2011), o también la probabilidad que las consecuencias sociales o económicas excedan valores especificados en un sitio durante un tiempo de exposición determinada; (b) *peligrosidad sísmica* representa la probabilidad de ocurrencia de un movimiento sísmico, de una intensidad determinada dentro de un periodo específico de tiempo y un área dada, y finalmente (c) *vulnerabilidad* representa el grado de daño debido a la ocurrencia de un movimiento sísmico de una intensidad determinada (Aguiar Falconí, y otros 2008).

Hay que tener en claro que los efectos adversos generados por terremotos no son directos del mecanismo del sismo, más bien de las fallas de estructuras construidas por el ser humano, por lo que aunque los sismos son inevitables está en nuestras manos reducir sus consecuencias a límites aceptables mediante el control del medio construido.

Según lo establecido en líneas previas, nuestro país presenta múltiples desafíos ante el problema sísmico, por lo que, toma una relevancia importante la investigación de estructuras resistentes a sismos tanto del punto de vista estructural como funcional, ya que se presta un servicio directo a toda la población del país.

¹ Ex asesor científico de INDECI.



Para mitigar la respuesta de las edificaciones ante un evento sísmico, se emplean técnicas que se basan en la combinación de resistencia, rigidez y ductilidad de la estructura, plasmadas en normas de diseño sismo resistente que brindan mayor importancia a las edificaciones esenciales, que son diseñadas y construidas para resistir sismos severos con la finalidad que su función no se vea interrumpida inmediatamente después de ocurrido el sismo. Son consideradas edificaciones esenciales: edificios destinados a la salud, centros educativos, fábricas industriales, etc. (NTE.030 Diseño Sismo Resistente 2006)

Sin embargo, los métodos antes mencionados, que son ampliamente utilizados en el Perú, generan vitales dificultades estructurales que se traducen en aceleraciones altas de piso, que se incrementan a mayor altura, producto de la rigidez de la estructura, y/o la flexibilidad de la estructura que genera derivas de entrepiso. Esto hace que los elementos estructurales soporten mayores esfuerzos.

Es por ello que la presente investigación, centrará su estudio en averiguar:

I.1.1.2 Formulación del problema

¿De qué manera influye el uso de aisladores sísmicos de base en el análisis sísmico de un modelo de edificio hospitalario con respecto al modelo convencional ante un evento sísmico?

I.1.2 Justificación

La presente investigación encuentra su justificación, en la vulnerabilidad del Perú ante un evento sísmico de gran magnitud, ya que este se encuentra ubicado en una zona altamente riesgosa denominada "cinturón de fuego". Un evento de este tipo requiere garantizar la operatividad de edificaciones esenciales y sobre todo, en hospitales brindar funcionalidad estructural y la protección de sus componentes delicados (equipos quirúrgicos, de rehabilitación, rayos x, tomógrafos, etc.)

Como se estableció previamente, el edificio a analizar es un módulo hospitalario y tiene la categoría A de edificaciones esenciales, y en estas edificaciones, categorizadas como esenciales, no debe interrumpirse la función que debe



cumplir dicha edificación inmediatamente después de ocurrido un evento sísmico, es por ello que surge la necesidad de proteger las edificaciones hospitalarias y a sus ocupantes, empleando y desarrollando mecanismos de alta eficacia.

Sin embargo, a pesar de su importancia en la Universidad Nacional de Cajamarca no se ha investigado detalladamente sobre el uso de aisladores sísmicos, además que en el Perú no se ha extendido su uso a edificios esenciales, más allá de la ciudad de Lima. Por esta razón existe la necesidad de saber más acerca de aisladores sísmicos y sus beneficios estructurales.

I.1.3 Ámbito de Investigación/Delimitación del Problema

I.1.3.1 Ámbito de investigación

El ámbito de investigación del presente trabajo es la ingeniería civil específicamente la ingeniería estructural en el área de ingeniería sísmica.

I.1.3.2 Delimitación del problema

La presente investigación tiene como delimitación temática, a un edificio esencial, específicamente un centro hospitalario, por lo cual se tomó como referencia² los planos estructurales del Hospital Regional de Cajamarca específicamente el sector "E". Del cual se obtendrán los siguientes resultados: de la superestructura en el caso del edificio con base fija o de cimentación convencional y por encima de la interfaz de aislación para el edificio aislado.

Así mismo, tiene una delimitación espacial, la ciudad de Cajamarca, que es la ciudad en la cual se llevó a cabo la investigación. Finalmente tiene como delimitación temporal, la más reciente gran construcción hospitalaria, realizada al momento de iniciar nuestra investigación³.

² Esto debido a que no se trata de un caso de estudio, sino simplemente el edificio será empleado como un modelo.

³ Año 2013.



I.1.4 Tipo de Investigación

I.1.4.1 De acuerdo al fin que persigue la investigación.

Nuestra investigación tiene por finalidad demostrar las ventajas del empleo de aisladores sísmicos de base, en edificaciones hospitalarias; para disminuir enormemente las pérdidas humanas y materiales.

I.1.4.2 De acuerdo al enfoque a utilizarse en la investigación.

La presente tesis utilizará el enfoque cuantitativo, debido a que tiene como características la medición de fenómenos, el uso de experimentación y análisis causa efecto; además, los resultados obtenidos serán expresados a través de datos numéricos.

I.1.4.3 De acuerdo al alcance de la investigación.

El alcance de la investigación es correlacional, puesto que, se miden, evalúan y recolectan datos sobre las variables involucradas y finalmente estos datos se comparan.

I.1.4.4 Diseño de la investigación.

El diseño desarrollado es experimental debido a que tiene un grado de manipulación intencional en las variables (independientes) y medición de variables dependientes.

I.1.5 Objetivos

I.1.5.1 Objetivo general.

Comparar el comportamiento estructural de un edificio hospitalario convencional versus uno similar aislado, a través de ciertos parámetros de respuesta sísmica.

I.1.5.2 Objetivo específico.

Analizar el edificio convencional y verificar sus elementos estructurales.

Diseñar los aisladores sísmicos de base.



Analizar el edificio aislado y verificar sus elementos estructurales.

Medir y comparar los desplazamientos laterales por piso así como aceleraciones, cortantes y momentos de volteo en la estructura convencional y aislada.

I.1.6 Hipótesis de Investigación

I.1.6.1 Hipótesis

El uso de aisladores sísmicos de base en un modelo de edificio hospitalario, mejorará su respuesta sísmica con respecto a un edificio convencional.

I.1.6.2 Variables de la investigación

Tenemos como variable independiente y experimental⁴ a: el uso de aisladores sísmicos de base y como variable dependiente la respuesta sísmica. Como se trata de una hipótesis causal, los resultados de la segunda dependerán de la manipulación de la primera.

⁴ "A la variable independiente se le denomina variable experimental cuando denota una propiedad que puede ser manipulada o administrada en grado significativo por el investigador, de tal suerte que dicha propiedad durante el proceso de investigación puede ser incrementada, reducida o suprimida según lo exija la naturaleza de la hipótesis que se pretenda probar." (Piscoya Hermoza 2007)



I.2 MÉTODO Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

I.2.1 Métodos de Investigación

Se utilizó el método deductivo, empleado por las ciencias naturales, en este caso estudiaremos una parte de las ciencias físicas: la dinámica, aplicado a estructuras.

I.2.1.1 Forma de contrastación de hipótesis

La primera parte consistió en el dibujo del modelo matemático del edificio hospitalario para su posterior análisis y diseño (el diseño se realiza con la intención de verificar que los elementos estructurales soporten los esfuerzos a los que estarán sometidos), en el software Etabs, esto con la ayuda de las normas: Norma de Diseño Sísmico Peruana E30 y la norma ACI 318-2011.

Una segunda parte consistió en la adición de una losa de piso en la base, y vigas en esta, al modelo anterior; esto con la intención de definir las vigas y la losa que se encuentran sobre la interfaz de aislación.

Luego se definió los puntos donde se decidió colocar aisladores, esto coincide con la cimentación de las columnas, además se tomaron datos del peso sísmico en cada uno de estos puntos.

Estos pesos se agruparon, donde la única característica es que sus medidas no tenían una gran variación entre sí. Así se definieron 2 grupos de pesos y 2 tipos de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

Luego se procedió al diseño de estos aisladores, primero se hizo uso del catálogo y se determinó las dimensiones del aislador, después los datos del catálogo y del peso se ingresaron en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel, donde se comprobó su desempeño y se obtuvieron los datos de las propiedades físicas de los aisladores requeridas por Etabs.

Se ingresaron los datos requeridos por Etabs y se definieron los aisladores que se colocaron según la disposición que se ha establecido anteriormente. Se analizó el



modelo y se comenzaron a modificar sus características de rigidez, como la exclusión de muros de corte.

Con la anterior modificación se van a obtener otros pesos que se concentran en los aisladores, esto acarrea que se vuelva a diseñar los aisladores con la ayuda de la hoja de cálculo en Microsoft Excel, para así obtener los nuevos datos requeridos por Etabs.

Con los nuevos datos que se ingresan al programa Etabs, se analiza, diseña y se comprueba.

Finalmente se compara ambas estructuras y se evalúa el grado de mejora en la respuesta sísmica entre el uso de aisladores y sin estos en un modelo de estructura hospitalario.

I.2.1.2 Unidad de análisis

Las unidades de análisis son: (a) el desplazamiento lateral, (b) la aceleración, (c) la fuerza cortante y finalmente (d) el momento de volteo, que forman parte de la respuesta sísmica y serán cuantificadas.

I.2.2 Técnicas de Investigación

I.2.2.1 Programas de cómputo

El uso de hojas de cálculo como el programa Microsoft Excel será utilizado para diseñar el aislador, comprobar su diseño y obtener la información necesaria para ingresar al siguiente software. Asimismo se trabajó con el programa Etabs versión 2013, en el cual se analizan los datos obtenidos en Excel, las hojas de cálculo y el modelo, para obtener las respuestas sísmicas de las variables empleadas.

I.2.2.2 Catálogos

Emplearemos también catálogos de aisladores⁵ comerciales de empresas especializadas en su fabricación, que servirán para obtener datos como:

⁵ La empresa CDV, especializada en la comercialización y manejo de aisladores sísmicos en Perú. CDV importa los aisladores de la empresa DIS (Dynamic Isolation Systems), por lo que se utilizaron estos catálogos.



dimensiones de sus componentes, máximo desplazamiento, capacidad de carga, etc.

I.2.2.3 Fichaje de información.

Utilizada para organizar la información de interés durante la investigación, facilitando el procesamiento de la misma.

I.2.3 Limitaciones

Una de las limitaciones más importantes, es que en el Perú la información acerca de estos dispositivos de aislación sísmica, es escasa, no contando con una norma de aislación sísmica. Estas restricciones se superaron mediante la consulta de investigaciones y normas extranjeras.



Capítulo II.

MARCO TEÓRICO.

II.1 Estado de la Cuestión

II.1.1 Antecedentes Teóricos de la Investigación

Convencionalmente, el diseño sísmico de edificaciones se basa en el concepto de aumentar la capacidad de resistencia de las estructuras contra terremotos empleando, por ejemplo, el uso de muros de corte, pórticos arriostrados, pórticos resistentes a momentos. Sin embargo estos métodos tradicionales a menudo dan como resultado grandes aceleraciones en los últimos pisos de una edificación rígida o amplias derivas de entrepiso en una estructura flexible (Yeong-Bin, Kuo-Chun y Jong-Dar 2002). Debido a esto, los elementos estructurales y componentes no estructurales pueden sufrir un daño significativo durante un terremoto, incluso si la estructura en sí sigue básicamente intacta. Esto no es tolerable para edificios cuyos contenidos son más costosos y valiosos. Fábricas de producción de alta precisión son un ejemplo de los edificios que contienen equipos muy costosos y sensibles. Adicionalmente, hospitales, estaciones de policía y bomberos, y los centros de telecomunicaciones son ejemplos de instalaciones que contengan equipo valioso y debe seguir funcionando inmediatamente después de un terremoto.

Un sismo principalmente genera movimientos horizontales del suelo, a través de ondas que se propagan por éste, este tipo de movimiento son la principal causa que se produzca daños en las estructuras. Estas ondas tienen sus propias frecuencias y periodos que excitan a la estructura provocando que se manifieste las frecuencias y periodos propios de la estructura y así generándose aceleraciones y deformaciones que afectan directamente a la estructura.

La filosofía del diseño sismo resistente (NTE.030 Diseño Sismo Resistente 2006) consiste en:

- a) Evitar pérdidas de vidas
- b) Asegurar la continuidad de los servicios básicos
- c) Minimizar los daños a la propiedad



Uno de los objetivos fundamentales de un óptimo diseño sísmico es minimizar el desplazamiento entre pisos y las aceleraciones de los pisos presentes en la estructura. Los efectos de los desplazamientos causan daños a los componentes no estructurales, a equipos y a conexiones de los diferentes servicios. Se podría minimizar los desplazamientos entre pisos rigidizando la estructura, pero esto además de ser una solución cara, conduce a la amplificación de los movimiento de la base, lo cual se traduce en altas aceleraciones en los pisos generando posibles daños al equipamiento interno, a la vez para disminuir estas aceleraciones se podría hacer utilizando un sistema más flexible pero esto nos lleva al problema inicial de tener considerables desplazamientos entre pisos.

A nivel del Perú se tiene:

En la región Cajamarca se ha tenido acceso a la tesis de titulación realizada en la Universidad Nacional de Cajamarca, la cual concluye: el uso de aisladores elastoméricos brinda una mejor respuesta sísmica en un edificio (Tafur Chilón 2011).

En la región Lima se tiene la investigación realizada en la Universidad Católica, la cual concluye en: el uso de aisladores sísmicos mejora la respuesta sísmica y esto reduce las secciones de elementos estructurales (Korswagen Eguren, Arias Ricse y Huaranga Huamaní 2012).

Con respecto al modelo utilizado, el sector "E" del hospital regional de Cajamarca, tenemos la tesis: "Evaluación sísmica del sector "E" del hospital regional de Cajamarca" la cual concluye que el sector "E" del hospital regional de Cajamarca, de acuerdo al análisis de modos de vibración y derivas máximas tendrá un comportamiento adecuado ante la ocurrencia de un sismo severo. (Solano Camacho 2013).

Fundamento Teórico

A continuación se presenta:



II.2 FUNDAMENTO Y SISTEMAS DE AISLACIÓN BASAL

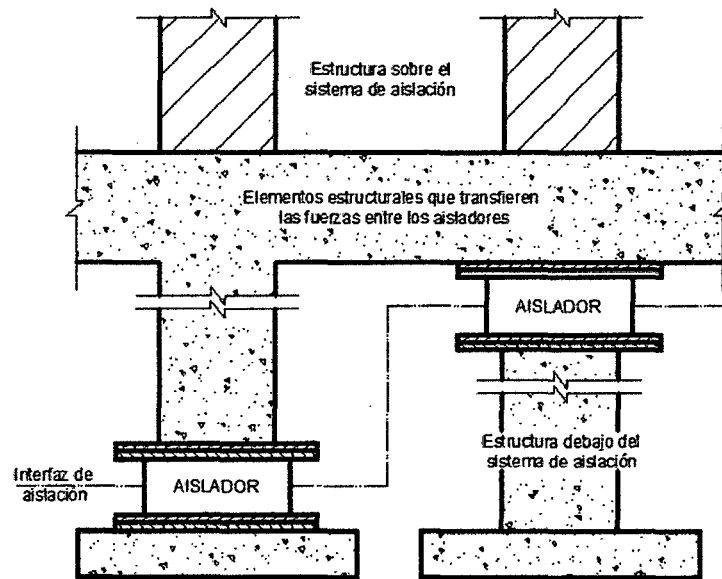
II.2.1 Tipos de Aislación Basal

La aislación sísmica consiste en desacoplar horizontalmente a la estructura del suelo. El sistema de aislación usado y los dispositivos de aislación para lograr dicho objetivo pueden variar de acuerdo con las necesidades o preferencias del diseñador. Los dispositivos de aislación, también llamados aisladores, son elementos estructurales muy flexibles en la dirección horizontal y sumamente rígidos en la vertical que permiten grandes deformaciones horizontales ante las sollicitaciones sísmicas. El sistema de aislación es el conjunto de elementos estructurales que incluye a todos los aisladores, sus conexiones y a los elementos estructurales que transmiten fuerza entre el sistema de aislación y la superestructura y subestructura. A la estructura que se encuentra encima del sistema de aislación se le denomina superestructura y a la que se encuentra debajo subestructura. La interface de aislación es el límite imaginario entre la superestructura y la subestructura, muestra las partes del sistema de aislación.

Entre los principales tipos de aisladores tenemos a los aisladores elastoméricos convencional entre los cuales tenemos al aislador elastomérico de caucho de bajo amortiguamiento (LRD), los aisladores de alto amortiguamiento (HDR); los aisladores con núcleo de plomo (LRB) y a los aisladores friccionantes el sistema de péndulo de fricción invertido y de doble y triple curvatura.



Ilustración II-1, Terminología del sistema de aislación.



Fuente: Norma técnica Federal Emergency Management Agency (FEMA)
Elaboración: FEMA.

II.2.1.1 Aisladores elastoméricos.

Los aisladores elastoméricos han ido evolucionando desde su creación para poder cumplir de mejor manera con los requerimientos deseados, llegando a la configuración actual la cual entrega la seguridad de que tendrá un buen desempeño. Estos aisladores son apoyos elastoméricos laminados, intercalando un conjunto de láminas de goma con delgadas placas de acero unidas por un proceso de vulcanización; las láminas alternadas de goma pueden deformarse en un plano horizontal entregando la flexibilidad que permite al edificio moverse lateralmente bajo el movimiento producido por un sismo. Estos apoyos poseen una alta rigidez vertical inhibiendo la expansión lateral de la goma que resulta de la presión vertical de la estructura. Los aisladores elastoméricos laminados cuentan en sus extremos superior e inferior con dos placas de acero con las cuales se conecta a la superestructura en su parte superior y a la fundación en su parte inferior.

En la mayoría de los diseños de aisladores elastoméricos se utiliza la geometría de un cilindro, ya que con esto las propiedades del aislador no se ven afectadas por la dirección de la carga horizontal aplicada, repartiéndose los esfuerzos uniformemente.



Dentro de los apoyos elastoméricos laminados podemos distinguir entre dos tipos principalmente: aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDR) y los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR).

II.2.1.2 Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (LDR)

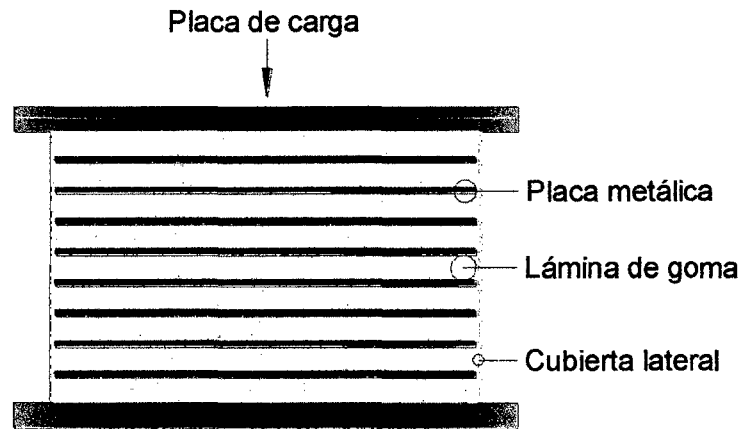
Consisten en aisladores que se utiliza goma natural con un punto bajo de amortiguación, poseen las mismas características mencionadas en el punto anterior con la salvedad que se utiliza una goma de baja capacidad de amortiguación, las láminas de acero impiden las expansiones laterales de la goma y proveen de alta rigidez vertical, pero no tienen efecto sobre la rigidez horizontal que es controlada por el bajo modulo al esfuerzo de corte que posee el elastómero.

El proceso de fabricación de los LDR consiste en intercalar capas de acero y caucho que se colocan en un molde y se les aplica presión a una temperatura de 140°C por aproximadamente seis horas. Durante ese tiempo se produce la reacción del epóxico colocado entre las capas y el caucho se vulcaniza y adquiere su propiedad elástica. La adhesión entre el acero y el caucho debe ser tan resistente que antes que falle el pegamento debería fallar la goma. Al intercalar el caucho con el acero la capacidad para resistir cargas de gravedad aumenta y le da estabilidad a soportes laterales altos ante cargas laterales. Las placas de acero que se colocan en la zona superior e inferior sirven para confinar el núcleo y evitar la compresión del caucho ante cargas de gravedad.

En la Ilustración II-2, se muestran los componentes del LDR.



Ilustración II-2, Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (LDR).



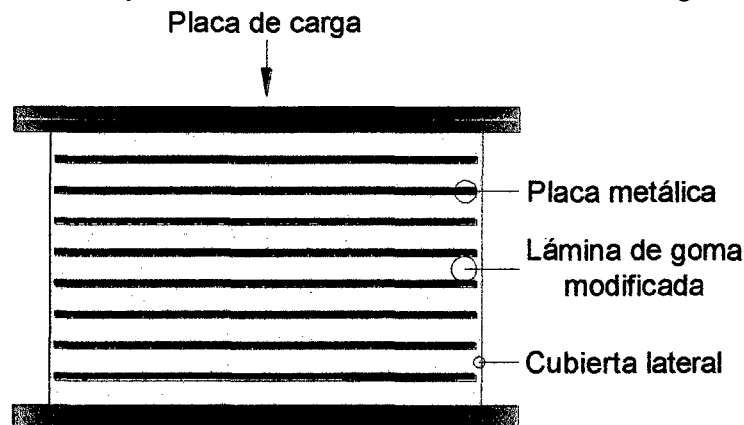
Fuente: Internet.
Elaboración: El Autor.

El amortiguamiento de este tipo de aisladores está entre el 5 y 10%, lo cual obliga muchas veces a usar sistemas de amortiguadores adicionales. La fuerza cortante y la deformación lateral tienen una relación lineal. Las principales ventajas de usar este tipo de aisladores es que son fáciles de modelar y fabricar.

II.2.1.3 Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDR)

El aislador elastomérico de alto amortiguamiento tiene la misma disposición mencionada en el punto anterior de ir intercalando láminas de goma con delgadas capas de acero, pero en este caso se utiliza una goma que además de entregar la flexibilidad y rigidez requerida, se diferencia de los elastómeros comunes por que posee como propiedad natural un alto amortiguamiento, logrado a través de agregar sustancias químicas al compuesto.

Ilustración II-3, Componentes del aislador elastomérico de alto amortiguamiento HDR.



Fuente: Internet
Elaboración: El autor



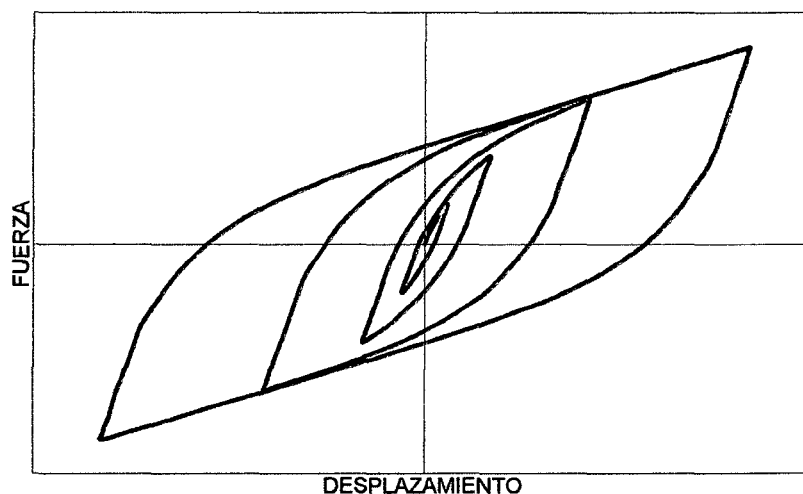
Estos dispositivos han sido usados e instalados en una variedad de edificios en Japón, los Estados Unidos, e Italia.

El amortiguamiento de éste tipo de aisladores varía entre el 10 y 20% para deformaciones angulares menores $\gamma = 2$. Para producir ciclos estables pasa por un proceso llamado scragging en el cual se le somete a varios ciclos de deformación y se logran ciclos de fuerza deformación más estables para deformaciones menores⁶. La relación entre la fuerza cortante y la deformación es lineal como se observa en la Ilustración II-4; sin embargo, forma un bucle que encierra un área menor a los LRB.

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

Propiedades de los aisladores de alto amortiguamiento HDR

Ilustración II-4, Gráfico fuerza de corte vs. Deformación lateral (HDR)



Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*
Elaboración: El autor

Los aisladores de alto amortiguamiento HDR, son hechos con un elastómero compuesto especial que provee de un amortiguamiento equivalente en el rango de 10% a 20%

Módulo de corte

⁶ Estudios recientes muestran que las propiedades iniciales del compuesto sin scragging se recuperan parcialmente con el tiempo (Instituto Nacional de Normalización 2003).



Tabla II.1, Propiedades de aislador de alto amortiguamiento HDR.

Deformación por corte γ %	Módulo de corte G MPa	Amortiguamiento equivalente β %
1	1.82	12.72
10	1.21	12.72
25	0.79	11.28
50	0.57	10.00
75	0.48	8.96
100	0.43	8.48
125	0.40	8.56
150	0.38	8.88
175	0.37	9.36
200	0.35	9.36

Fuente: Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers

Elaboración: El autor

El módulo de corte de los aisladores HDR está en función de la deformación por corte. Para deformaciones bajas el módulo de corte es de 1.2 MPa o más, mientras va en aumento la deformación el módulo de corte se va reduciendo, en este caso hasta alcanzar un valor mínimo de 0.4 MPa para una deformación de 150 a 200%, a partir de este punto mientras la deformación por corte va en aumento, el módulo de corte lo hace también, hasta llegar a 0.6 MPa a 340% de deformación.

Un módulo de corte alto al inicio es una característica de los aisladores HDR, esto les proporciona resistencia bajo cargas de servicio como viento sin estar sujetos a tanto movimiento.

Amortiguamiento:

Aunque la mayor parte de la amortiguación proporcionada por los aisladores HDR es de naturaleza histerética, también tiene una componente viscosa dependiente de la frecuencia.

Ciclos y cambio de propiedades

Las propiedades de los aisladores HDR cambian en los primeros ciclos de carga y descarga por un proceso conocido como "scragging". Cuando un aislador HDR es



sometido a varios ciclos con altos desplazamientos, su estructura molecular cambia. Esto da lugar a curvas de histéresis más estables a deformaciones bajas.

Edad y cambio de propiedades

Dos valores principalmente se controlan sus variaciones con el paso de los años, estos son la rigidez efectiva y el amortiguamiento, según los estudios realizados a aisladores HDR, se tiene que la rigidez efectiva aumenta en un 10% con el paso de los años, y el amortiguamiento no se modifica por el scragging.

Diseño por esfuerzo de compresión

El diseño depende de calcular la capacidad de carga vertical del aislador basado en deformaciones límite, incorporadas en códigos como AASHTO o BS5400. El esfuerzo de compresión permitido depende de:

- La elongación última de la goma
- El factor de seguridad aplicado a la última elongación
- El tamaño en planta del aislador
- El factor de forma del aislador
- La deformación de corte aplicada
- Diseño bajo esfuerzo de tensión

Aisladores elastoméricos como LRB y HDR se diseñaban anteriormente considerando que la tensión o cargas verticales negativas, no sucedían. Esto porque hay muy poca información acerca del diseño de aisladores bajo este tipo de carga. Diseñados bajo altos controles de calidad, los aisladores elastoméricos pueden resistir una gran tensión si fallar, aisladores sin núcleo de plomo se ensayaron a una deformación de tensión de 150% a falla. La rigidez de tensión es aproximadamente elástica a un esfuerzo de 4 MPa y una deformación de aproximadamente el 15%. La rigidez se va reduciendo mientras la cavitación⁷ del elastómero ocurre.

⁷ Expansión sin impedimentos inestable de un vacío microscópico en un elastómero sólido bajo la acción de esfuerzos de tracción (Skinner, Kelly and Robinson, Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers 2011)



Según estudios realizados por William H. Robinson, el procedimiento de diseño de un aislador elastomérico, permite un esfuerzo de tensión de 3 veces el módulo de corte de la goma (3G). Este dato fue corroborado incluso para esfuerzos de corte y tensión combinados. (Skinner, Robinson and McVerry, An Introduction to Seismic Isolation 1993)

Deformación de corte máxima

La máxima deformación por corte se basa en las fórmulas de deformación límite y puede acercarse a 300% para cargas MCE.

Resistencia de la unión

La resistencia de la unión es definida como la adhesión de las capas de goma con las capas de acero. Las especificaciones requieren que la fuerza adhesiva entre la goma y las placas de acero sea de por lo menos 40 lb/inch, para otras como la ASTM D429 la falla debe ser al 100% del desgarro de la goma.

Deflexión vertical

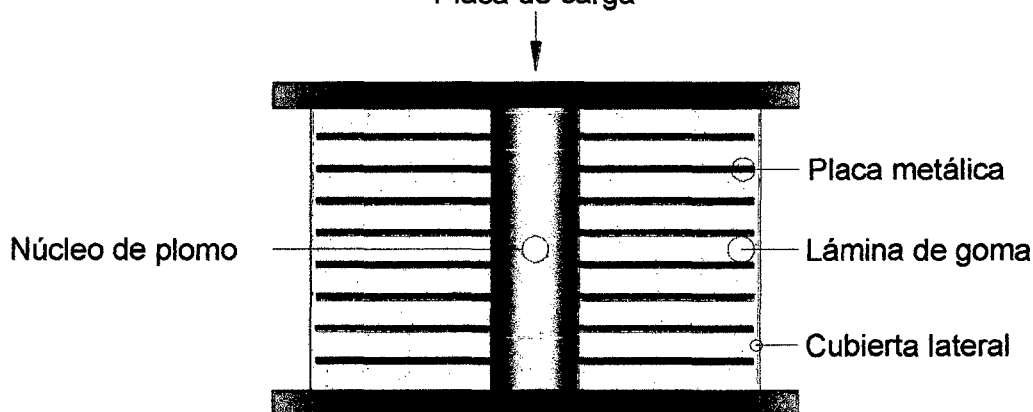
Los desplazamientos verticales se calculan primeramente por las cargas de gravedad a las que están expuestas. Para aisladores con un factor de forma alto los efectos del módulo de pandeo son importantes y son incluidos en el cálculo de la rigidez vertical.

II.2.1.4 Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo son conexiones multicapas de goma y acero intercaladas parecidas al LDR, pero estos tienen uno o más orificios circulares en donde se introducen los tapones de plomo, para entregar mayor amortiguación al sistema de aislación. Por lo general el sistema cuenta con un solo núcleo de plomo inserto en el centro del aislador.

El núcleo de plomo se coloca para producir numerosos ciclos histeréticos estables ya que este fluye (a una tensión de 10 MPa) y recristaliza a temperatura ambiente; esto hace que tenga una buena resistencia a la fatiga (Skinner, Robinson and McVerry, An Introduction to Seismic Isolation 1993).

Ilustración II-5, Componentes de un aislador con núcleo de plomo (LRB)
Placa de carga



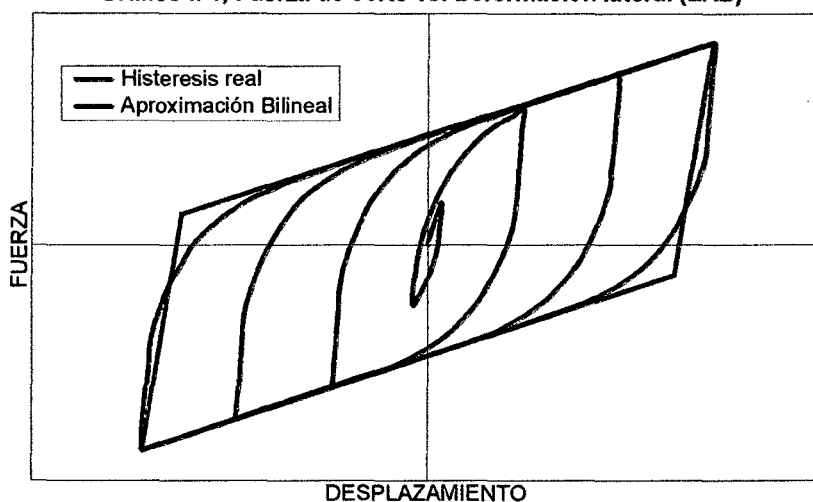
Fuente: Internet
Elaboración: El autor

Entre las ventajas del LRB podemos encontrar que el amortiguamiento aumenta con respecto al LRD y varía entre el 15 y 35%. Además produce de forma natural un nivel de rigidez inicial importante para las cargas de servicio o de viento.

Propiedades de los aisladores con núcleo de plomo

LRB bajo desplazamientos laterales produce una curva de histéresis la cual es una combinación de la relación fuerza desplazamiento elástico lineal de la goma del aislador y el comportamiento elasto-plástico del núcleo de plomo.

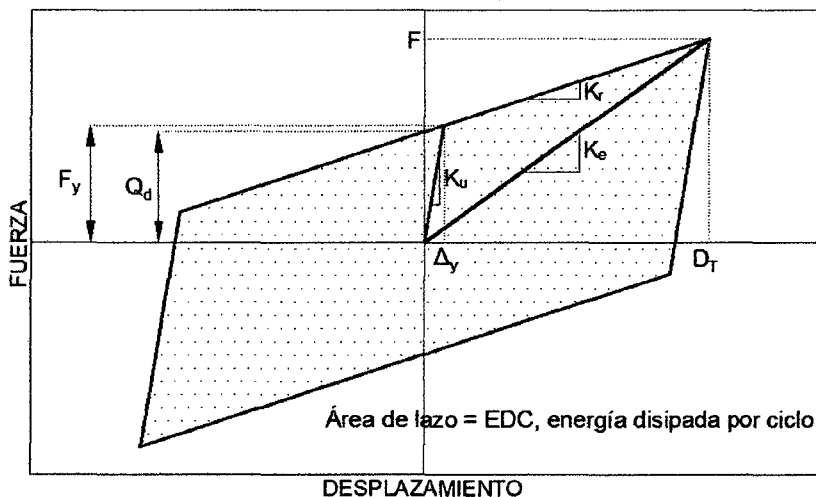
Gráfico II-1, Fuerza de corte vs. Deformación lateral (LRB)



Fuente: Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers
Elaboración: El autor



Gráfico II-2, Modelo de Takeda de aproximación bilineal.



Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*
Elaboración: El autor

Módulo de corte

Aisladores elastoméricos y con núcleo de plomo, usualmente se manufacturan usando goma con módulo de corte, al 100% de deformación, de 0.40 a 1.20 MPa.

Usualmente LRB, sólo tiene una pequeña dependencia de la deformación aplicada, no siendo así los HDR (aisladores de alto amortiguamiento).

Amortiguación de goma

Es definido como el ángulo de fase entre el esfuerzo y la deformación y se utiliza en la tecnología de la goma para definir el factor de pérdida, que es definida como la razón el módulo de perdida y el módulo de almacenamiento.

Ciclos y cambio de propiedades

Para LRB, la rigidez efectiva y el amortiguamiento, están en función de la carga vertical y el número de ciclos. Hay un mayor efecto en estas cantidades durante los primeros ciclos comparado con los aisladores elastoméricos sin núcleo de plomo.

Cargando lentamente hay una pequeña disminución del área de lazo, y rigidez efectiva con el aumento de los ciclos, para cargas rápidas, los valores para los primeros ciclos son altos pero decrecen rápidamente. La máxima reducción del



área de lazo sería acerca de 1% por cada ciclo en los primeros 10 ciclos, luego de esto se estabiliza.

Edad y cambio de propiedades

Dos valores principalmente se controlan sus variaciones con el paso de los años, estos son la rigidez efectiva y el amortiguamiento, según los estudios realizados a aisladores LRB, se tiene que la rigidez efectiva aumenta en un 10% con el paso de los años, y el amortiguamiento no se modifica debido a que este depende mucho más del núcleo de plomo.

Diseño bajo esfuerzo de compresión

El diseño depende de calcular la capacidad de carga vertical del aislador basado en deformaciones límite, incorporadas en códigos como AASHTO o BS5400. El esfuerzo de compresión permitido depende de:

- La elongación última de la goma
- El factor de seguridad aplicado a la última elongación
- El tamaño en planta del aislador
- El factor de forma del aislador
- La deformación de corte aplicada
- Diseño bajo esfuerzo de tensión

Aisladores elastoméricos como LRB y HDR se diseñaban anteriormente considerando que la tensión o cargas verticales negativas, no sucedían. Esto porque hay muy poca información acerca del diseño de aisladores bajo este tipo de carga.

Diseñados bajo altos controles de calidad, los aisladores elastoméricos pueden resistir una gran tensión si fallan, aisladores sin núcleo de plomo se ensayaron a una deformación de tensión de 150% a falla. La rigidez de tensión es aproximadamente elástica a un esfuerzo de 4 MPa y una deformación de aproximadamente el 15%. La rigidez se va reduciendo mientras la cavitación del elastómero ocurre (es la expansión sin impedimentos inestable de un vacío microscópica en un elastómero sólido bajo la acción de esfuerzos de tracción).



Según estudios realizados por William H. Robinson, el procedimiento de diseño de un aislador elastomérico, permite un esfuerzo de tensión de 3 veces el módulo de corte de la goma (3G). Este dato fue corroborado incluso para esfuerzos de corte y tensión combinados. (Skinner, Robinson and McVerry, An Introduction to Seismic Isolation 1993)

Deformación máxima de corte.

Como se pudo ver anteriormente, la deformación por corte máxima que se puede aplicar depende de la deformación vertical aplicada, y límites empíricos para la deformación por corte se aplican sobre la base de la evidencia experimental. Generalmente la deformación por esfuerzo limitante se toma como 150% para cargas DBE y 250% para cargas MCE, a menos que las fórmulas de diseño proporcionen un límite inferior.

Resistencia de la unión

La resistencia de la unión es definida como la adhesión de las capas de goma con las capas de acero. Las especificaciones requieren que la fuerza adhesiva entre la goma y las placas de acero sea de por lo menos 40 lb/inch, para otras como la ASTM D429 la falla debe ser al 100% del desgarro de la goma.

Deflexión vertical

Los desplazamientos verticales se calculan primeramente por las cargas de gravedad a las que están expuestas. Para aisladores con un factor de forma alto los efectos del módulo de pandeo son importantes y son incluidos en el cálculo de la rigidez vertical.

Diseño de aislador elastomérico

Para el diseño de aislador elastomérico se debe tener en cuenta que el periodo y el amortiguamiento dependen del desplazamiento (Skinner, Kelly and Robinson, Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers 2011). Además de:

- Previamente se ha definido las ubicaciones de los aisladores en la estructura.



- Para el diseño de los aisladores se tendrá en cuenta lo siguiente:
- El periodo y el amortiguamiento equivalente dependen del desplazamiento.
- El proceso de diseño es iterativo.
- Las dimensiones mínimas dependen también del desplazamiento.
- El proceso iterativo involucra el tamaño y las propiedades del aislador, manteniendo los factores de seguridad revisados en el acápite de diseño.
- El número de aisladores con núcleo de plomo de diferentes tamaños es indiferente, es un proceso de ensayo y error, hasta conseguir un buen desempeño sísmico.

El proceso iterativo se puede automatizar, como por ejemplo con el uso de herramientas de Microsoft como Excel, donde se puede usar la opción buscar objetivo, o utilizar macros o simplemente buscar la convergencia manualmente.

Diseño de aislador elastomérico.

Para el diseño de aislador elastomérico se debe tener en cuenta que el periodo y el amortiguamiento dependen del desplazamiento (Skinner, Kelly and Robinson, Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers 2011). Además de:

- Previamente se ha definido las ubicaciones de los aisladores en la estructura.
- Para el diseño de los aisladores se tendrá en cuenta lo siguiente:
- El periodo y el amortiguamiento equivalente dependen del desplazamiento.
- El proceso de diseño es iterativo.
- Las dimensiones mínimas dependen también del desplazamiento.
- El proceso iterativo involucra el tamaño y las propiedades del aislador, manteniendo los factores de seguridad revisados en el acápite de diseño.
- El número de aisladores con núcleo de plomo de diferentes tamaños es indiferente, es un proceso de ensayo y error, hasta conseguir un buen desempeño sísmico.
- El proceso iterativo se puede automatizar, como por ejemplo con el uso de herramientas de Microsoft como Excel, donde se puede usar la opción buscar objetivo, o utilizar macros o simplemente buscar la convergencia manualmente.



Rango de propiedades de goma

Los componentes de goma usualmente se encuentran en un rango de dureza de 30 a 75, estas propiedades se muestran como sigue:

Tabla II.2, Compuestos del caucho natural.

Dureza IRHD±2	Módulo de Young E (MPa)	Módulo de corte G (MPa)	Constante de material k	Elongación a falla %
30	0.92	0.30	0.93	-
35	1.18	0.37	0.89	-
37	1.35	0.40	0.87	650%
40	1.50	0.45	0.85	600%
45	1.80	0.54	0.80	600%
50	2.20	0.64	0.73	500%
55	3.25	0.81	0.63	500%
60	4.45	1.06	0.57	400%
65	5.85	1.37	0.54	-
70	7.35	1.73	0.53	-
75	9.40	2.22	0.52	-

Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*

Elaboración: El autor

Esta tabla muestra la elongación última de la goma.

Rigidez vertical y capacidad de carga

El factor de forma domina la rigidez vertical y la capacidad de carga, el factor de forma se define como:

$$S_i = \frac{B}{4t_i}$$

Ec. II-1 Factor de Forma

$$S_i = \frac{A_b - A_{pl}}{\pi B_b t_i}$$

Ec. II-2 Factor de forma LRB

La rigidez vertical de una capa interna es:

$$K_{vi} = \frac{E_c A_r}{t_i}$$

Ec. II-3 Rigidez vertical por capa



Donde el módulo de compresión depende del factor de forma y la constante de material:

$$E_c = E(1 + 2kS_i^2)$$

Ec. II-4 Módulo de compresión.

El área reducida es:

$$A_r = A_b \left(1 - \frac{\Delta}{B_b}\right)$$

Ec. II-5 Área reducida, sección cuadrada.

$$A_r = 0.5 \left[B^2 \sin^{-1} \left(\frac{\zeta}{B_b} \right) - \Delta \zeta \right]$$

Ec. II-6 Área reducida, sección circular.

Dónde:

$$\zeta = \sqrt{B_b^2 - \Delta^2}$$

Capacidad de carga de compresión.

La capacidad de carga vertical se calcula a partir de la suma de todas las deformaciones por corte (American Association of State Highway and Transportation Officials 2010), esta debe ser limitada por la elongación última, que la podemos encontrar en la Tabla II.2, Compuestos del caucho natural.

$$\varepsilon_c = \frac{P}{K_{vt} t_i}$$

Ec. II-7 Deformación por compresión.

De esta deformación por compresión podemos obtener la deformación de corte a la compresión:

$$\varepsilon_{sc} = 6S_i \varepsilon_c$$

Ec. II-8 Deformación de corte de compresión.

Si el aislador está sujeto a rotación, entonces:



$$\varepsilon_{sr} = \frac{B_b^2 \theta}{2t_i T_r}$$

Ec. II-9 Deformación de corte de rotación.

La deformación por desplazamiento lateral es:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta}{T_r}$$

Ec. II-10 Deformación de corte por desplazamiento.

Para cargas por gravedad, el límite de deformación es (f=1/3):

$$f\varepsilon_u \geq \varepsilon_{sc}$$

Ec. II-11 Deformación límite, cargas de gravedad.

Y para cargas últimas que incluyen desplazamientos por sismo (f=0.75):

$$f\varepsilon_u = \varepsilon_{sc} + \varepsilon_{sr} + \varepsilon_{sh}$$

Ec. II-12 Deformación límite, cargas de sismo

Combinando estas ecuaciones se tiene que la carga vertical máxima a un determinado desplazamiento es:

$$P_y = \frac{K_{vi} t_i (f\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{6S_i}$$

Ec. II-13 Carga máxima a un desplazamiento Δ

Para MCE el diseño es utilizando un factor f=1.

Capacidad de carga de pandeo

Para aisladores con un alto espesor de goma, la carga de pandeo elástica se vuelve crítica, esta se calcula con la fórmula de Haringx

El momento de inercia es calculado como sigue:

$$I = \frac{B_b^4}{12}$$

Ec. II-14 Inercia de aislador, sección cuadrada



$$I = \frac{\pi B_b^4}{64}$$

Ec. II-15 Inercia de aislador, sección circular

La altura total del aislador libre de pandeo es:

$$H_r = Nt_i + (N - 1)t_{sh}$$

Ec. II-16 Altura total de aislador

El módulo de pandeo efectivo es definido por el módulo de elasticidad y el factor de forma de las capas de goma.

$$E_b = E(1 + 0.742S_i^2)$$

Ec. II-17 Módulo de pandeo efectivo

Las constantes T, R y Q se calculan:

$$T = E_b I \frac{H_r}{T_r}$$

Ec. II-18 Constante de pandeo, T

$$R = K_r H_r$$

Ec. II-19 Constante de pandeo, R

$$Q = \frac{\pi}{H_r}$$

Ec. II-20 Constante de pandeo, Q

Luego la carga de pandeo a cero desplazamientos es:

$$P_{cr}^0 = \frac{R}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4TQ^2}{R}} - 1 \right]$$

Ec. II-21 Carga de pandeo, a D=0

Para un desplazamiento aplicado, la carga crítica de pandeo a acero desplazamiento es reducida de acuerdo al área reducida.



$$P_{cr}^{\gamma} = P_{cr}^0 \frac{A_r}{A_g}$$

Ec. II-22 Carga de pandeo reducida, $D=\Delta$

Rigidez lateral y parámetros de histéresis de aislador.

LRB y aisladores elastoméricos.

$$Q_d = \sigma_y A_{pl}$$

Ec. II-23 Fuerza característica.

El esfuerzo de fluencia teórico del plomo es 10.5 MPa, pero este se asume de 7 a 8.5 MPa (Kelly 2001).

$$K_r = \frac{G_r A_r}{T_r}$$

Ec. II-24 Rigidez de fluencia.

La rigidez elástica o descargada es definida como:

$$K_u = K_r$$

Ec. II-25 Rigidez elástica HDR

$$K_u = 25K_r$$

Ec. II-26 Rigidez elástica LRB

Los últimos ensayos muestran una mejor aproximación de rigidez elástica mediante el uso de la fórmula para LRB.

La fuerza cortante a un desplazamiento específico es:

$$F_m = Q_d + K_r \Delta$$

Ec. II-27 Fuerza cortante a un $D=\Delta$

De aquí se puede calcular la rigidez efectiva

$$K_{eff} = \frac{F_m}{\Delta}$$

Ec. II-28 Rigidez efectiva.



La suma de todos los aisladores, nos arroja el periodo efectivo:

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \sum K_{eff}}}$$

Ec. II-29 Período efectivo del edificio aislado

La respuesta sísmica está en función del periodo y el amortiguamiento.

$$A_h = 4Q_d(\Delta_m - \Delta_y)$$

Ec. II-30 Área de histéresis

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{A_h}{K_{eff} \Delta^2} \right)$$

Ec. II-31 Amortiguamiento.

El desplazamiento del aislador se puede calcular como:

$$\Delta_m = \frac{S_a T_e^2}{4\pi^2}$$

Ec. II-32 Desplazamiento Sistema de Aislación

$$S_a = \frac{C_v}{B T_e}$$

Ec. II-33 Aceleración Sistema de Aislación

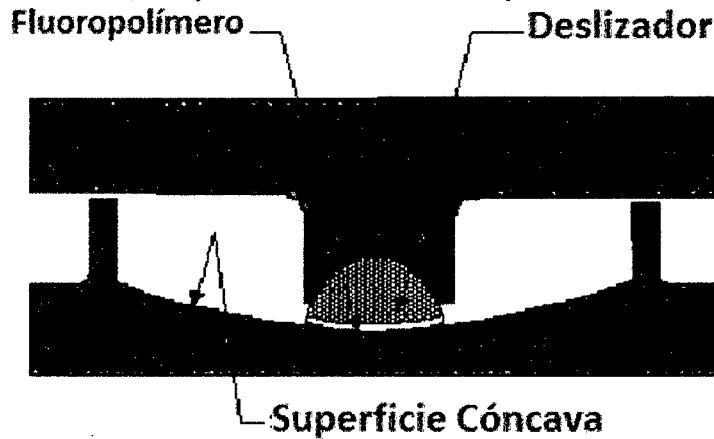
II.2.1.5 Aislador de péndulo friccional

El sistema de péndulo friccional (FPS) es un dispositivo que consigue el efecto de aislación a través de un mecanismo deslizante unido a un efecto pendular. El FPS consiste en un deslizador articulado (Slider) que se mueve sobre una superficie de acero inoxidable, que tiene la característica de ser esférica cóncava, ante un movimiento sísmico se producirá un desplazamiento del "slider" a lo largo de esta superficie disipando energía por fricción, y a la vez como el desplazamiento se produce sobre una superficie curva hace que la misma carga vertical transmitida por el "slider" genere una componente tangencial que es la responsable de centrar el sistema.



El deslizador de acero está recubierto con un fluoropolímero de alta resistencia lo que le permite trabajar con presiones cercanas a 500 kg/cm².

Ilustración II-6, Componentes de un aislador de péndulo friccional (FPS)



Fuente: Internet
Elaboración: El autor

En la Ilustración II-7, Mecanismo de FPS., se muestra el mecanismo de funcionamiento del FPS. Se muestra que para iniciar el movimiento se necesita una fuerza del valor de F.

Por equilibrio se obtiene:

$$F = N \times \sin \theta$$

$$W = N \times \cos \theta$$

Sustituyendo la segunda ecuación en la primera se obtiene que:

$$F = W \tan \theta$$

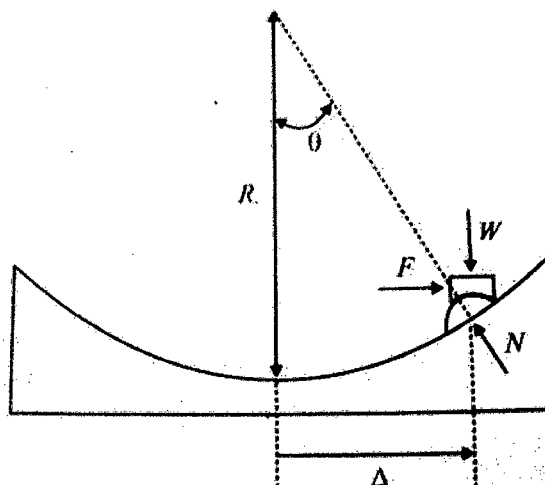
De la geometría se obtiene que

$$\tan \theta = \frac{\Delta}{R}$$

Reemplazando lo último en F se tiene:

$$F = \frac{W\Delta}{R}$$

Ilustración II-7, Mecanismo de FPS.



Fuente: Internet
Elaboración: El autor

Rigidez Lateral

En el sistema FPS la rigidez lateral se puede igualar a:

$$k = \frac{F}{\Delta} = \frac{W}{R}$$

Ec. II-34 Rigidez lateral de sistema FPS.

Periodo natural de la estructura aislada con el sistema de péndulo friccional

El periodo natural de una estructura aislada con el sistema FPS depende sólo del radio de curvatura R y no de la masa de la superestructura, lo cual podría considerarse como una ventaja respecto a los aisladores elastoméricos si se tiene edificaciones muy pesadas.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Ec. II-35 Periodo en el sistema FPS.

II.2.2 Norma ASCE/SEI 2010 de Aislación Basal

El Perú no cuenta con una norma de aislación basal, pero existen normas internacionales de aislación basal, ergo el uso de normas internacionales para su diseño. En este acápite se presenta una breve descripción de los métodos y las recomendaciones presentadas por la norma técnica más representativa.



En esta Norma, se tienen algunas consideraciones para el diseño de aisladores, que son:

Factor de Importancia: Todas las partes de la estructura, incluyendo la estructura por encima del sistema de aislamiento, se les asignará una categoría de riesgo. El factor de importancia, I_e , se toma como 1.0 para una estructura sísmicamente aislada, independientemente de su asignación de la categoría de riesgo.

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

Restricciones de desplazamiento: El sistema de aislación no deberá ser configurado para incluir una restricción de desplazamiento. Además se tiene que considerar que la capacidad última del sistema de aislación y los elementos debajo del sistema de aislación deben exceder la demanda de esfuerzo y el desplazamiento del máximo sismo considerado (American Society for Civil Engineers, Structural Engineer Institute 2010).

Estabilidad por carga vertical

Cada aislador del sistema de aislación debe ser diseñado para ser estable bajo carga vertical, y estar sometido a un desplazamiento horizontal igual al desplazamiento total máximo. La máxima carga vertical de diseño se calcula mediante la combinación:

$$1.2CM + CV + S$$

Ec. II-36 Diseño, máxima carga vertical

La carga promedio y la carga máxima sin incluir sismo bajo la cual se diseña el sistema de aislación es la misma que se utilizará para calcular el peso de la edificación según norma E30:

$$P = P_d = CM + 0.5CV$$

Ec. II-37 Diseño, carga vertical promedio



La carga mínima de diseño es:

09CM+S

Ec. II-38 Diseño, carga mínima

Procedimiento de análisis: se describen también dos procedimientos para el análisis:

Procedimiento de la fuerza lateral equivalente:

El procedimiento de la fuerza lateral equivalente está permitido para ser usadas para el diseño de estructuras sísmicamente aisladas siempre que:

1. La estructura se encuentra en un lugar con menos de 0,60 g S1.
2. La estructura se encuentra en un sitio de clase A, B, C, o D que en el caso de la norma peruana sería S1 o S2.
3. La estructura por encima de la interfaz de aislamiento es menor o igual a cuatro pisos o 65 pies (19,8 m) de altura estructural.
4. El período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo, T_M , es menor que o igual a 3,0 s.
5. El período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento de diseño, T_D , es mayor que tres veces el periodo elástico si la estructura fuera de base fija.
6. La estructura por encima del sistema de aislamiento es de configuración regular.
7. El sistema de aislamiento cumple con todos los siguientes criterios:
 - a. La rigidez efectiva del sistema de aislamiento en el diseño de desplazamiento es mayor que un tercio de la rigidez efectiva en el 20 por ciento del desplazamiento de diseño, $K_{eff} > 1/3 K_{eff20\%D_0}$.
 - b. El sistema de aislamiento es capaz de producir una fuerza de recuperación como se especifica anteriormente.



c. El sistema de aislamiento no limita el desplazamiento máximo terremoto considerado D_M a menos que el desplazamiento máximo total D_{TM} .

Procedimiento dinámico:

Procedimiento de espectro de respuesta

Ya que el Perú no cuenta con mapas de aceleración espectral S_1 y SS , se establece el siguiente método de análisis realizado por ingenieros estructurales peruanos (Fernández Dávila 2010), y en tesis relacionadas al tema de aislamiento sísmico (Korswagen Eguren, Arias Ricse y Huaranga Huamaní 2012).

$$S_{D1} = ZUCS$$

Ec. II-39 Aceleración de diseño para $T=1$ seg.

De donde $U = 1$, por lo visto anteriormente.

El factor de amplificación sísmica, C , es igual a 1, ya que no se amplifican las cargas sísmicas bajo un sistema de aislamiento. Esto solo para efectos de diseño, no siendo así para establecer el espectro de diseño.

Los factores Z y S son los establecidos en la norma sismo resistente E.30.

Y para obtener la aceleración máxima a 1 segundo, se utiliza la fórmula establecida en la norma ASCE 7 – 10.

$$S_{M1} = 1.5S_{D1}$$

Ec. II-40 Aceleración máxima para $T=1$ seg.

Así también:

$$Z_{MCE} = 1.5Z_{DBE} = 1.5Z$$

Ec. II-41 Factor de zona para sismo MCE.

Siendo Z el factor de zona según la norma peruana de diseño sismo resistente.

Luego se obtiene el desplazamiento de diseño y el máximo así como sus respectivos desplazamientos totales con las siguientes fórmulas:



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

Ec. II-42 Desplazamiento de diseño D_D .

Semejante para el desplazamiento máximo,

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

Ec. II-43 Desplazamiento máximo D_M .

Los valores tanto del periodo, T como el amortiguamiento, β , son obtenidos a partir del proceso iterativo mencionado en el capítulo anterior. Luego para obtener el valor del coeficiente de amortiguamiento B , se recurre a la siguiente tabla, donde para valores no mencionados se puede interpolar linealmente:

Tabla II.3, Coeficiente de amortiguamiento B .

β_D ó β_M	$\leq 2\%$	5%	10%	20%	30%	40%	$\geq 50\%$
B_D ó B_M	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

Fuente: ASCE 7 - 10.

Elaboración: ASCE 7 - 10.

Para los desplazamientos totales, de diseño y máximo:

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

Ec. II-44, Desplazamiento total de diseño D_{TD} .

Y desplazamiento total máximo:

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

Ec. II-45, Desplazamiento total máximo D_{TM} .

Donde:

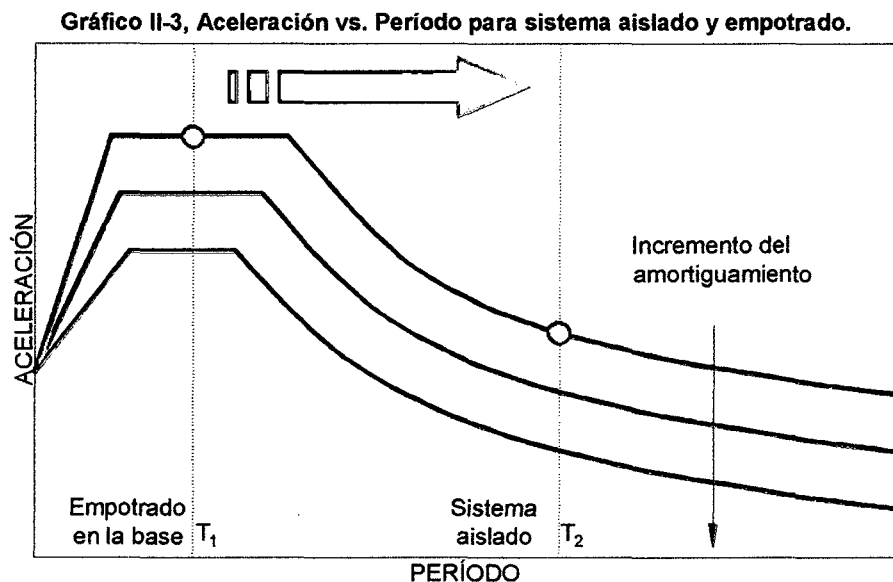
- y : es la distancia hacia el aislador más alejado, se considera la mitad de la mayor distancia en planta del sistema de aislación.
- e : es la excentricidad del sistema de aislación, se considera un 5% de la longitud más grande.
- b : ancho del sistema de aislación.
- d : largo del sistema de aislación.



Cabe mencionar también que esta norma es la mencionada para el diseño de aisladores sísmicos de base (Proyecto de Norma Técnica Sismo Resistente 2014).

II.2.3 Comportamiento del Sistema Aislado

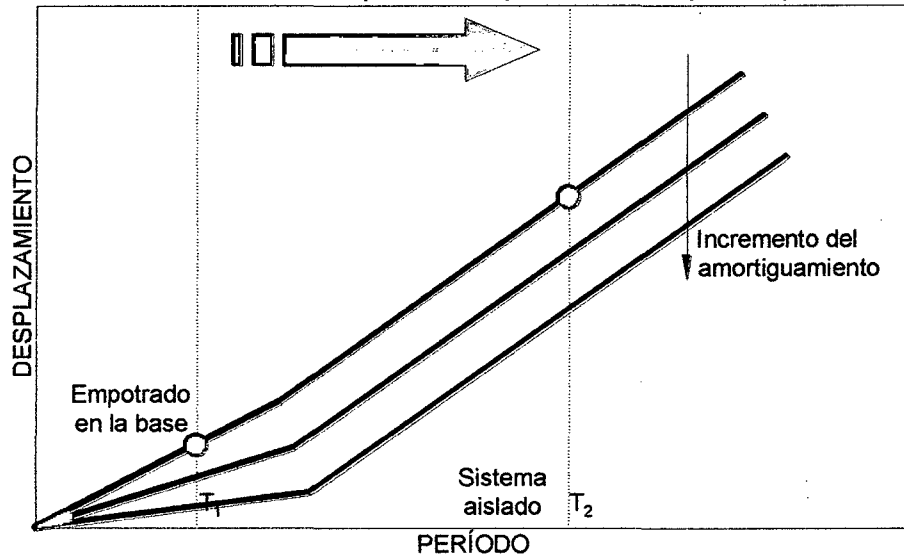
Las fuerzas sísmicas se reducirán debido a que se flexibiliza la estructura. Se puede apreciar con facilidad esta propiedad, pues la inclusión de los aisladores permite modificar el periodo de vibración. En el Gráfico II-3 se muestra por qué, cuando la estructura se vuelve más flexible, la aceleración espectral en el edificio disminuye y también las fuerzas sísmicas sobre la estructura.



Fuente: *Dinamyc Isolation Systems (DIS)*
Elaboración: El autor

Otra característica a resaltar en una estructura aislada es que los desplazamientos se incrementan debido a que la base es menos rígida. Es indispensable controlar este parámetro pues excesivos desplazamientos relativos de entrepiso ocasionan daños en elementos estructurales y no estructurales, así, en algunos casos, para optimizar el funcionamiento de los aisladores, se utiliza un sistema conjunto con disipadores. En el Gráfico II-4, se observa también, que el incremento del amortiguamiento permite limitar este desplazamiento.

Gráfico II-4, Período vs. Desplazamiento para sistema empotrado y aislado



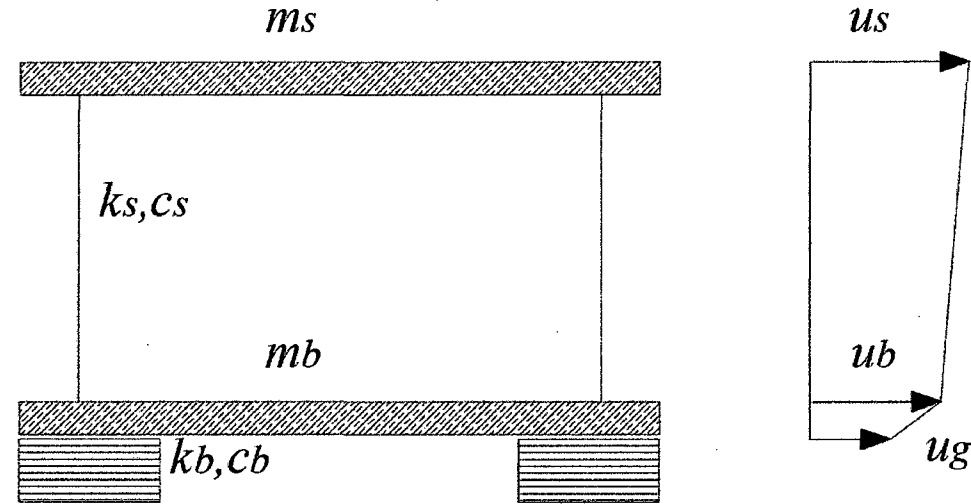
Fuente: *Dinamyc Isolation Systems (DIS)*
Elaboración: El autor

A partir del concepto de balance de energía, en un evento sísmico una parte de la energía que recibe la estructura $E_i(t)$ se transforma en movimiento $E_k(t)$, otra parte se almacena como energía de deformación recuperable $E_s(t)$ y el resto de energía se disipa por medio del amortiguamiento en la estructura $E_D(t)$ o se disipa a través de procesos de deterioro progresivo $E_H(t)$. El aislamiento sísmico ayuda a reducir el deterioro estructural debido a que se reduce la energía total de entrada al edificio (E_i). Para comprender mejor el comportamiento de un sistema aislado es posible hacer una inspección de un sistema representado por dos grados de libertad como el desarrollado en el libro de Kelly (1990). Este análisis implica dos niveles: uno a nivel de la estructura y otro a nivel del sistema de aislación.

La variable m_s representa la masa de la estructura y m_b , la masa del sistema de aislación. En la Ilustración II-8, Modelo edificio aislado., se presentan las características del modelo utilizado, en donde k_s y k_b representan las rigideces de las masas; y c_s y c_b sus amortiguamientos. Además se tiene las variables u_s , u_b y u_g que representan movimientos absolutos de la estructura, del sistema de aislación y el suelo, respectivamente. Para este análisis se utiliza la suposición de que todos los elementos trabajan en rango elástico y poseen un amortiguamiento lineal.



Ilustración II-8, Modelo edificio aislado.



Fuente: *Seismic Isolation and Energy Dissipation: Theoretical Basis and Applications*
 Elaboración: María Rosaria Marciso

A continuación se revisarán los procedimientos y consideraciones en el análisis, así como los resultados más importantes obtenidos:

Procedimiento y Consideraciones del Análisis

Al aplicar el equilibrio dinámico de las dos masas se obtienen las siguientes ecuaciones:

Equilibrio dinámico para la estructura:

$$m_s \ddot{u}_s + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s (u_s - u_b) = 0 \quad \text{Ec. II-46 Ecuación de equilibrio Dinámico}$$

Equilibrio dinámico para el sistema de aislación:

$$m_b \ddot{u}_b + c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b (u_b - u_g) = 0 \quad \text{Ec. II-47 Ecuación de equilibrio dinámico Sist. Aislado}$$

Al sustituir los desplazamientos relativos por los absolutos mediante las relaciones $v_s = u_s - u_b$ y $v_b = u_b - u_g$. Y al considerar, para la ecuación Ec. II-46, que no existe el movimiento relativo entre el suelo y el sistema de aisladores ($v_b=0$); y para la ecuación Ec. II-47, que no existe el movimiento relativo entre el sistema de aisladores y la estructura sino que este último se mueve como un sólido rígido ($v_s=0$), se obtienen las ecuaciones que se detallan a continuación:



Cuando no se considera el movimiento relativo entre el suelo y el sistema de aisladores se representa al movimiento de la estructura como si estuviera con base fija:

$$m_s \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{u}_g \quad \text{Ec. II-48 Ecuación entre suelo y SA}$$

Cuando no se considera el movimiento relativo entre el sistema de aisladores y la estructura se representa al movimiento del sistema compuesto por la estructura y el sistema de aislamiento:

$$(m_s + m_b) \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g \quad \text{Ec. II-49 Ecuación entre SA y Superestructura}$$

A partir de estos dos casos se puede estimar órdenes de magnitud de los siguientes parámetros:

La frecuencia estructural ω_s es mucho más grande que la frecuencia del sistema aislado cuando la estructura es considerada rígida ω_b , a partir de allí se define la relación $(\omega_b / \omega_s)^2$ que varía entre 10^{-1} y 10^{-2} . Dónde:

$$\begin{aligned} \omega_s &= \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \\ \omega_b &= \sqrt{\frac{k_b}{m_s + m_b}} \\ \varepsilon &= \left(\frac{\omega_b}{\omega_s}\right)^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. II-50 Frecuencia Estructural}$$

Los factores de amortiguamiento de la estructura ξ_s y el del sistema aislado ξ_b son del mismo orden que la magnitud ε .

$$\begin{aligned} \xi_s &= \frac{c_s}{2m_s \omega_s} \\ \xi_b &= \frac{c_b}{2(m_s + m_b) \omega_b} \end{aligned} \quad \text{Ec. II-51 Factor de amortiguamiento}$$

La relación de masas es prácticamente igual a 1



$$\frac{m_s}{m_s + m_b} \approx 1$$

Las ecuaciones de movimiento Ec. II-48 y Ec. II-49 pueden ser escritas en forma matricial:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad \text{Ec. II-52 Forma matricial}$$

Dónde:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_s + m_b & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix},$$

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} \quad \text{y} \quad \{r\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

El método de superposición modal es el de definir los desplazamientos relativos en función de respuestas modales $u_1(t)$ y $u_2(t)$ mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} v_b(t) &= u_1(t)A_1^{(1)} + u_2(t)A_1^{(2)} \\ v_s(t) &= u_1(t)A_2^{(1)} + u_2(t)A_2^{(2)} \end{aligned} \quad \text{Ec. II-53 Desplazamientos relativos}$$

Con la suposición de que el amortiguamiento de estas respuestas modales son lo suficientemente reducidas para mantener las propiedades ortogonales al plano de análisis en dicha forma de vibración; es decir, en donde se considera sólo una dirección de análisis sin influencia de la otra dirección, se pueden establecer las siguientes ecuaciones de movimiento:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_1 + 2\xi_1\omega_1\dot{u}_1 + \omega_1^2u_1 &= -\alpha_1\ddot{u}_g \\ \ddot{u}_2 + 2\xi_2\omega_2\dot{u}_2 + \omega_2^2u_2 &= -\alpha_2\ddot{u}_g \end{aligned} \quad \text{Ec. II-54 Ecuación de movimiento para ambas direcciones}$$

Dónde ξ_1 y ξ_2 son los porcentajes de amortiguamiento modal; y α_1 y α_2 son los factores de participación modal que se determinan mediante las expresiones:

Para ξ_1 y ξ_2 :

$$\xi_1 = \frac{C_1}{2\omega_1 M_1} = \frac{\{A^{(1)}\}^T [C] \{A^{(1)}\}}{2\omega_1 \{A^{(1)}\}^T [M] \{A^{(1)}\}} \quad \text{Ec. II-55 Amortiguamiento Modal}$$



$$\xi_2 = \frac{C_2}{2\omega_2 M_2} = \frac{\{A^{(2)}\}^T [C] \{A^{(2)}\}}{2\omega_2 \{A^{(2)}\}^T [M] \{A^{(2)}\}}$$

Para α_1 y α_2 :

$$\alpha_1 = \frac{P_1}{M_1} = \frac{-\{A^{(1)}\}^T [M] \{r\}}{\{A^{(1)}\}^T [M] \{A^{(1)}\}}$$

$$\alpha_2 = \frac{P_2}{M_2} = \frac{-\{A^{(2)}\}^T [M] \{r\}}{\{A^{(2)}\}^T [M] \{A^{(2)}\}}$$

Ec. II-56 Participación Modal

Dónde: $r = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$

Resultados obtenidos

Determinación de las frecuencias de vibración (ω_1 y ω_2):

Para determinar las frecuencias naturales de vibración se resuelve la ecuación

$$([K] - \omega^2 [M]) = 0$$

$$\omega_1 = \omega_b \sqrt{1 - \gamma \epsilon} \approx \omega_b$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_s}{\sqrt{1 - \gamma}} \sqrt{1 + \frac{\gamma \omega_b^2}{\omega_s^2}} \approx \frac{\omega_s}{\sqrt{1 - \gamma}}$$

Ec. II-57 Frecuencias naturales de vibración.

La primera frecuencia natural de vibración " ω_1 " es el del aislamiento y tiene que definirse como la frecuencia que representa al conjunto estructura y sistema de aislación que se mueven como una única masa debido a que se considera a la estructura rígida.

Así, esta frecuencia de vibración no afecta la flexibilidad de la estructura pues el desplazamiento relativo entre el sistema de aislamiento y la estructura no es significativo. La segunda frecuencia de vibración " ω_2 " sí es estructural y se encuentra afectada por la inclusión de la masa en el sistema de aislación.

Determinación de las formas de vibrar ($A^{(1)}$ y $A^{(2)}$):



Para determinar la forma de vibrar $A^{(1)}$ o $A^{(2)}$, primero se reemplaza el valor de la frecuencia ω_1 o ω_2 en la ecuación $([K] - \omega^2[M])\{A\} = 0$.

Luego, se normaliza con $A_1^{(1)} = 1$ o $A_2^{(1)} = 1$, respectivamente y se obtiene la forma de vibrar: $\{A^{(1)}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{Bmatrix}$ y $\{A^{(2)}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ \frac{1-(1-\gamma)\varepsilon}{\gamma} \end{Bmatrix}$

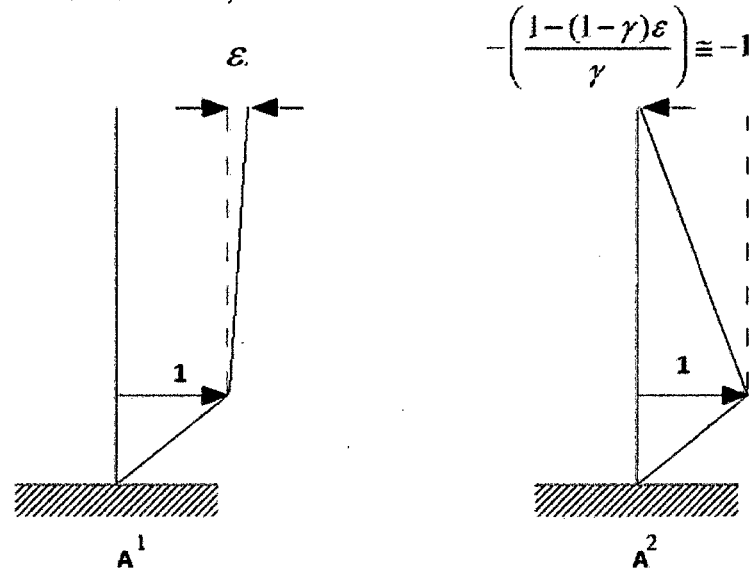
En la Ilustración II-9, Maneras de vibrar de un sistema aislado, se muestran las formas de vibrar de los dos grados de libertad analizados: la forma de vibrar $A^{(1)}$ representa a una estructura rígida sobre una base muy flexible de acuerdo con los órdenes de magnitud en donde $\varepsilon \ll 1$. Y la forma de vibrar $A^{(2)}$ en el que se tiene deformación tanto en la estructura como en el sistema de aislación con el desplazamiento en el último piso de la estructura desfasado del desplazamiento del sistema de aislación y además con desplazamientos que tienen el mismo orden de magnitud en donde se cumple que:

$$-\left(\frac{1-(1-\gamma)\varepsilon}{\gamma}\right) \cong -1.$$

En la forma de vibrar $A^{(1)}$ se observa que los desplazamientos relativos de los niveles intermedios del edificio se reducen; de ahí se reconoce el beneficio de este modo de vibración debido al cual existirá menor daño en la estructura por el control en las derivas.

En contraste, el beneficio de la forma de vibrar $A^{(2)}$ es que se generan cortantes menores dado que al desplazamiento de la estructura se le opone el desplazamiento del sistema de aislación.

Ilustración II-9, Maneras de vibrar de un sistema aislado



Determinación de los factores de participación modal (α_1 y α_2) y de los porcentajes de masa efectiva (M_1^* y M_2^*):

Para determinar los factores de participación se despejan las expresiones presentadas anteriormente:

$$\alpha_1 = \frac{-\{A^{(1)}\}^T [M] \{r\}}{\{A^{(1)}\}^T [M] \{A^{(1)}\}} = 1 - \gamma \epsilon$$

$$\alpha_2 = \frac{-\{A^{(2)}\}^T [M] \{r\}}{\{A^{(2)}\}^T [M] \{A^{(2)}\}} = \gamma \epsilon$$

Ec. II-58 Factores de participación

Y luego se calculan los porcentajes de masa efectiva mediante:

$$M_1^* = \alpha_1^2 M_1 = M$$

$$M_2^* = \alpha_2^2 M_2 = M \frac{(1 - \gamma)(1 - 2\epsilon(1 - \gamma))}{\gamma}$$

Ec. II-59 Porcentaje de masa efectiva.

El segundo factor de participación es aquél que involucra la deformación estructural, se observa que este factor tiene el orden de magnitud de ϵ , lo que es beneficioso ya que esta deformación es reducida a nivel de la estructura.

Determinación de los porcentajes de amortiguamiento modal (ξ_1 y ξ_2):

Para determinar los porcentajes de amortiguamiento se despejan las expresiones presentadas anteriormente:



$$\xi_1 = \frac{\{A^{(1)}\}^T [C] \{A^{(1)}\}}{2\omega_1 \{A^{(1)}\}^T [M] \{A^{(1)}\}} = \xi_b \left(1 - \frac{3}{2}\gamma\epsilon\right)$$
$$\xi_2 = \frac{\{A^{(2)}\}^T [C] \{A^{(2)}\}}{2\omega_2 \{A^{(2)}\}^T [M] \{A^{(2)}\}} = \frac{\xi_s}{\sqrt{1-\gamma}} + \frac{\gamma\xi_b\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{1-\gamma}}$$

Ec. II-60 Porcentajes de amortiguamiento.

Se observa que ξ_1 representa directamente el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento mientras que en ξ_2 se observa que éste contribuye con el amortiguamiento del segundo modo de vibración, que como se recordará es el de la estructura. Esta característica es importante dado que la ganancia en amortiguamiento al utilizar los aisladores permite que la disipación de energía sea mayor y se experimenten niveles de fuerzas aún más reducidas.



Capítulo III.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se describe en detalle el proceso a seguir para demostrar la hipótesis:

III.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL EDIFICIO

Como primer punto caracterizamos el modelo para así con estos datos ingresar al Etabs.

III.1.1 Características del Edificio Convencional

El edificio hospitalario a analizar del nuevo Hospital Regional de Cajamarca es el sector "E", que se encuentra ubicado en la urbanización "Los Eucaliptos" de la ciudad de Cajamarca, a 2720 m.s.n.m. La edificación cuenta con 6 pisos de sistema mixto de pórticos y muros de corte o placas.

A continuación se describe la configuración que presenta el sector E del Hospital Regional de Cajamarca, por cada Nivel (Solano Camacho 2013):

a. Primer Nivel:

Correspondiente a la zona de servicios generales del Hospital, depósito de oxígeno, vacío, gases naturales, almacén general, talleres. Tiene una altura de 4.55 m tomada hasta el eje de la losa aligerada.

Está conformada por:

- Columnas de sección 0.55 x 0.55.
- Vigas de sección de 0.30 x 0.60, en la mayoría de la estructura; en la zona de escaleras de escape vigas de 0.20 x 0.60 y 0.50 x 0.25 y en la zona de ductos vigas de 0.15 x 0.60.
- Placas de 0.30 m en la parte central correspondiente a los patios y 0.20 m en la zona de escaleras de escape.
- Losa aligerada en dos sentidos de 0.25 m de espesor, en toda la estructura.
- Losa aligerada en un sentido de 0.25 m, en la zona de escaleras de escape.
- Entre los ejes 12'-13/H-J, tiene un ambiente construido para un corredor que



conecta hacia la zona de nutrición y dieta. De igual forma entre los eje J-K/11-12, se aprecia una zona de aberturas para ductos.

- Entre los ejes L/14.15 se tiene la carga distribuida del equipo de autoclaves y entre los ejes H-I/9'10 se tiene el equipo de rayos "X". Estos dos equipos proporcionan una carga considerable a la losa que fue tomada en cuenta para el análisis.

b. Segundo Nivel:

Correspondiente a la zona de hall de ascensores, admisión, imagenología, emergencia y zona de esterilización. Tiene una altura de 3.80 m tomada hasta el eje de la losa aligerada.

Está conformada por:

- Columnas de sección 0.40 x 0.55.
- Vigas de sección de 0.30 x 0.60, en la mayoría de la estructura; en la zona de escaleras de escape vigas de 0.20 x 0.60 y 0.50 x 0.25 y en la zona de ductos vigas de 0.15 x 0.60.
- Placas de 0.30 m en la parte central correspondiente a los vacíos de los patios y 0.20 m en la zona de escaleras de escape.
- Losa aligerada en dos sentidos de 0.25 m de espesor, en toda la estructura.
- Losa aligerada en un sentido de 0.25 m, en la zona de escaleras de escape.
- Entre los ejes J-K/11-12, se observa una zona de aberturas para ductos. La construcción del puente metálico se encuentra ejecutado entre los ejes 12-12'/H-J.
- Dicho peso se apoyará en las placas.

c. Tercer Nivel:

Correspondiente a la zona de hall de ascensores, neonatología, puerperio, recuperación quirúrgica, centro quirúrgico, centro obstétrico, UCI, UCI intermedio y UCI de Neonatología.

Está conformada por:



- Columnas de sección 0.40 x 0.55.
- Vigas de sección de 0.30 x 0.60, en la mayoría de la estructura; en la zona de escaleras de escape vigas de 0.20 x 0.60 y 0.50 x 0.25; en la zona de ductos vigas de 0.15 x 0.60.
- Placas de 0.30 m en la parte central correspondiente a los vacíos de los patios y 0.20 m en la zona de escaleras de escape.
- Losa aligerada en dos sentidos de 0.25 m de espesor, en toda la estructura.
- Losa aligerada en un sentido de 0.25 m, en la zona de escaleras de escape.
- Entre los ejes J-K/11-12, se observa una zona de aberturas para ductos.

d. Cuarto Nivel:

Correspondiente a la zona de hall de ascensores, jefaturas médicas y piso de instalaciones.

Está conformada por:

- Columnas de sección 0.30 x 0.55.
- Vigas de sección de 0.30 x 0.60, en la mayoría de la estructura; en la zona de escaleras de escape vigas de 0.20 x 0.60 y 0.50 x 0.25; en la zona de ductos vigas de 0.15 x 0.60.
- Placas de 0.30 m en la parte central correspondiente a los vacíos de los patios y 0.20 m en la zona de escaleras de escape.
- Losa aligerada en dos sentidos de 0.25 m de espesor, en toda la estructura.
- Losa aligerada en un sentido de 0.25 m, en la zona de escaleras de escape.
- Entre los ejes J-K/11-12, se observa una zona de aberturas para ductos. Así mismo en los ejes 15-15'/G-O y 8'-9'/L-O, se visualiza la construcción de volados.

e. Quinto Nivel:

Correspondiente a la zona de hall de ascensores y hospitalización.

Está conformada por:

- Columnas de sección 0.30 x 0.55.



- Vigas de sección de 0.30 x 0.60, en la mayoría de la estructura; en la zona de escaleras de escape vigas de 0.20 x 0.60 y 0.50 x 0.25; en la zona de ductos vigas de 0.15 x 0.60; en la zona de techos metálicos vigas de 0.40 x 0.25.
- Placas de 0.30 m en la parte central correspondiente a los vacíos de los patios y 0.20 m en la zona de escaleras de escape.
- Losa aligerada en dos sentidos de 0.25 m de espesor, en toda la estructura.
- Losa aligerada en un sentido de 0.25 m, en la zona de escaleras de escape y losas donde se ubican los techos metálicos translúcidos.
- Entre los ejes J-K/11-12, se puede apreciar una zona de aberturas para ductos. En los ejes 15-15'/G-O y 8'-9'/L-O, se visualiza la construcción de volados. En los ejes 13-14'/G-O, 10-10'/G-O, C-C'/11-13 y N'-O'/11-13, se visualiza aberturas para la colocación de techo metálico translúcido, los aligerados de esta nivel soportan una carga adicional correspondiente a techos metálicos.

f. Sexto Nivel:

Correspondiente a la zona de cuarto de máquina de ascensores.

Está conformada por:

- Vigas de sección de 0.30 x 0.60 y 0.20 x 0.60
- Placas de 0.25 m en zona de ascensores.

Losa aligerada en un sentido de 0.25 m.

III.1.2 Características del Edificio Aislado

El proceso de aislación demanda la revisión del modelo en base fija y su modificación, ya que los aisladores hacen que la estructura tenga menos esfuerzos internos disipando la energía que ingresa, a través del desplazamiento del sistema de aislación, no se hacen completamente necesarios el uso de sistemas de rigidizarían convencionales como es el uso de muros de corte, además de que estos generan tracciones en el sistema de aislación que harían inviable al mismo. Todos estos cambios se hicieron tomando en cuenta la arquitectura del edificio que no se modificó, incluso ahora se tienen más áreas



donde se pueden abrir vanos. En el nivel de la base se ha agregado losas y vigas que están encima del sistema de aislación, a continuación se la describe:

a. Nivel base:

Correspondiente a la zona de servicios generales del Hospital, depósito de oxígeno, vacío, gases naturales, almacén general, talleres. Tiene una altura de 4.55 m tomada hasta el eje de la losa aligerada.

Está conformada por:

- De aquí parten las columnas de sección 0.55 x 0.55.
- Vigas de sección de 0.30 x 0.60, en la mayoría de la estructura.

Losa aligerada en dos sentidos de 0.25 m de espesor, en toda la estructura.

III.1.3 Modelamiento Computacional

Para la modelación de ambas estructuras de base fija y aislada se utilizaron las características estructurales y de materiales del expediente técnico, así como lo detallado en los anteriores acápite. Esto se realizó completamente en ETABS v2013, se definieron materiales, secciones, ejes y cargas.

III.1.3.1 Modelamiento de la estructura convencional

En el caso de la estructura convencional, esta se realizó de forma detallada considerando todos los elementos de la estructura.

Se consideró la base del edificio empotrada al suelo, en cada piso se consideró diafragma rígido el sistema conformado por vigas y losa.

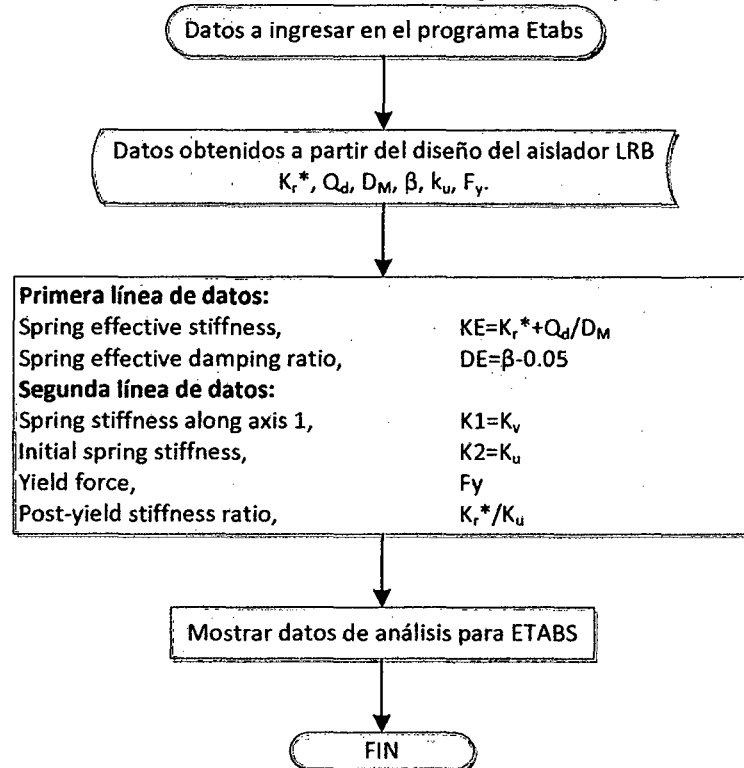
Las masas que son necesarias para el análisis modal se consideraron a través de los elementos o peso propio de la estructura y masas distribuidas en la losa, carga viva y carga muerta que es originada por los acabados e implementación hospitalaria.



III.1.3.2 Modelamiento de estructura aislada

Para el caso de la estructura aislada se tomó en cuenta los datos brindados por las características del edificio mencionadas en el capítulo anterior y además se ingresan los datos proporcionados por el diseño de los aisladores, se siguió el siguiente proceso:

Ilustración III-1, Diagrama de flujo, datos a ingresar en el programa Etabs.



Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers (E30)*
 Elaboración: El autor.

Como se observa el amortiguamiento obtenido de los cálculos se le está restando 5%, esto porque la estructura tiene un amortiguamiento de 5%.

El primer paso es crear los aisladores, estos están definidos como elementos Link, entonces se ingresa: *Define/Section Properties/Link Support Properties*

Luego, se crea una nueva propiedad link, nos aparecerá la siguiente ventana:



Ilustración III-2, Datos de propiedades de elemento "Link"

Link Property Data

General

Link Property Name: LRB-A1 Link Type: Rubber Isolator

Link Property Notes: Modify/Show Notes... P-Delta Parameters: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 0 kN-s²/mm Rotational Inertia 1: 0 kN-mm-s²

Weight: 0 kN Rotational Inertia 2: 0 kN-mm-s²

Rotational Inertia 3: 0 kN-mm-s²

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

OK Cancel

Fuente: Etabs
Elaboración: Etabs.

En la parte superior derecha tenemos el tipo de "Link", desplegamos y escogemos "Rubber Isolator" luego en la parte inferior izquierda tenemos las propiedades direccionales marcamos las que corresponden a las direcciones principales e ingresamos los datos de diseño:

Ilustración III-3, Propiedades de direccionales U1 de elemento.

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: LRB-A1

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Linear Properties

Effective Stiffness: 1276.68351 kN/mm

Effective Damping: 0 kN-s/mm

OK Cancel

Fuente: Etabs
Elaboración: Etabs.



Como se observa en esta línea de datos se coloca la rigidez vertical del aislador.

Ilustración III-4, Propiedades de direccionales U2 de elemento.

Link/Support Directional Properties		
Identification		
Property Name	LRB-A1	
Direction	U2	
Type	Rubber Isolator	
NonLinear	Yes	
Linear Properties		
Effective Stiffness	1.05825	kN/mm
Effective Damping	0.14217	kN-s/mm
Shear Deformation Location		
Distance from End-J	0	mm
Nonlinear Properties		
Stiffness	20.63299	kN/mm
Yield Strength	118.732	kN
Post Yield Stiffness Ratio	0.035551	

Fuente: Etabs
Elaboración: Etabs.

Las propiedades direccionales del elemento U3 son las mismas que el elemento U2 cuando el aislador es circular. A continuación se muestra el modelo de la estructura aislada:



III.2 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL

III.2.1 Análisis Modal Tridimensional de la Estructura

Teniendo en cuenta las características del edificio convencional y el modelo en Etabs, el análisis se realiza según la norma E30.

III.2.1.1 Espectro de aceleraciones, estructura convencional

El espectro de respuesta utilizado, según la norma E30 Norma Sismo Resistente Peruana.

Según los datos del expediente técnico tenemos:

a) Factor de zona:

El RNE E030 indica que Cajamarca se encuentra ubicado en una zona de alta sismicidad, Cajamarca está en una zona tipo 3, correspondiéndole un factor de $Z=0.40$

b) Factor de uso

El RNE E030, clasifica al Hospital Regional de Cajamarca como una edificación esencial, le corresponde un factor de uso $U = 1.5$

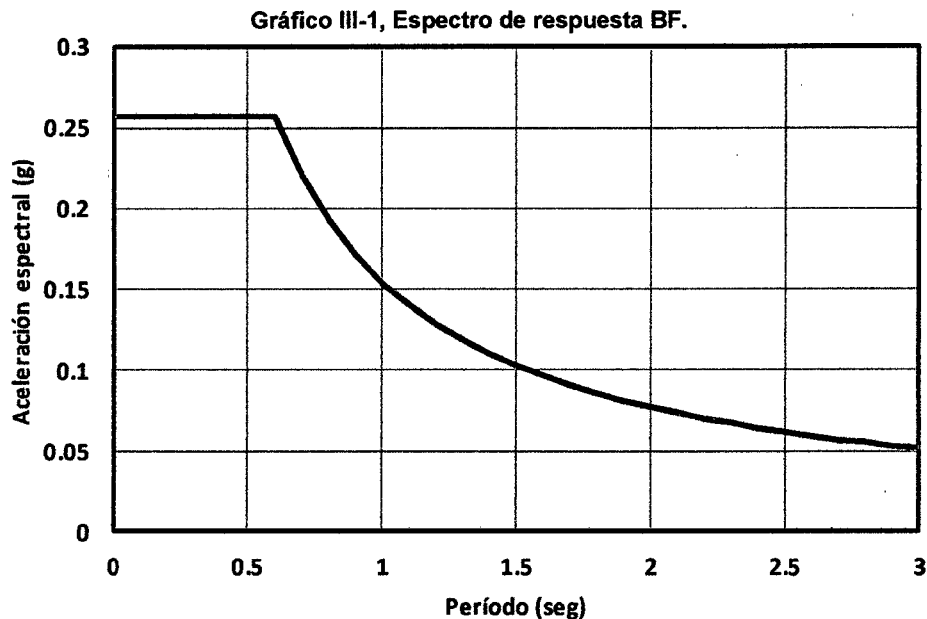
c) Factor de Suelo

El estudio de suelos entregado en el expediente Técnico indica que el Hospital Regional de Cajamarca se ha construido en un perfil de suelo S2, clasificado de acuerdo al RNE como un suelo intermedio. De acuerdo a la norma, indica un factor de suelo $S= 1.2$, mediante este factor también se obtiene el periodo de vibración, correspondiente a $T_p= 0.6$ seg.

d) Coeficiente de Reducción Sísmica

El Hospital Regional de Cajamarca es una edificación conformada por un sistema de pórticos y placas. Le corresponde un coeficiente de Reducción Sísmica $R= 7$

Luego el espectro de respuesta es:



Fuente: Norma Técnica Sismo Resistente Peruana (E30)
Elaboración: El autor

El Gráfico III-1, es la correspondiente a ingresar en el programa Etabs.

Los parámetros de análisis son los considerados en la norma peruana de diseño sismo resistente E30, los cuales son:

Desplazamientos laterales:

Este parámetro es importante porque nos dará idea cuanto es el valor de la deriva de entrepiso para luego verificar si este se encuentra por debajo de lo que dicta la norma. Los desplazamientos laterales se calcularán multiplicando por $0.75R$ los resultados obtenidos del análisis lineal y elástico con las sollicitaciones sísmicas reducidas. Para este cálculo no se tendrá en cuenta los valores mínimos de C/R y el cortante.

Aceleraciones de piso:

Este parámetro es importante dentro del diseño porque tiene relación con los daños que pueda presentar la estructura al ser sometida a un sismo severo, y principalmente con el nivel de fuerzas y daños que pueden sufrir los equipos y contenidos que se encuentren al interior de la estructura.

En el caso de nuestro edificio es importante tener control de este parámetro debido a que los componentes en un hospital son de vital importancia.



Cortante en la base:

La fuerza cortante total en la base de la estructura, correspondiente a la dirección considerada, se determinará por la siguiente expresión:

$$V = \frac{ZUCS}{R} P$$

Ec. III-1 Fuerza cortante en la base.

La fuerza sísmica distribuida en altura será:

Si el período fundamental T , es mayor que 0,7s, una parte de la fuerza cortante V , denominada F_a , deberá aplicarse como fuerza concentrada en la parte superior de la estructura. Esta fuerza F_a se determinará mediante la expresión:

$$F_a = 0.07VT \leq 0.15V$$

Donde el período T en la expresión anterior será el mismo que el usado para la determinación de la fuerza cortante en la base.

El resto de la fuerza cortante, es decir $(V-F_a)$ se distribuirá entre los distintos niveles, incluyendo el último, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_i = \frac{P_i h_i}{\sum_{j=1}^n P_j h_j} (V - F_a)$$

Ec. III-2, Distribucion de fuerza cortante.

III.2.2 Diseño de la Estructura

El diseño de la estructura se realizó enteramente en el programa Etabs mediante la utilización de su módulo de diseño.

La norma usada en el diseño de los elementos estructurales fue ACI 318 – 2011 y se utilizaron las siguientes combinaciones de carga:

Las estructuras y los elementos estructurales deben ser diseñados para que tengan en cualquier sección una resistencia de diseño al menos igual a la resistencia requerida, esta última calculada para las cargas y fuerzas mayoradas en las condiciones establecidas por ACI – 318 del 2011, se debe garantizar además un comportamiento adecuado al nivel del área de servicio (American Concrete Institute - ACI 2011).



Resistencia requerida

La resistencia requerida U , debe ser por lo menos igual al efecto de las cargas mayoradas. Debe investigarse el hecho de una o más cargas que no actúan simultáneamente.

$$U = 1.4D$$

Ec. III-3, Resistencia requerida U_1

$$U = 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$$

Ec. III-4, Resistencia requerida U_2

$$U = 1.2D + 1.6(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) + (1.0L \text{ ó } 0.5W)$$

Ec. III-5, Resistencia requerida U_3

$$U = 1.2D + 1.0W + 1.0L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$$

Ec. III-6, Resistencia requerida U_4

$$U = 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S$$

Ec. III-7, Resistencia requerida U_5

$$U = 0.9D + 1.0W$$

Ec. III-8, Resistencia requerida U_6

$$U = 0.9D + 1.0E$$

Ec. III-9, Resistencia requerida U_7

Dónde:

- D: Carga muerta, esta carga incluye el peso propio y las cargas inmóviles.
- L: Carga viva o cargas móviles.
- L_r : Carga viva de techo.
- E: Carga producida por el evento sísmico.
- W: Carga de viento.
- S: Carga de nieve.
- R: Carga de lluvia.



III.3 AISLAMIENTO BASAL DE LA ESTRUCTURA

III.3.1 Condiciones Generales en el Diseño de la Aislación Basal

Cuando ya se tiene tomada la decisión entregar un mayor nivel de protección a la estructura y sus contenidos por medio de un sistema de aislación basal, viene el siguiente paso, elegir dentro de las opciones existentes cual es la más adecuada según las diversas limitantes, condiciones o requerimientos tanto estructurales como económicos que existan en el proyecto. Pero sin importar cuál sea el sistema de aislación a utilizar, este deberá satisfacer ciertos requerimientos para asegurar un comportamiento efectivo, los cuales son:

- a) Soportar el peso propio y sobrecargas de la estructura con un factor de seguridad adecuado.
- b) Tener una gran flexibilidad horizontal de modo de alargar el período fundamental de vibración de la estructura a una zona de menos aceleración espectral.
- c) Tener una rigidez vertical alta para evitar la amplificación vertical o el balanceo de la estructura.
- d) Proveer de un adecuado nivel de amortiguamiento de modo de reducir la demanda de deformación sobre el sistema de aislación.
- e) Ser capaz de soportar las deformaciones de corte que le serán impuestas por un sismo de gran magnitud.
- f) Mantener su estabilidad vertical antes movimientos sísmicos severos.
- g) Proveer una rigidez suficiente para cargas de servicio de la estructura de modo de evitar vibraciones molestas.
- h) El sistema de aislación debe asegurar una vida útil a lo menos igual al de la estructura o proveer de algún sistema que posibilite el recambio de los aisladores.
- i) La efectividad del sistema de aislación no debe estar limitada a la ocurrencia de un sismo severo, es decir, el sistema debe ser efectivo durante el sismo y después de él, para soportar las probables replicas.

El sistema de aislación deberá permanecer efectivo a través de un rango normal de condiciones climáticas y ambientales.



III.3.2 Estudio de Alternativas de Aislación Basal para la Estructura

Para el presente trabajo de investigación se decidió estudiar tres sistemas de aislación, la elección de ellos se debió principalmente a que presentan una sólida base teórica, su buen comportamiento ha sido demostrado tanto teórica como experimentalmente, y no presentan problemas enfrentando sismos de gran magnitud que han afectado a diversas estructuras en donde se han implementado.

Estos son:

Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR)

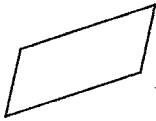
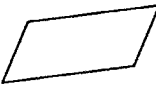

Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Aisladores de un péndulo de fricción (FPS)

Para este estudio se hace uso de la bibliografía así como el uso extendido de estos en el mundo.



Tabla III.1, Guía de Aisladores.

Base		AISLADO		
Gráfica Fuerza vs Desplazamiento		Bilineal		
		 IV	 V	 VI
Descripción		Moderada no linealidad Alta fase elástica de aislación.	Moderada no linealidad Baja fase elástica de aislación.	No linealidad alta Baja fase elástica de aislación.
Deformación estructural		Baja	Baja	Baja
Desplazamiento de aislador		Baja	Baja	Baja
Aceleraciones de la estructura		Baja	Moderada	Moderada
Corte	Cortante en la base	Baja	Moderada	Baja
	Factor de pandeo	Baja	Alta	Muy alta
Aceleración espectral del último piso	Periodo (0.1 - 1 seg)	Moderada	Moderada/Alta	Alta/Muy alta
	Periodo > 1 seg.	Baja/Moderada	Baja	Baja
Ventajas principales		Fuerzas sísmicas, desplazamiento de aislación, y cortante basal bajos. Bajo/Moderado ataque a los contenidos.	Bajo desplazamiento de aislación.	Bajo desplazamiento de aislación.
		Aislador se cierra durante vientos fuertes		
Desventajas principales		Algunos ataques a corto plazo de los contenidos.	Moderado/Alto ataque de los contenidos.	Alto/Muy alto ataque de contenidos.
Ejemplos		Lead rubber isolator (aislador con núcleo de plomo). Laminated rubber bearing más amortiguadores metálicos		Simple friction-sliding system (sistema de fricción deslizante simple)

Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers.*
 Elaboración: El autor



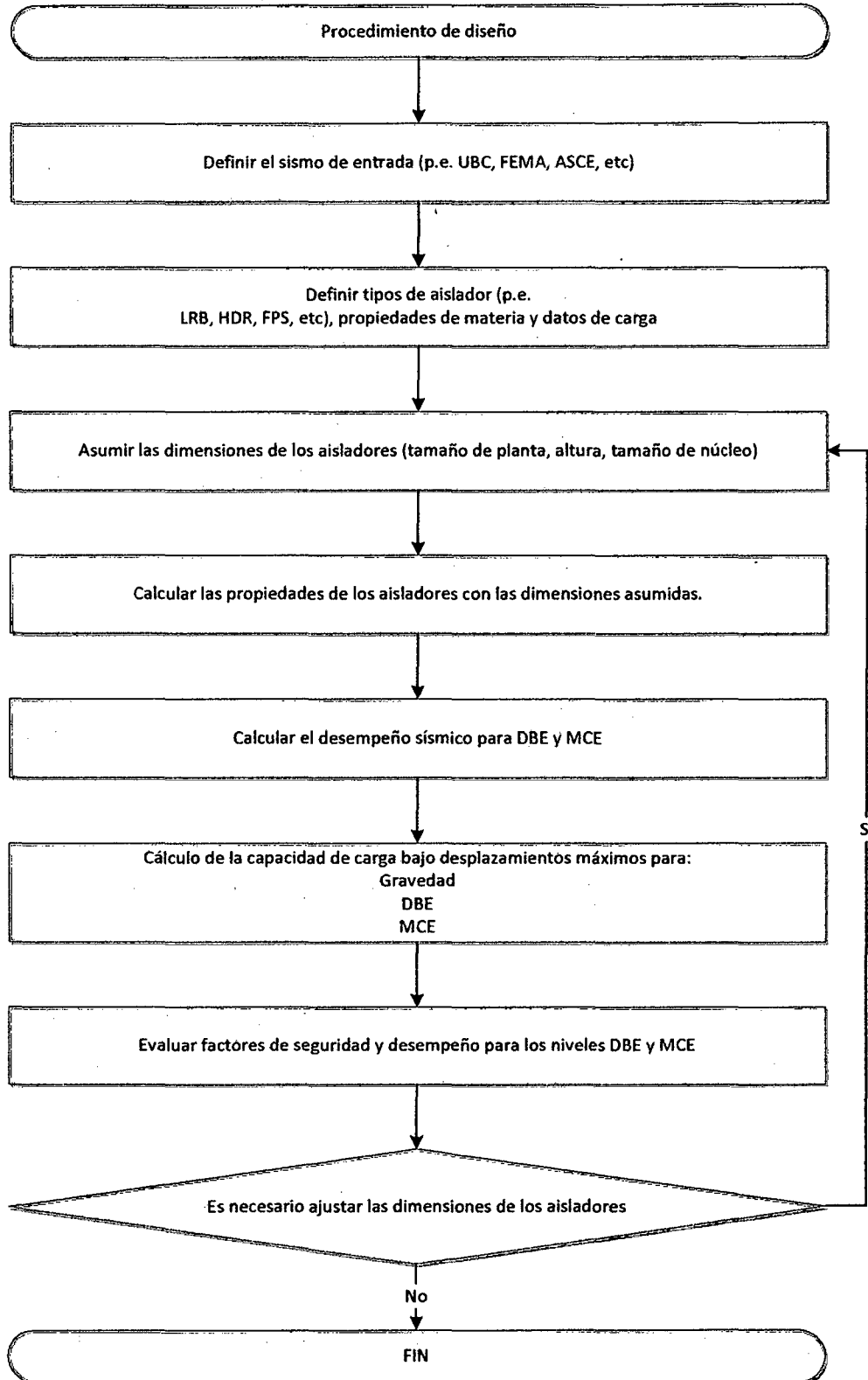
Según esos casos y por ser uno de los aisladores más analizados y estudiados en laboratorios en diferentes partes del mundo, el de tipo elastomérico con núcleo de plomo es el que se utilizará en la estructura.

III.3.3 Procedimiento de diseño de sistema de aislación

Teniendo en cuenta el tipo de aislador a diseñar y aspectos físicos de la estructura se tiene el siguiente diagrama de flujo:



Ilustración III-5, Procedimiento de diseño aislador sísmico de base.



Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*
Elaboración: El autor



III.4 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA AISLADA

III.4.1 Análisis Modal Tridimensional de la Estructura

Para el análisis de la estructura aislada se utilizó el mismo proceso que para la estructura convencional.

Se utilizaron 3 espectros para la estructura con base aislada, estos son (a) *espectro propuesto por la norma E30 peruana*, y dos espectros más, ambos utilizados en el diseño del sistema de aislación, para (b) *sismo de diseño DBE* y para (c) *sismo máximo considerado MCE*.

Espectro para sismo de diseño (DBE) y máximo considerado (MCE)

a) Factor de zona:

El RNE E030 indica que Cajamarca se encuentra ubicado en una zona de alta sismicidad, Cajamarca está en una zona tipo 3, correspondiéndole un factor de $Z=0.40$

b) Factor de uso

La norma ASCE/SEI 7 – 10, Dice que los factores de importancia son la unidad cuando se trata de estructuras aisladas $U = 1$

c) Factor de Suelo

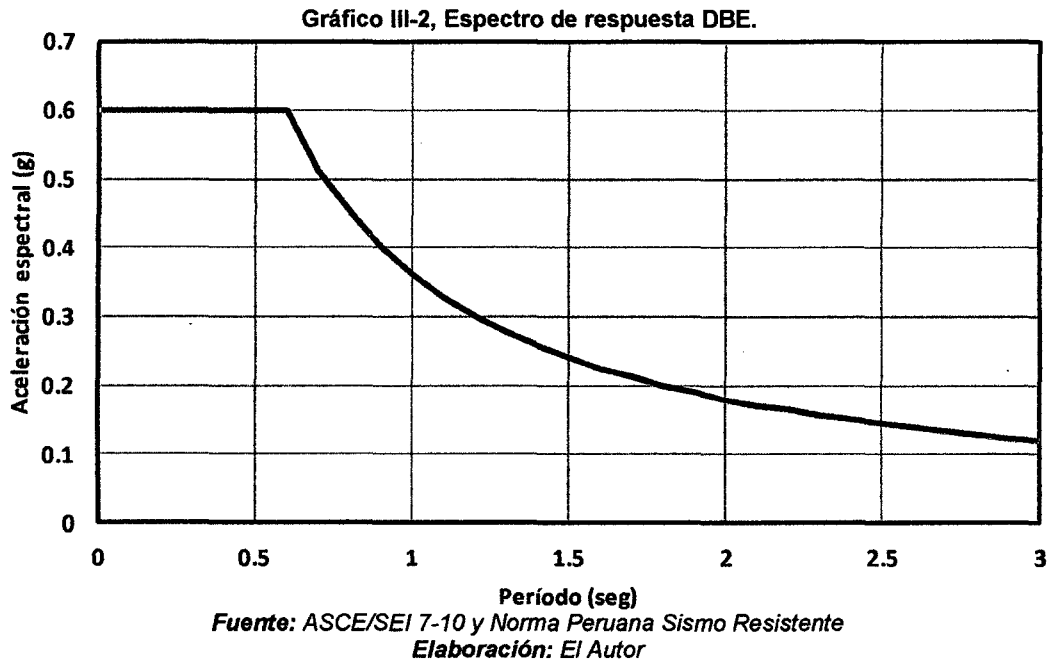
El estudio de suelos entregado en el expediente Técnico indica que el Hospital Regional de Cajamarca se ha construido en un perfil de suelo S2, clasificado de acuerdo al RNE como un suelo intermedio. De acuerdo a la norma, indica un factor de suelo $S= 1.2$, mediante este factor también se obtiene el periodo de vibración, correspondiente a $T_p= 0.6$ seg.

d) Coeficiente de Reducción Sísmica

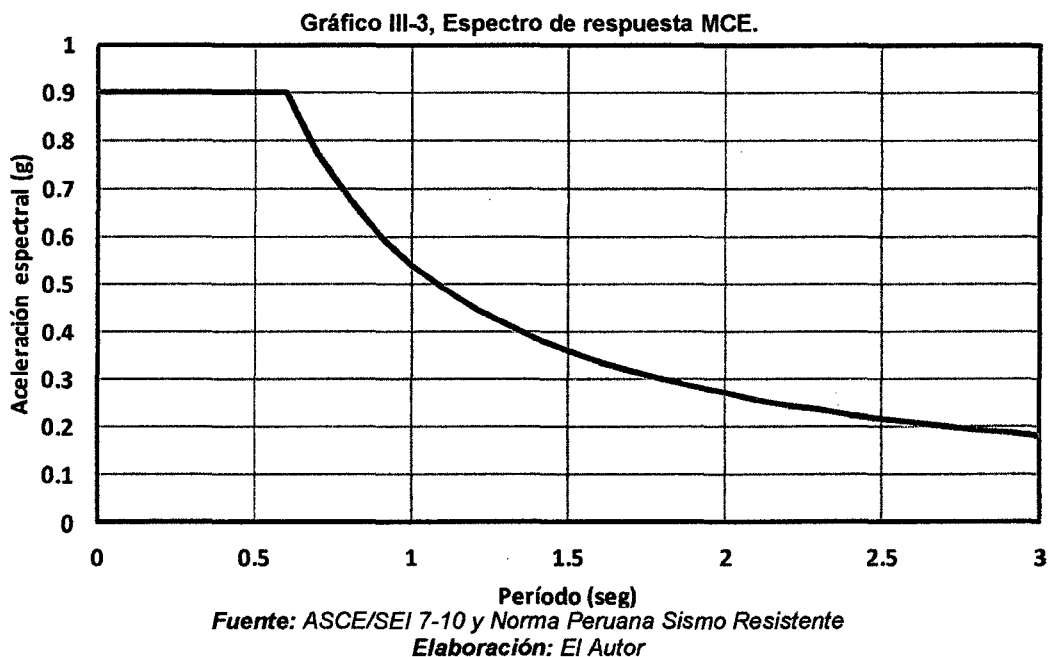
Según la norma ASCE/SEI, tenemos que para un sistema de aislación se reduce este coeficiente a $3/8$ de R inicial, pero considerando que no sea menor a 1 ni mayor a 2; por lo tanto, corresponde un coeficiente de Reducción Sísmica $R= 2$



Luego el espectro de respuesta es:



Para obtener el espectro de respuesta para un sismo máximo considerado se hará uso de la Ec. II-41, sobre el espectro DBE.



Para el caso con el sismo de Ica, se utilizó el análisis no lineal ya que los aisladores son elementos que no trabajan linealmente.



III.4.2 Diseño de la Estructura

Para el diseño de la estructura por encima del sistema de aislación se trabajó de manera similar que en el sistema convencional con la diferencia de que se utilizó el espectro generado por el sismo de diseño o DBE, el cual simplemente se repasará en este acápite.

El espectro utilizado es el elaborado por la norma peruana sismo resistente E30.

Se utilizaron las combinaciones de carga dictadas por la norma ACI 318 – 2011.

Se realizó el diseño con el uso del programa Etabs.



Capítulo IV. RESULTADOS

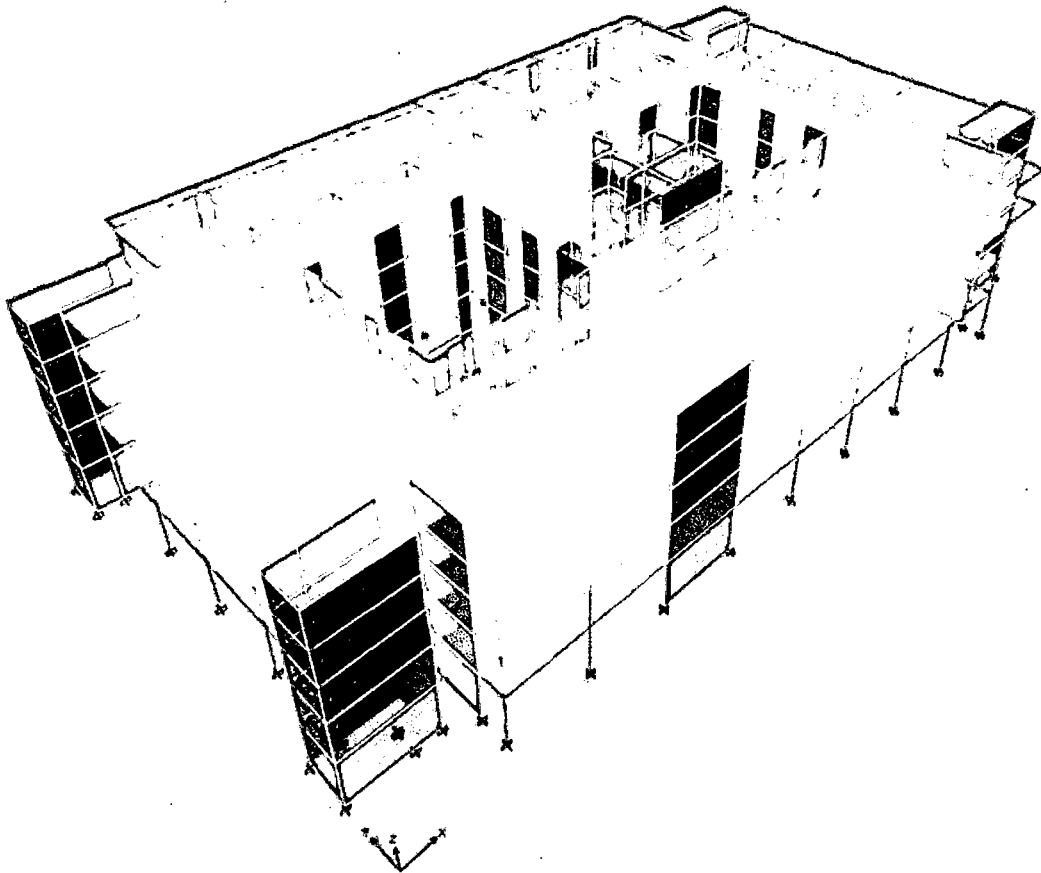
IV.1 ANÁLISIS Y DEMOSTRACIÓN DE RESULTADOS

IV.1.1 COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Modelamiento de la estructura convencional

El edificio hospitalario se modelo con ayuda del software Etabs versión 2013, a continuación se presenta el modelo:

Ilustración IV-1, Modelo edificio convencional en Etabs.



Fuente: Etabs
Elaboración: El Autor

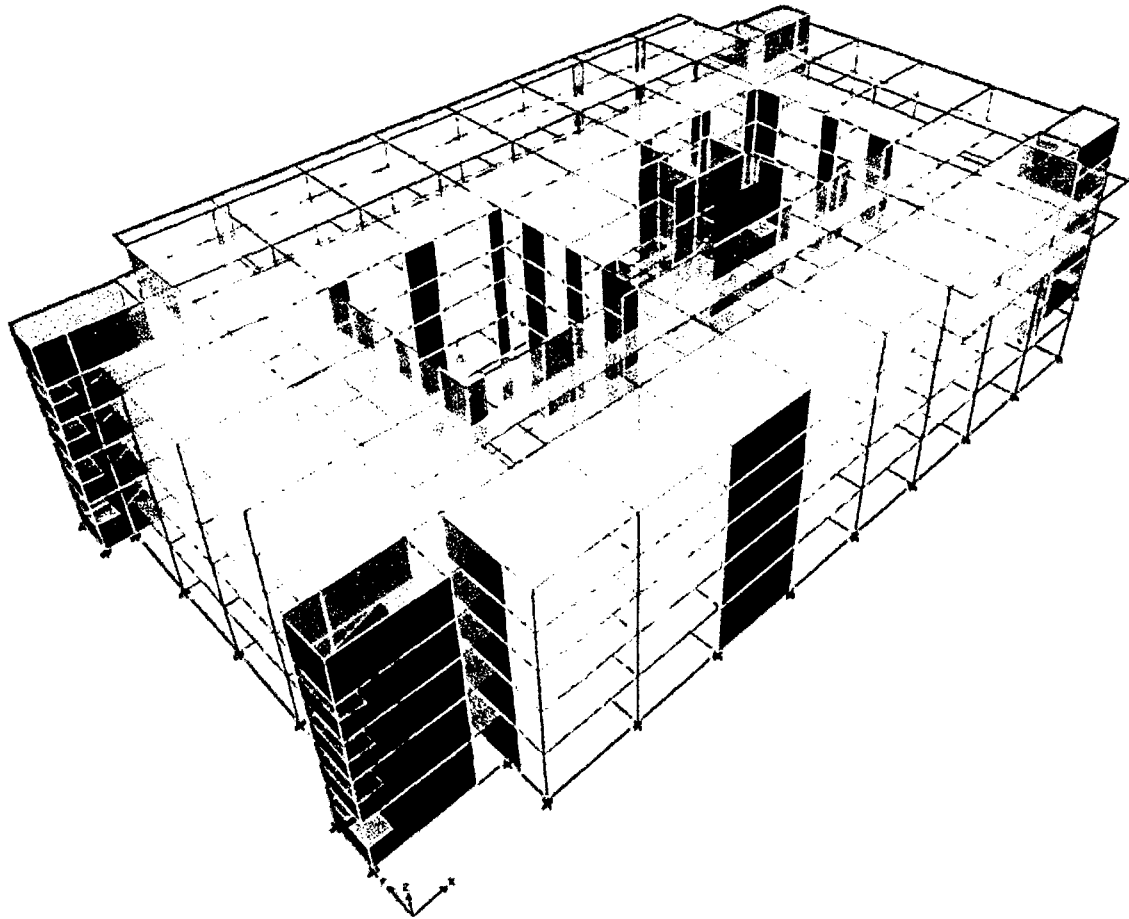
Donde las líneas en dirección de los ejes "X" e "Y" son elementos "frame" que designan a vigas y las líneas que están en dirección "Z" son elementos "frame" que designan a las columnas, los muros de corte o placas estructurales son elementos "Shell", superficies color rojo en los planos "ZX" y "ZY".



A este modelo analizamos estos datos se muestran en el apéndice 1, y también se verifico su diseño, esto se muestra en el apéndice 6, estos datos se corroboran con las normas de diseño sismo resistente E30.

La segunda parte se adicionó una losa y vigas al sistema convencional, como se muestra en la siguiente figura

Ilustración IV-2, Edificio con losa y vigas de aislacion.

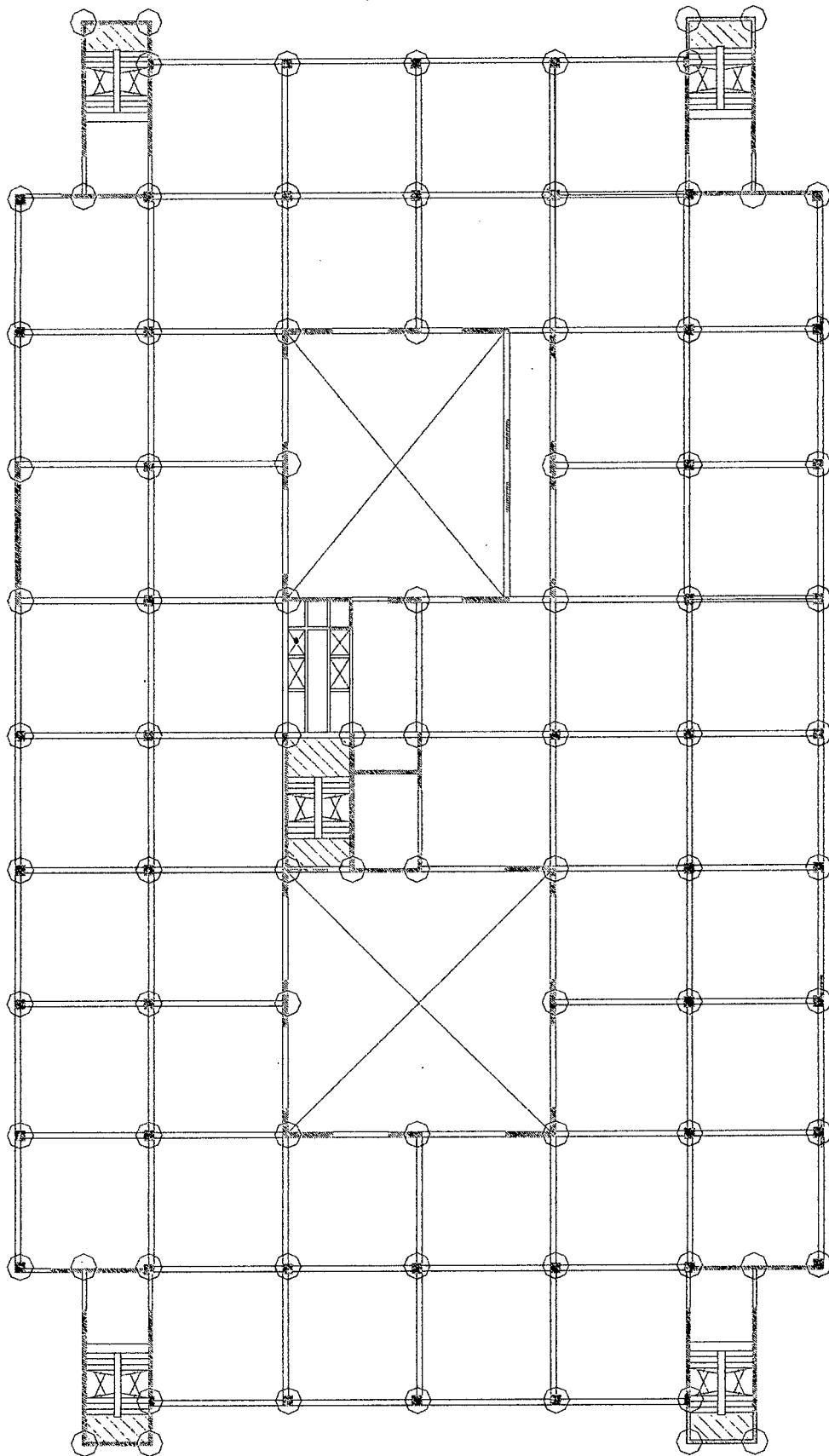


Fuente: Etabs
Elaboración: El Autor

Luego se definió los puntos donde irán los aisladores, con esto se tomó la carga en cada uno de estos puntos y se separó por grupos promedio. Como se muestra en la siguiente figura:



Ilustración IV-3, Ubicación de aisladores.



Fuente: Autocad
Elaboración: El Autor



A partir de aquí se toma la carga que llegan a estos puntos y se separan por grupos, luego se prueba un primer diseño del sistema de aislación pero que falla por cavitación en la goma ya que se encuentra sometido a tracciones muy fuertes y por un periodo considerable de tiempo.

Ya que incluir un sistema de aislación en una estructura incluye reducir el peso de la misma como el número de elementos rigidizantes, en el caso de muros de corte, y reducir secciones en el caso de columnas y vigas, entonces se elimina algunos muros de corte de la estructura, dejándose solo las placas que conforman las cajas de las escaleras y el ascensor.

Se obtuvo las cargas puntuales de este nuevo modelo aislado, luego con los datos promedio, máximo y máximo con sismo se escogió, haciendo uso del catálogo los aisladores:

Tabla IV.1, Tamaño del dispositivo de aislación.

Diámetro de aislador, DI (mm)	Altura de aislador, H. (mm)	Número de capas, N	Diámetro de plomo, DL (mm)
900	255-560	9-37	0-255

Fuente: Catalogo Dynamic Isolation Systems.

Elaboración: El Autor.

A partir de los datos del catálogo y de los pesos, se procede al diseño del sistema de aislación:

Diseño del sistema de aislación.

Haciendo uso de la herramienta Excel y el Procedimiento de diseño para aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)., del Apéndice 3, se tiene:



Tabla IV.2, Datos de sismo.

Unidades:	KN, mm
Factor de zona sísmica, Z	0.40
Tipo de suelo de fundación	S2
Parámetro, T_p	0.600
Parámetro, S	1.200
Amplificación sísmica, C	1.000
Coefficiente sísmico, S_{D1}	0.480
Coefficiente de fuerza lateral, R_l	2.00
Coefficiente de fuerza lateral en base fija, R	7.00
Factor de importancia, I	1.00
Coefficiente sísmico, S_{M1}	0.720
Excentricidad, e	3.83
Ancho de la estructura, b	43.50
Largo de la estructura, d	76.50
Distancia al aislador más lejano, y	38.25
$D_{TD}/D_D = D_{TM}/D_M$	1.2267

Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.

En la tabla anterior se muestran los datos de sismo para DBE y MCE para su correspondiente diseño

Tabla IV.3, Tipo de aislador y datos de carga.

Descripción	LRB - A	LRB - B	TOTAL
Ubicación			
Tipo (HDR, LRB, ELAST, TFE)	LRB	LRB	
Número de aisladores	28	57	85
Promedio (CM+CV), P_d	2203.69	2102.20	
Máximo (CM+CV)	3554.83	3447.68	
Máximo (CM+CV+S)	5785.72	5696.55	
Mínimo (CM-S)	0	0	
Peso sísmico	61703.314	119825.27	181528.59
Desplazamiento no sísmico, Δ_{NS}	0	0	
Rotación no sísmica (rad), θ_{NS}	0	0	
Rotación sísmica (rad), θ_E	0	0	

Fuente: Excel.
 Elaboración: El Autor.

Al elegir un tipo de aislador se lo hace a partir de los datos comerciales, estos se pueden conseguir en catálogos de fabricantes, los datos de carga se extraen de un análisis a la estructura sin aisladores



Tabla IV.4, Dimensiones de aisladores.

Descripción	LRB - A	LRB - B	
Dimensiones de planta (Radio), B	920	920	
Profundidad (Sólo R), D			
Espesor de la capa, t_i	10	10	
Número de capas, N	30	30	
Tamaño del núcleo de plomo, d_{pl}	135	130	
Forma (Cuadrada = S, Circular = C ó Rectangular = R)	C	C	
Cubierta lateral, t_{sc}	10	10	
Grosor de la cuña interna, t_{sh}	2.7	2.7	
Espesor de la placa de carga, T_{pl}	38	38	
Espesor total de la goma, T_r	300	300	
Altura total, H	453	453	
Nivel de rendimiento total del sistema	5.20%	5.05%	5.10%

Fuente: Excel.
 Elaboración: El Autor.

Las dimensiones mínimas de los aisladores elastoméricos, son requeridas por las cargas de gravedad, el factor de seguridad de gravedad, a cero desplazamientos, debe ser por lo menos 3 para los estados límite de deformación y pandeo. El valor del diámetro del aislador es 920 mm ya que se agregan los 10 mm de espesor que tiene la cubierta lateral.

Tabla IV.5, Propiedades de aisladores.

Descripción	LRB - A	LRB - B
Área bruta, A_g	664761	664761
Dimensión garantizada, B_b	900.00	900.00
Profundidad garantizada (sólo rectangulares), D_b		
Área garantizada, A_b	608212	608212
Área de plomo, A_{pl}	14314	13273
Área garantizada neta, A_{bn}	593898	594939
Espesor total de la goma, T_r	300.00	300.00
Perímetro garantizado, p	2764.6	2764.6
Factor de forma, S_l	21.48	21.52
Fuerza característica, Q_d	114.51	106.19
Módulo de corte (50%), G_{50}	0.0004	0.0004
Rigidez de fluencia, K_r	0.83	0.83
Rigidez elástica, K_u	20.73	20.76
Fuerza de fluencia, F_y	119.28	110.61
Desplazamiento de fluencia, Δ_y	5.75	5.33
Momento de inercia, I	2.94E+10	2.94E+10



Factores de pandeo	Sólo para tipo elastomérico	
	Altura libre de aislador, H_f	377.05
Módulo de alabeo, E_b	0.464	0.465
Constante T	1.72E+10	1.72E+10
Constante R	312.63	313.15
Constante Q	0.0083	0.0083

Fuente: Hoja de cálculo.

Elaboración: El Autor.

La mayoría de las propiedades son una función de la forma que tiene en planta el dispositivo, las propiedades de rigidez y fuerza están en función del tipo de dispositivo, en este caso LRB.

Tabla IV.6, Capacidad de carga: Cargas por gravedad.

Descripción	LRB - A	LRB - B
Factor ϵ_u	0.333	0.333
Carga vertical aplicada, P_{DL+LL}	3554.830	3447.683
Desplazamiento aplicado	0.000	0.000
Rotación aplicada	0.000	0.000
Factor de forma, S_f	21.482	21.520
Constante k	0.870	0.870
Módulo de elasticidad, E	0.0014	0.0014
Módulo de compresión, E_c	1.085	1.089
Área reducida, A_r	608212	608212
Rigidez vertical, K_{vi}	66014	66246
Deformación de compresión, ϵ_c	0.005	0.005
Deformación de corte por compresión, ϵ_{sc}	0.694	0.672
Deformación de corte por desplazamiento, ϵ_{sh}	0.000	0.000
Deformación de corte por rotación, ϵ_{sr}	0.000	0.000
Deformación total, ϵ	0.694	0.672
Deformación permisible, ϵ_p	2.167	2.167
Carga de pandeo, P_{cr}	19139	19189
Estado	Ok	Ok
Módulo de corte ajustado, G^*	0.00035	0.00036
Rigidez post fluencia ajustada, K_r^*	0.73	0.74
Cálculo de la rigidez vertical		
K_{vi}	66014	66246
K_v	2200	2208
Módulo de compresibilidad, E_∞	1.5	1.5
Rigidez vertical, K_v	1277	1279

Fuente: Hoja de cálculo.

Elaboración: El Autor.



Para los aisladores elastoméricos la capacidad de carga por gravedad es calculada para evaluar el desempeño sísmico. En este caso no es necesario modificar las dimensiones de planta del dispositivo. La rigidez vertical puede ser usada para calcular deflexiones en el aislador que causarían desplazamientos en la estructura durante el proceso constructivo.

Tabla IV.7, Capacidad de carga: Sismo Base de Diseño (DBE).

Descripción	LRB - A	LRB - B
Factor ϵ_u	0.75	0.75
Carga vertical aplicada, $P_{DL+SLL+E}$	5785.7161	5696.5522
Desplazamiento DBE, D_D	184	184
Factor de desplazamiento D_{TD}/D_D	1.227	1.227
Desplazamiento aplicado, D_{TD}	225	225
Rotación aplicada (rad), θ_E	0	0
Factor de forma, S_I	21.5	21.5
Constante k	0.87	0.87
Módulo de elasticidad, E	0.0014	0.0014
Módulo de compresión, E_c	1.085	1.089
Área reducida, A_r	412216	412216
Rigidez vertical, K_{VI}	44741	44898
Deformación de compresión, ϵ_c	0.013	0.013
Deformación de corte por compresión, ϵ_{sc}	1.67	1.64
Deformación de corte por desplazamiento, ϵ_{sh}	0.75	0.75
Deformación de corte por rotación, ϵ_{sr}	0.000	0.000
Deformación total, ϵ	2.417	2.389
Deformación permisible	4.875	4.875
Carga de pandeo, P_{cr}	12971	13005
Estado	Ok	Ok

Fuente: Hoja de cálculo.

Elaboración: El Autor.

Luego de calcular el desplazamiento bajo sismo DBE, se procede a evaluar su capacidad de carga, en este caso el aislador pasa satisfactoriamente.



Tabla IV.8, Capacidad de carga: Sismo Máximo Posible (MCE).

Descripción	LRB - A	LRB - B
¿Se ha revisado este tipo?	Sí	Sí
Factor ϵ_u	1	1
Carga vertical aplicada, $P_{DL+SLL+E}$	5785.7161	5696.5522
Desplazamiento MCE, D_M	352	352
Factor de desplazamiento D_{TM}/D_M	1.227	1.227
Desplazamiento aplicado, D_{TM}	432	432
Rotación aplicada (rad), θ_E	0	0
Factor de forma, S_I	21	22
Constante k	0.87	0.87
Módulo de elasticidad, E	0.0014	0.0014
Módulo de compresión, E_c	1.09	1.09
Área reducida, A_r	243974	243974
Rigidez vertical, K_{vI}	26481	26573
Deformación de compresión, ϵ_c	0.022	0.021
Deformación de corte por compresión, ϵ_{sc}	2.82	2.77
Deformación de corte por desplazamiento, ϵ_{sh}	1.44	1.44
Deformación de corte por rotación, ϵ_{sr}	0.00	0.00
Deformación total, ϵ	4.256	4.208
Deformación permisible	6.5	6.5
Carga de pandeo, P_{cr}	7677	7697
Estado	Ok	Ok

Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.

Luego de calcular el desplazamiento bajo sismo MCE, se procede a evaluar su capacidad de carga, en este caso el aislador pasa satisfactoriamente.

Desempeño sísmico:

Tabla IV.9, Desempeño sísmico: Sismo Base de Diseño (DBE).

Descripción	LRB - A	LRB - B	DBE
Número de aisladores	28	57	
Rigidez elástica, K_u	20.73	20.76	
Rigidez post fluencia ajustada, K_r^*	0.73	0.74	
Desplazamiento post fluencia, Δ_y	5.75	5.33	
Fuerza característica, Q_d	114.51	106.19	
Desplazamiento DBE, D_D			183.59
Fuerza de aislador, F	249.20	241.96	
Rigidez efectiva, K_e	1.357	1.318	113.13



Peso sísmico, W			181529
Masa sísmica, M			18.51
Período efectivo, T_E			2.54
Área del lazo de histéresis, A_h	81455	75715	6596477
Amortiguamiento, β	28.3%	27.1%	27.5%
Factor de amortiguamiento, B			1.65
Aceleración espectral, S_A			0.11
Desplazamiento espectral, S_D			183.59
Comprobar convergencia			1.00

*Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.*

También bajo el sismo MCE

Tabla IV.10, Desempeño sísmico: Sismo Máximo Posible (MCE).

Descripción	LRB - A	LRB - B	MCE
Número de aisladores	28	57	
Rigidez elástica, K_u	20.73	20.76	
Rigidez post fluencia ajustada, K_r[*]	0.73	0.74	
Desplazamiento post fluencia, Δ_y	5.75	5.33	
Fuerza característica, Q_d	114.51	106.19	
Desplazamiento MCE, D_M			352.11
Fuerza de aislador, F	372.85	366.59	
Rigidez efectiva, K_e	1.059	1.041	88.99
Peso sísmico, W			181529
Masa sísmica, M			18.51
Período efectivo, T_E			2.87
Área del lazo de histéresis, A_h	158648	147296	12838007
Amortiguamiento, β	19.2%	18.2%	18.5%
Factor de amortiguamiento, B			1.46
Aceleración espectral, S_A			0.17
Desplazamiento espectral, S_D			352.11
Comprobar convergencia			1.00

*Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.*

El cálculo se logra comprobar la convergencia y así obtener el desplazamiento del sistema para ambos sismos, así como su periodo

Los datos a ingresar al software son:



Tabla IV.11, Datos a ingresar en programa Etabs.

Descripción	LRB - A	LRB - B	Unidades: KN, mm
Primera línea de datos			
ID	Rubber Isolator	Rubber Isolator	Identification Number
Tipo de aislador	LRB	LRB	Biaxial Hysteretic/Linear/Friction
KE2	1.058885255	1.041109651	Spring Effective Stiffness along Axis 2
KE3	1.058885255	1.041109651	Spring Effective Stiffness along Axis 3
DE2	0.142326135	0.131612329	Spring Effective Damping Ratio along Axis 2
DE3	0.142326135	0.131612329	Spring Effective Damping Ratio along Axis 3
Segunda línea de datos			
K1	1276.683513	1279.274557	Spring Stiffness along Axis 1 (Axial)
K2	20.63315194	20.67232071	Initial Spring Stiffness along Axis 2
K3	20.63315194	20.67232071	Initial Spring Stiffness along Axis 3
FY2/K11/CFF2	118.7329715	110.1255264	Yield Force Along Axis 2
FY3/K22/CFF3	118.7329715	110.1255264	Yield Force Along Axis 3
RK2/K33/CFS2	0.035558104	0.035774582	Post-Yield stiffness ratio along Axis 2
RK3/CFS3	0.035558104	0.035774582	Post-Yield stiffness ratio along Axis 3

Fuente: Hoja de cálculo.

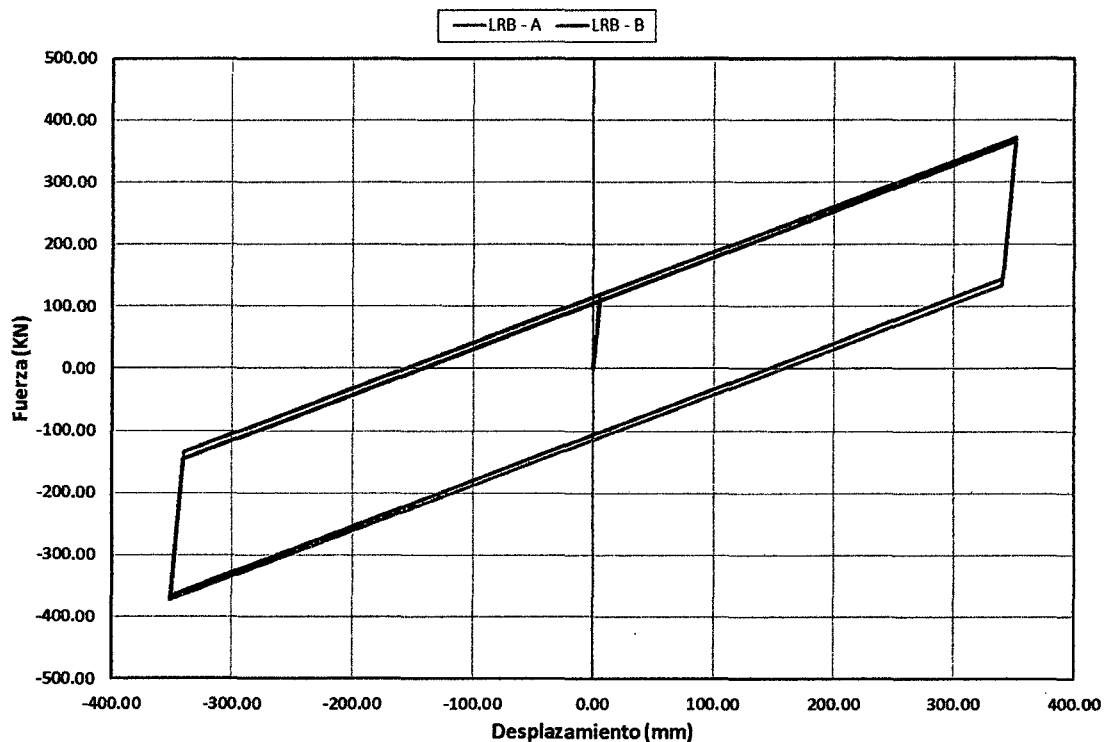
Elaboración: El Autor.

Finalmente se ingresa estos valores al programa Etabs, con los que posteriormente se evaluará la estructura.

Con todos los datos obtenidos de las tablas anteriores se construyeron las siguientes graficas de curva de histéresis y de desempeño de aisladores:



Gráfico IV-1, Curvas de histéresis para los dos tipos de aisladores con núcleo de plomo.



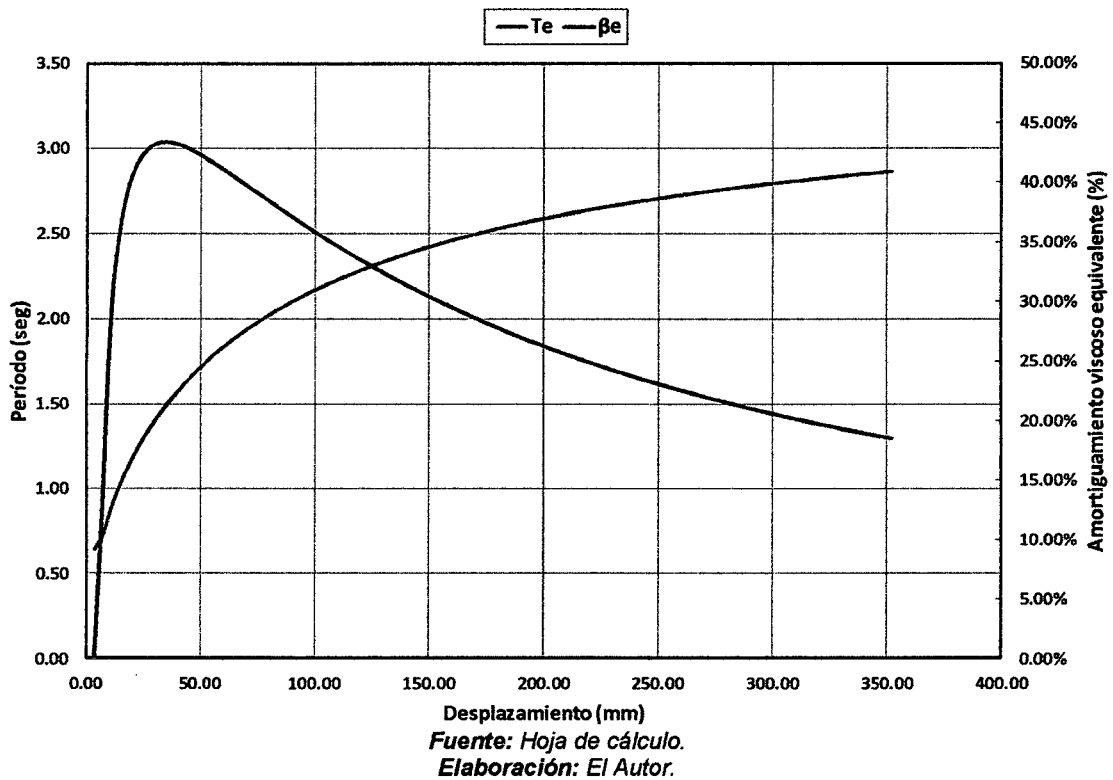
Fuente: Hoja de cálculo.
Elaboración: El Autor.

En el gráfico anterior se aprecia las curvas de histéresis de los aisladores, este grafico tiene como límite grafico el desplazamiento D_M , aunque su límite de diseño sea D_{TM} . El área de histéresis que encierra es la energía disipada por ciclo ante este desplazamiento, ya que como se ha explicado el periodo y la aceleración dependen del desplazamiento del sistema de aislación.

A continuación se detalla gráficamente el desempeño del sistema de aislación en este caso particular:



Gráfico IV-2, Desempeño de sistema de aislamiento.



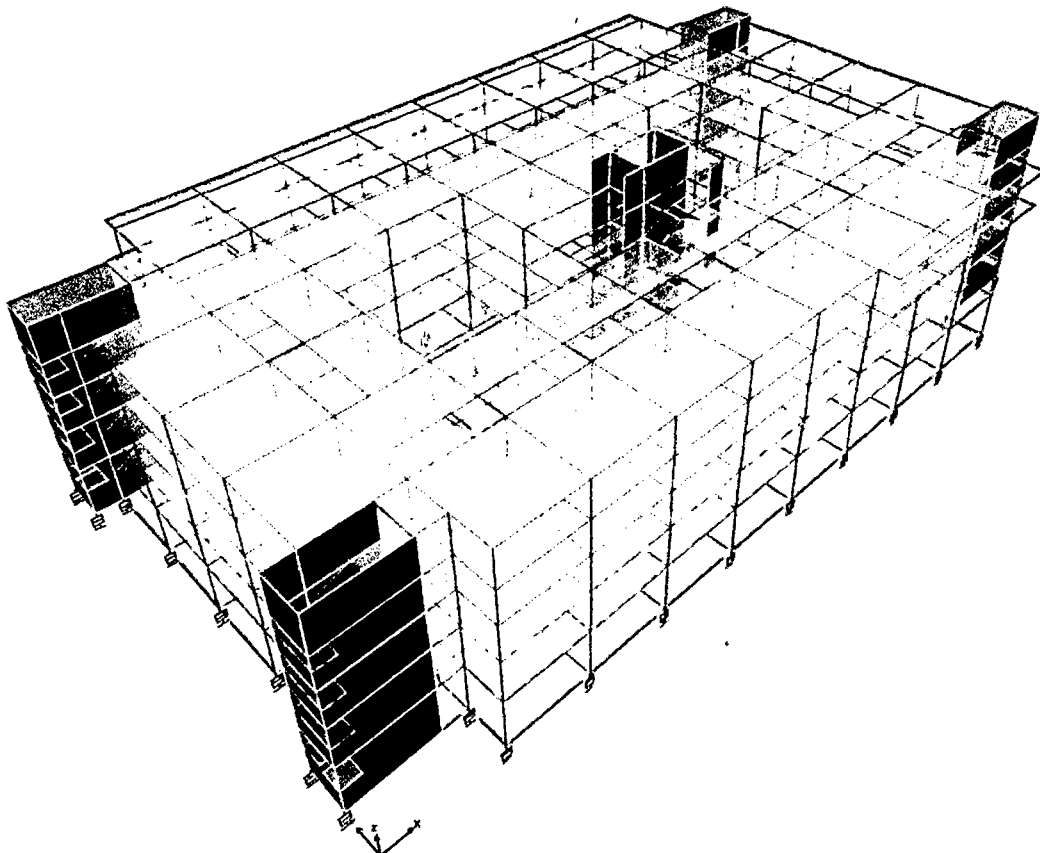
El gráfico anterior nos muestra el desempeño del sistema y la dependencia mencionada anteriormente, del amortiguamiento y el periodo, del desplazamiento. Y este es por qué el diseño de los aisladores es iterativo.

Modelamiento de la estructura aislada

Finalmente se analiza la estructura aislada y se comprueba que sus elementos estructurales resistan.



Ilustración IV-4, Modelo de estructura aislada.



*Fuente: Modelo Etabs-Aislado.
Elaboración: El Autor.*

Se analiza la estructura los resultados de esta pueden revisarse en el apéndice 4 de resultados de la estructura aislada y la verificación en el apéndice 6 de verificación de elementos estructurales.

Una vez verificados los elementos estructurales se procede a comparar resultados.



IV.1.2 RESULTADOS

En esta sección se compararon los resultados obtenidos del análisis de la estructura con aislación y sin aislación sísmica de base, a excepción de la respuesta modal la comparación de resultados se detalla en el Apéndice 5 (Comparación de Resultados.):

Análisis

IV.1.2.1 Respuesta modal

Comparar la respuesta modal nos indica cuanto ha variado el periodo además de la masa participativa. A continuación presentamos los tres modos principales:

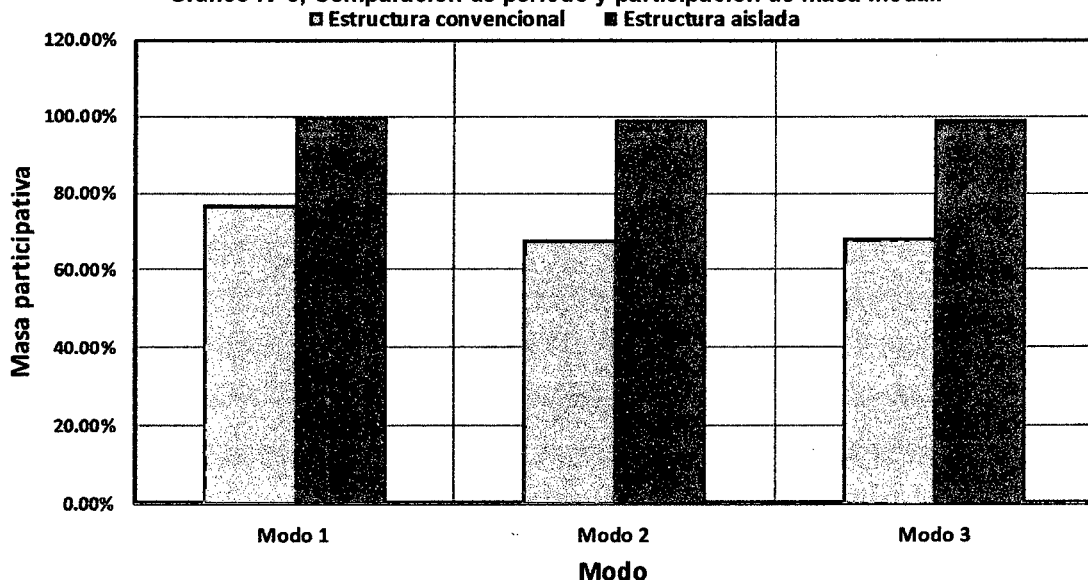
Tabla IV.12, Comparación de período y participación de masa modal.

Modo	Estructura convencional			Estructura aislada		
	Período (seg)	Dirección principal	Masa participativa	Período (seg)	Dirección principal	Masa participativa
1	0.386	Y	76.92%	2.949	Y	99.79%
2	0.334	X	67.75%	2.912	X	99.43%
3	0.289	RZ	68.07%	2.654	RZ	99.36%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De lo anterior se desprende:

Gráfico IV-3, Comparación de período y participación de masa modal.



Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.



Como se observa el porcentaje de masa participativa es mayor a 99% en los dos primeros modos, esto se traduce como una regularidad estructural poca torsión en los modos principales de vibración, esto se produce ya que los aisladores uniformizan el movimiento en la base de la estructura.

IV.1.2.2 Desplazamiento lateral

A continuación se muestra la variación máxima y mínima por piso y para cada análisis.

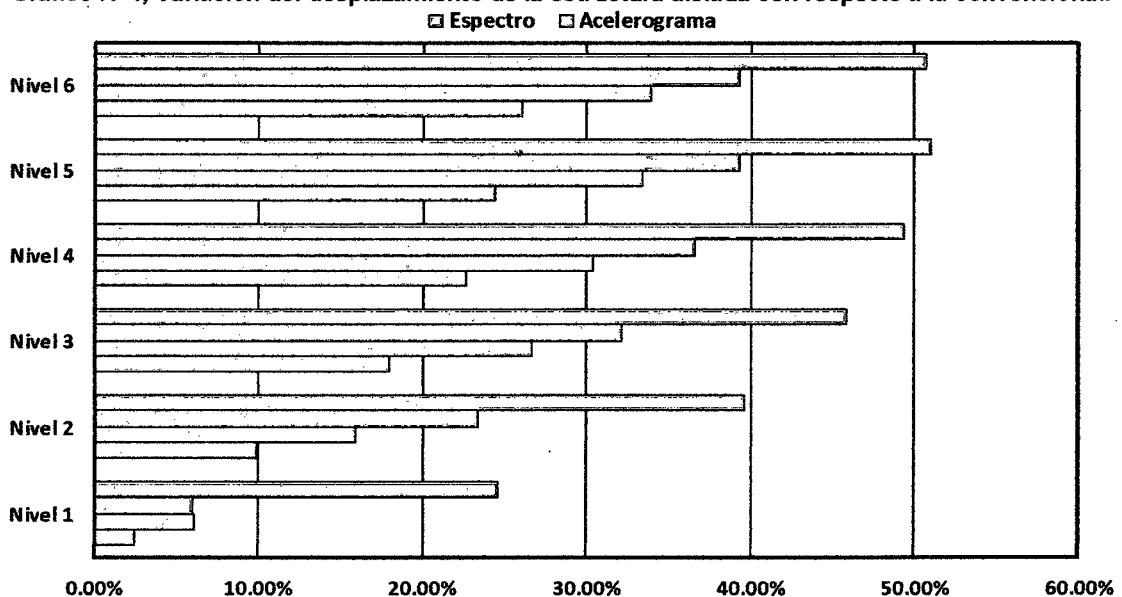
Tabla IV.13, Variación del desplazamiento de la estructura aislada con respecto a la convencional.

Piso	Espectro		Acelerograma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Nivel 6	50.69%	39.31%	33.95%	26.00%
Nivel 5	51.00%	39.27%	33.38%	24.37%
Nivel 4	49.33%	36.57%	30.39%	22.59%
Nivel 3	45.85%	32.18%	26.64%	17.99%
Nivel 2	39.61%	23.31%	15.88%	9.90%
Nivel 1	24.58%	5.93%	6.02%	2.42%

Fuente: Etabs.
Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se tiene:

Gráfico IV-4, Variación del desplazamiento de la estructura aislada con respecto a la convencional.



Fuente: Hoja de cálculo.
Elaboración: El Autor.

Como se observa la variación que se da en el desplazamiento entre la estructura aislada y la convencional va desde un 2% hasta un 51% acrecentándose a



medida que se asciende de nivel. A pesar que la estructura aislada tiene menos elementos rígidos, como son los muros de corte; por ende es más flexible, no se desplaza más que la convencional.

IV.1.2.3 Aceleración por piso

A continuación se muestra la variación máxima y mínima por piso.

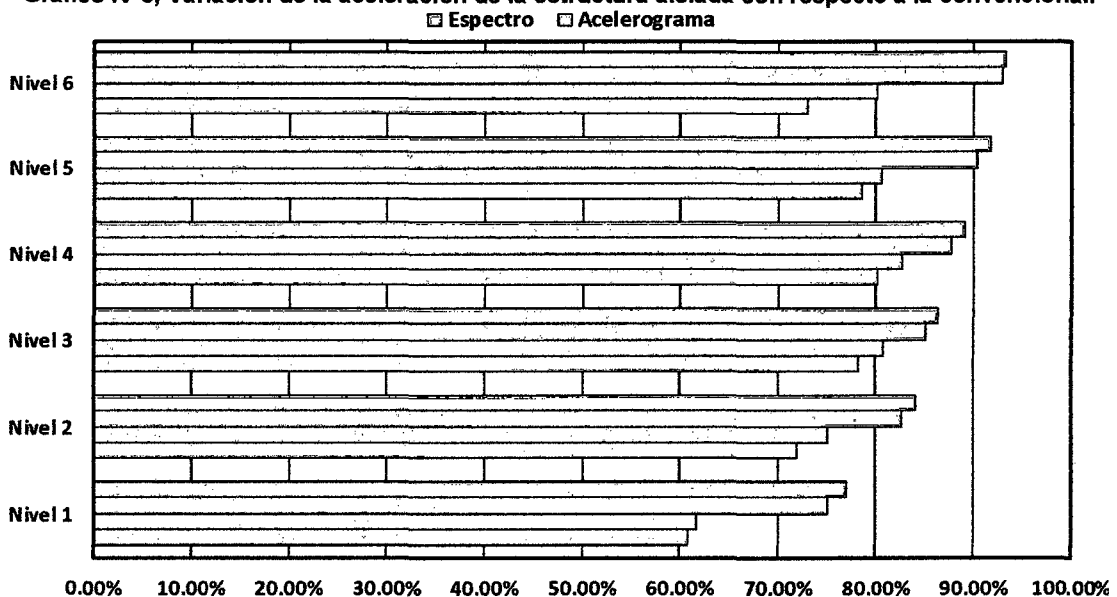
Tabla IV.14, Variación de la aceleración de la estructura aislada con respecto a la convencional.

Piso	Espectro		Acelerograma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Nivel 6	93.25%	93.01%	80.13%	73.02%
Nivel 5	91.83%	90.36%	80.64%	78.61%
Nivel 4	89.21%	87.69%	82.81%	80.04%
Nivel 3	86.44%	85.20%	80.85%	78.26%
Nivel 2	84.05%	82.66%	75.02%	71.92%
Nivel 1	77.04%	75.04%	61.73%	60.77%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

La aceleración que recibe la estructura aislada varía desde un 60% hasta un 93% con respecto a la estructura convencional, esto garantiza que los elementos estructurales no estén sometidos a aceleraciones intensas y por ende a grandes fuerzas, además garantiza el cuidado del contenido importante ya que estos no sufrirán movimientos bruscos que puedan inutilizarlos.

Gráfico IV-5, Variación de la aceleración de la estructura aislada con respecto a la convencional.



Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.



IV.1.2.4 Fuerza cortante

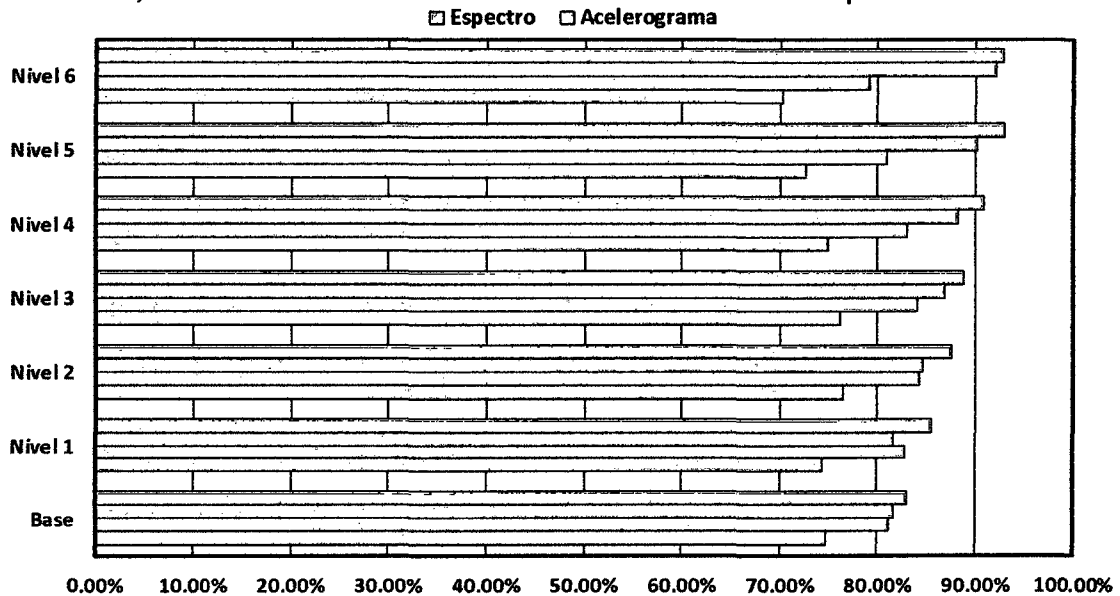
Tabla IV.15, Variación de la fuerza cortante de la estructura aislada con respecto a la convencional.

Nivel	Espectro		Acelerograma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Nivel 6	92.82%	92.15%	79.10%	70.30%
Nivel 5	93.03%	90.17%	80.97%	72.63%
Nivel 4	90.93%	88.27%	83.14%	74.83%
Nivel 3	88.81%	86.91%	84.04%	76.09%
Nivel 2	87.58%	84.66%	84.28%	76.46%
Nivel 1	85.59%	81.63%	82.99%	74.34%
Base	83.00%	81.64%	81.11%	74.66%

Fuente: Etabs.
Elaboración: El Autor.

De lo anterior se obtiene:

Gráfico IV-6, Variación de la fuerza cortante de la estructura aislada con respecto a la convencional.



Fuente: Hoja de cálculo.
Elaboración: El Autor.

Como se observa la fuerza cortante en la estructura aislada varía entre 75% hasta un 93% con respecto a la estructura convencional, esto garantiza que los esfuerzos a los que estarán sometidos los elementos estructurales ante un sismo sean mínimos.



IV.1.2.5 Momento de volteo

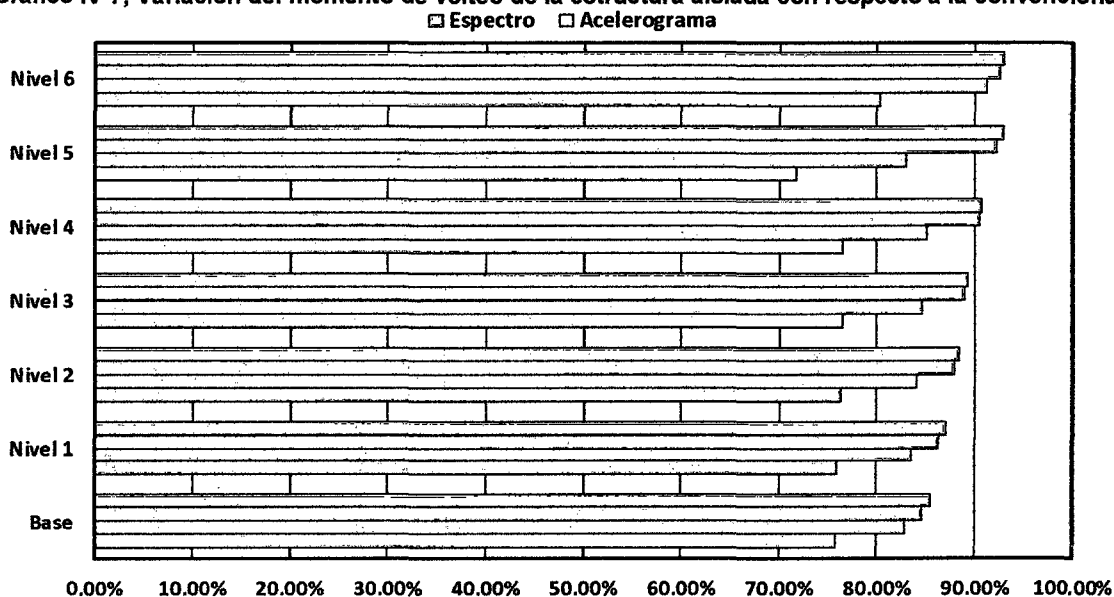
Tabla IV.16, Variación del momento de volteo de la estructura aislada con respecto a la convencional.

Nivel	Espectro		Acelerograma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Nivel 6	92.99%	92.66%	91.25%	80.25%
Nivel 5	92.98%	92.35%	83.15%	71.82%
Nivel 4	90.80%	90.58%	85.19%	76.53%
Nivel 3	89.32%	88.96%	84.66%	76.51%
Nivel 2	88.38%	87.88%	84.20%	76.30%
Nivel 1	87.11%	86.40%	83.57%	76.02%
Base	85.54%	84.59%	82.90%	75.78%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De lo anterior se tiene:

Gráfico IV-7, Variación del momento de volteo de la estructura aislada con respecto a la convencional.



Fuente: Hoja de cálculo.
 Elaboración: El Autor.

Obviamente el momento de volteo que está en relación con la fuerza cortante, también descendió, de un 75% hasta un 93%, garantiza que los aisladores estén bajos cargas de tracción permisibles.

IV.1.2.6 Verificación de elementos estructurales

Con respecto a este ítem tenemos que el edificio convencional y el aislado no tienen esfuerzos que no puedan ser soportados por sus elementos estructurales, esto se muestra en el Apéndice 6 Verificación de elementos estructurales.



CONCLUSIONES

De la presente investigación se ha concluido lo siguiente:

1. Una estructura aislada de configuración regular, tiene una mejor respuesta sísmica que una convencional, logrando una muy superior protección sísmica tanto en los elementos estructurales como en su contenido, brindando mayores niveles de seguridad, que permiten cumplir sin problemas con sus objetivos funcionales.
2. Al medir y comparar los parámetros de respuesta sísmica, del modelo de edificio hospitalario con aislación sísmica de base y sin aislación, se obtuvo que:
 - El desplazamiento lateral, se reduce desde un 2% en el piso uno hasta un 51% en el piso seis.
 - La aceleración, se reduce desde un 60% en el piso uno hasta un 93% en el piso seis.
 - La fuerza cortante y el momento de volteo se reducen desde un 75% en el piso uno hasta un 93% en el piso seis.
 - La participación de masa aumenta en las direcciones principales, alcanzando porcentajes por encima del 95% en los tres primeros modos.
3. El uso de aisladores sísmicos de base en un edificio destinado a brindar servicios de salud mejora su respuesta sísmica con respecto a un edificio convencional.



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda una posterior investigación la cual deberá determinar criterios a usar en la aislación de edificaciones de configuración asimétrica, ya que los aisladores amplifican la torsión que se produce a nivel de la interfaz de aislación.
2. Se recomienda una ulterior investigación para determinar mapas de riesgo sísmico en el Perú para períodos cortos y periodos largos con un 1% de probabilidad de excedencia en 50 años.
3. En edificios diseñados con aisladores elastoméricos de núcleo plomo se recomienda lograr un periodo objetivo de 2.5 a 3.0 segundos, para lograrlo se deberá manipular el diámetro del núcleo de plomo y el número de capas de goma en el aislador, tratando de obtener un resultado lo más cercano al periodo señalado.



BIBLIOGRAFÍA

1. Abid-Ramezani, Hamidréza, Abdoreza Moghadam, y Mansour Ziyacifar. «Assessment of a technique for the torsional response reduction of seismic isolated asymmetric structures.» *Journal of Applied Sciences* 9, 2009: 2653-2670.
2. Aguiar Falconí, Roberto, Peter Dechent A., José Luis Almazán, y Vinicio Suárez. *Aisladores de Base Elastoméricos y FPS*. Primera. Quito: Centro de Investigaciones Científicas de la escuela Politécnica del Ejército, 2008.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. Washinton D.C.: AASHTO Publications., 2010.
4. American Concrete Institute - ACI. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11)*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2011.
5. American Society for Civil Engineers, Structural Engineer Institute. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia: ASCE Publications, 2010.
6. Castillo Aedo, Jorge L., y Jorge E. Alva Hurtado. «Peligro Sísmico en el Perú.» Paper, Lima, Universidad Nacional de Ingeniería - CISMID, Lima, 1993, 19.
7. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca. «Reglamento de Graduación y Titulación de la Facultad de Ingeniería.» Cajamarca, s.f.
8. Fernández Dávila, Víctor. *Análisis Estructural de un Edificio Aislado Sísmicamente y Diseño de su Sistema de Aislamiento*. Paper, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima: Sin editorial, 2010.
9. Hernández Sampieri, Roberto, Roberto Fernández Collado, y Pilar Baptista



- Lucio. *Metodología de la investigación*. Sexta. Mexico D.F.: McGraw-Hill/Interamericana editores, 2014.
10. Higashino, Masahiko, y Shin Okamoto. *Response control and seismic isolation of buildings*. Primera. Editado por Masahiko Higashino, & Shin Okamoto. New York: Taylor & Francis, 2006.
 11. INDECI. *Riesgo Sísmico y Medidas de Reducción del Riesgo en el Centro Histórico de Lima*. Lima: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2011.
 12. Instituto Nacional de Normalización. *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. NCh 2745 of 2003*. Primera. 2003.
 13. International Council of Building Officials. *Uniform Building Code - UBC*. Whittier, California: International Council of Building Officials, 1997.
 14. Kelly, Trevor E. *Base Isolation Of Structures, Design Guidelines*. Wellington: Holmes Consulting Group Ltd, 2001.
 15. Korswagen Eguren, Paul Alexander, Julio César Arias Ricse, y Pamela Grace Huaranga Huamaní. *Análisis y Diseño de Estructuras con Aisladores Sísmicos en el Perú*. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima: Sin editorial, 2012.
 16. Mayes, Ronald L., y Farzad Naeim. *Design of structures whith seismic isolation*. Vol. I, cap. 14 de *Seismic Design Handbook*, de Varios autores, editado por Fazard Naeim, 726-756. Springer, 2001.
 17. *Norma Técnica E.030 Diseño Sismo Resistente*. Lima: El Peruano, 2006.
 18. Piscoya Hermoza, Luis. *El proceso de la investigación científica. Un caso y glosarios*. Editado por Lucas Lavado. Lima: Fondo Editorial Universidad Inca Garcilazo de la Vega, 2007.
 19. *Proyecto de Norma Técnica Sismo Resistente*. Lima: El Peruano, 2014.
 20. Rosaria Marsico, María. «Seismic isolation and energy dissipation: theoretical



- basis and applications.» Tesis doctoral, Universidad de Nápoles Federico II, Nápoles, 2008, 185.
21. Skinner, R. Ivan, Trevor E. Kelly, and William H. Robinson. *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*. Petone: Holmes Consulting Group, 2011.
 22. Skinner, R. Ivan, William H. Robinson, and Graeme H. McVerry. *An Introduction to Seismic Isolation*. Primera. Wellington: John Wiley and Sons, 1993.
 23. Solano Camacho, Natalia Elizabeth. *Evaluación del comportamiento sísmico del sector E del Hospital Regional de Cajamarca*. Tesis, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca: Sin Editorial, 2013, 143.
 24. Tafur Chilón, Wenner Martín. *Influencia de los Aisladores Elastoméricos en el Análisis de un Prototipo de Edificio Educativo*. Tesis pregrado, Cajamarca, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca: Sin editorial, 2011, 123.
 25. Tena Colunga, Arturo, y José Luis Escamilla Cruz. «Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure.» *Engineering Structures* 24 (Diciembre 2002): 1587-1599.
 26. Turabian, Kate. *A Manual for Writers of Term Papers, Theses, and Dissertations*. Sexta. Chicago: The University of Chicago Press, 1996.
 27. Ugarte, C. C., T. J. Gallardo, E. P. Mesarina, M. E. García, y O. J. Sato. *Análisis de la vulnerabilidad sísmica en el Perú*. Lima: Ministerio de Salud (MINSU), 2007.
 28. Wilson, Edward L. *Análisis estático y dinámico de estructuras*. Cuarta. Traducido por Morrison Ingenieros. California: Computers and Structures Inc., 2004.
 29. Yeong-Bin, Yang, Chang Kuo-Chun, y Yau Jong-Dar. «Base Isolation.» En *Earthquake Engineering Handbook*, de Wai-Fah Chen, & Charles Scawthorn, 1-31. Danvers: CRC Press, 2002.



APÉNDICES

Apéndice 1.

Resultados de la estructura convencional.

En el presente, se muestran los datos del análisis de la estructura convencional hospitalaria, tomada como modelo para nuestra investigación.

1. Modos de vibración

Tabla 1.1, Modos de vibración de estructura convencional.

Modo	Período (seg)	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	0.386	0.04%	76.92%	0.01%	0.04%	76.92%	0.01%
2	0.334	67.75%	0.05%	8.67%	67.80%	76.97%	8.69%
3	0.289	8.26%	0.00%	68.07%	76.05%	76.97%	76.76%
4	0.105	0.01%	17.57%	0.00%	76.06%	94.55%	76.76%
5	0.089	14.23%	0.01%	3.92%	90.29%	94.56%	80.68%
6	0.079	4.56%	0.00%	14.09%	94.85%	94.56%	94.77%
7	0.056	0.00%	3.30%	0.00%	94.85%	97.86%	94.77%
8	0.048	2.35%	0.00%	0.68%	97.20%	97.86%	95.45%
9	0.045	0.24%	0.30%	0.90%	97.44%	98.16%	96.35%
10	0.043	0.39%	0.65%	0.53%	97.84%	98.80%	96.88%
11	0.042	0.25%	0.10%	0.19%	98.08%	98.90%	97.07%
12	0.037	0.68%	0.04%	0.00%	98.77%	98.94%	97.07%
13	0.037	0.24%	0.09%	0.01%	99.01%	99.03%	97.08%
14	0.028	0.01%	0.09%	0.00%	99.01%	99.12%	97.09%
15	0.025	0.13%	0.01%	0.05%	99.15%	99.13%	97.13%
16	0.019	0.00%	0.21%	0.00%	99.15%	99.34%	97.13%
17	0.009	0.50%	0.01%	0.01%	99.65%	99.35%	97.15%
18	0.008	0.01%	0.45%	0.00%	99.66%	99.80%	97.15%

Fuente: Etabs, Modelo Base fija.

Elaboración: El Autor.

Como se muestra de la tabla anterior, el primer modo tiene un periodo de 0.386 segundos concentrando un 76.92% de la masa esta oscilación se da en el eje "Y".

El segundo modo le corresponde al eje "X", con un periodo de 0.334 segundos y concentrando 67.75% de la masa.

El tercer modo le corresponde al rozamiento alrededor del eje "Z", con un periodo de 0.289 segundos y concentrando 68.07% de la masa.

Se tiene para las direcciones, "X e Y", una concentración de masa mayor al 90% en los 5 primeros modos de vibración. Además se puede apreciar que la



estructura no es irregular ya que los dos primeros modos corresponden a ejes traslacionales.

2. Desplazamiento lateral

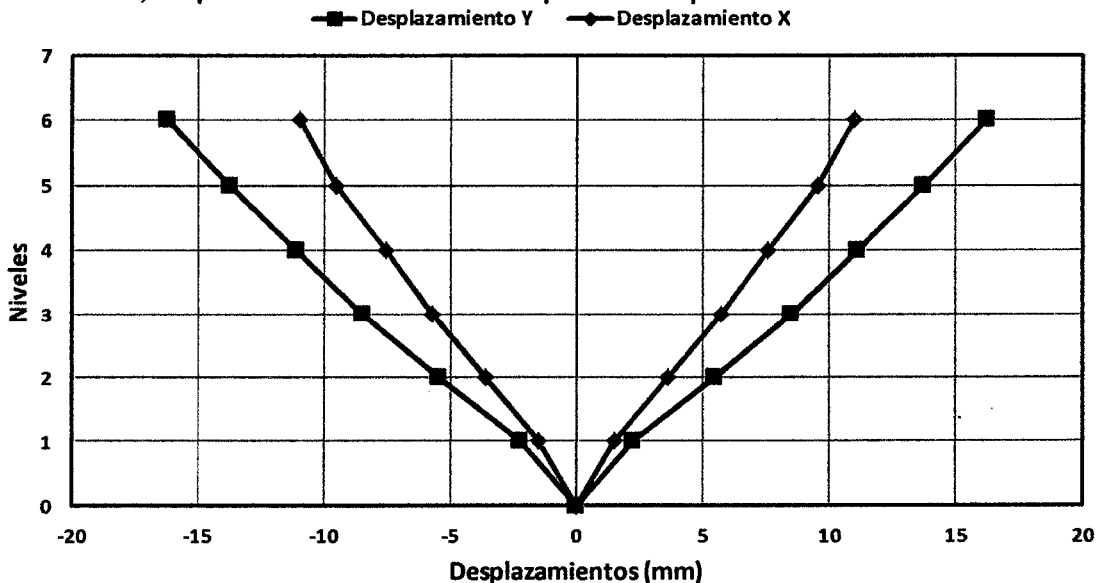
Tabla 1.2, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura convencional.

Nivel	Desplazamiento (mm)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	10.990	16.254	-10.990	-16.254
5	9.534	13.737	-9.534	-13.737
4	7.571	11.127	-7.571	-11.127
3	5.710	8.456	-5.710	-8.456
2	3.633	5.461	-3.633	-5.461
1	1.489	2.261	-1.489	-2.261
0	0	0	0	0

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
Elaboración: El Autor

De la tabla anterior se desprende la siguiente gráfica:

Gráfico 1-1, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
Elaboración: El Autor

De la gráfica y tabla anteriores se muestra que el desplazamiento máximo corresponde al eje "Y" y es de 16.254 mm, en cambio en el eje "X" viene siendo de 10.99 mm.



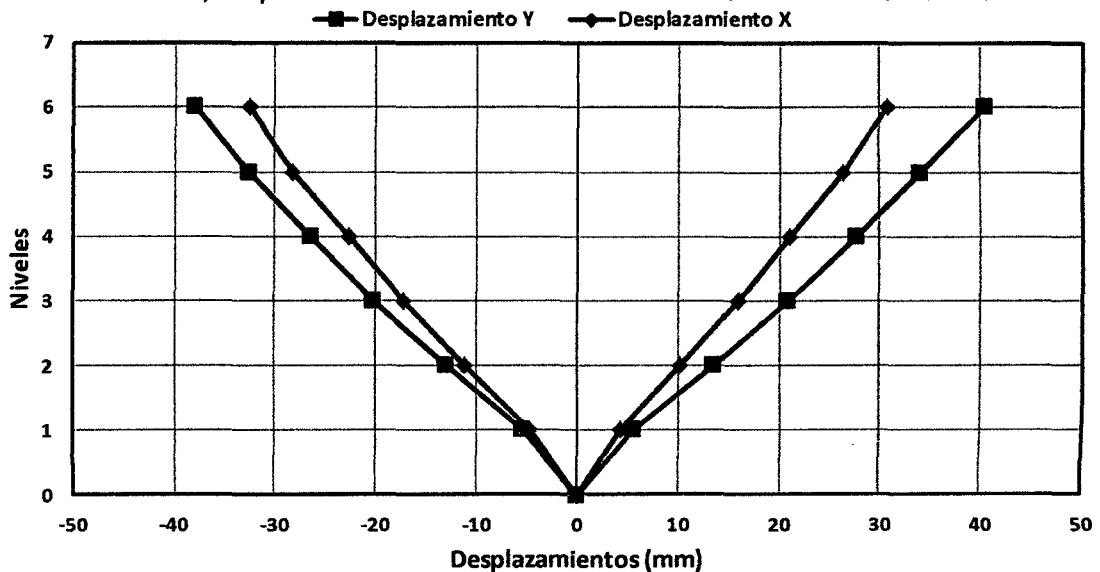
Tabla 1.3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura convencional.

Nivel	Desplazamiento (mm)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	30.775	40.488	-32.617	-37.893
5	26.378	34.087	-28.302	-32.568
4	21.050	27.652	-22.657	-26.392
3	15.922	20.912	-17.254	-20.235
2	10.210	13.558	-11.160	-12.978
1	4.241	5.524	-4.699	-5.484
0	0	0	0	0

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor

De la tabla anterior se tiene el siguiente gráfico:

Gráfico 1-2, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor

En este caso y aunque la componente de mayor intensidad (norte sur), del sismo de Ica, se encuentra en el eje "X" el máximo desplazamiento (40.488 mm), ocurre en el eje "Y" en cambio en el eje "X" tenemos un desplazamiento de: 32.617 mm.

Ica Y:

Tabla 1.4, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura convencional.

Nivel	Desplazamiento (mm)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	24.637	51.557	-25.054	-64.540

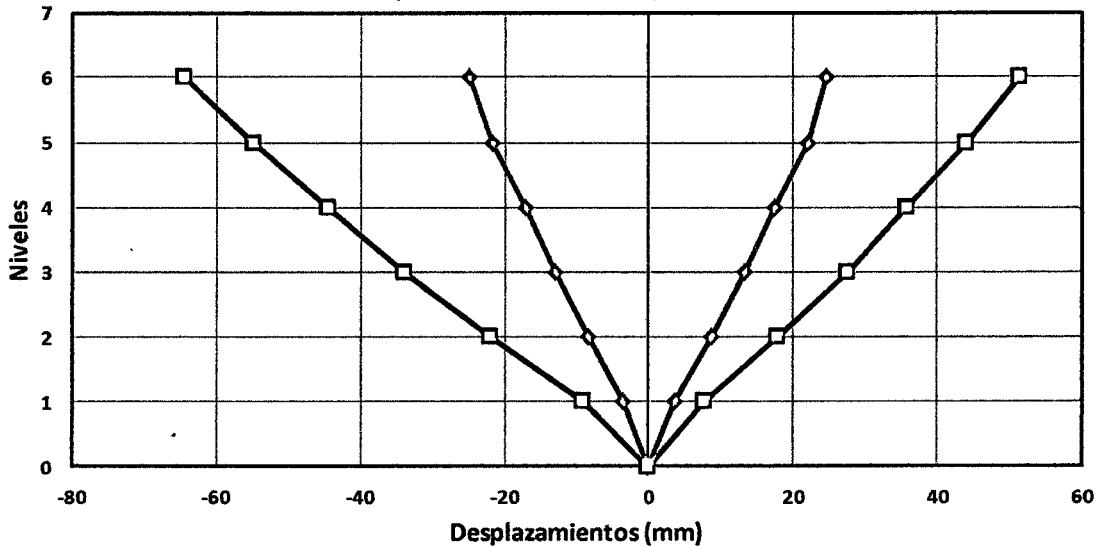


5	22.019	44.030	-21.828	-54.771
4	17.512	35.847	-17.235	-44.454
3	13.341	27.497	-13.023	-33.920
2	8.559	17.923	-8.376	-21.955
1	3.554	7.662	-3.504	-9.175
0	0	0	0	0

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor

De la tabla anterior se muestra la siguiente gráfica:

Gráfico 1-3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura convencional.
 —□— Desplazamiento Y —◇— Desplazamiento X



Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor.

Se observa que para el sismo de Ica con su componente principal, norte-sur en dirección del eje "Y" se tiene un desplazamiento máximo de 64.54 mm en el eje "Y" y en el eje "X" el desplazamiento en el último piso es de: 25.054 mm.

3. Aceleración

Espectro de respuesta:

Tabla 1.5, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura convencional.

Nivel	Aceleración (g)	
	X	Y
6	0.5504	0.6150
5	0.4605	0.4097
4	0.3410	0.3071
3	0.2670	0.2466
2	0.2244	0.2059

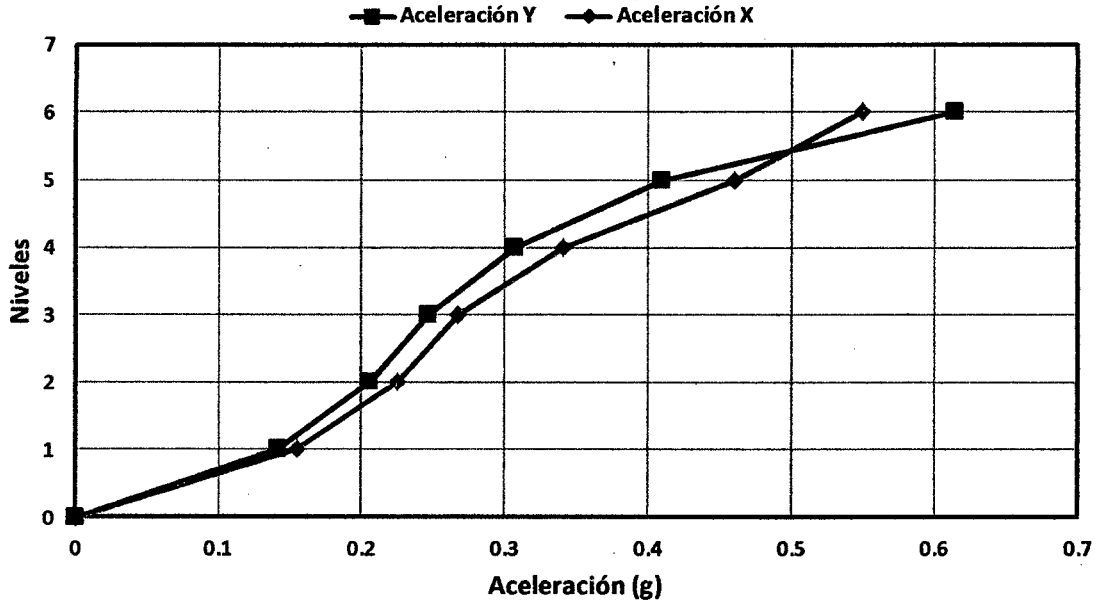


1	0.1546	0.1418
0	0.0000	0.0000

Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

De la tabla anterior se tiene la siguiente gráfica:

Gráfico 1-4, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

Se puede apreciar que la aceleración se amplifica a medida que se asciende de nivel, teniendo finalmente una aceleración máxima de 61.5% de la gravedad.

La aceleración producida por el sismo ocurrido de Ica es:

Tabla 1.6, Aceleración debido al sismo de IcaX en estructura convencional.

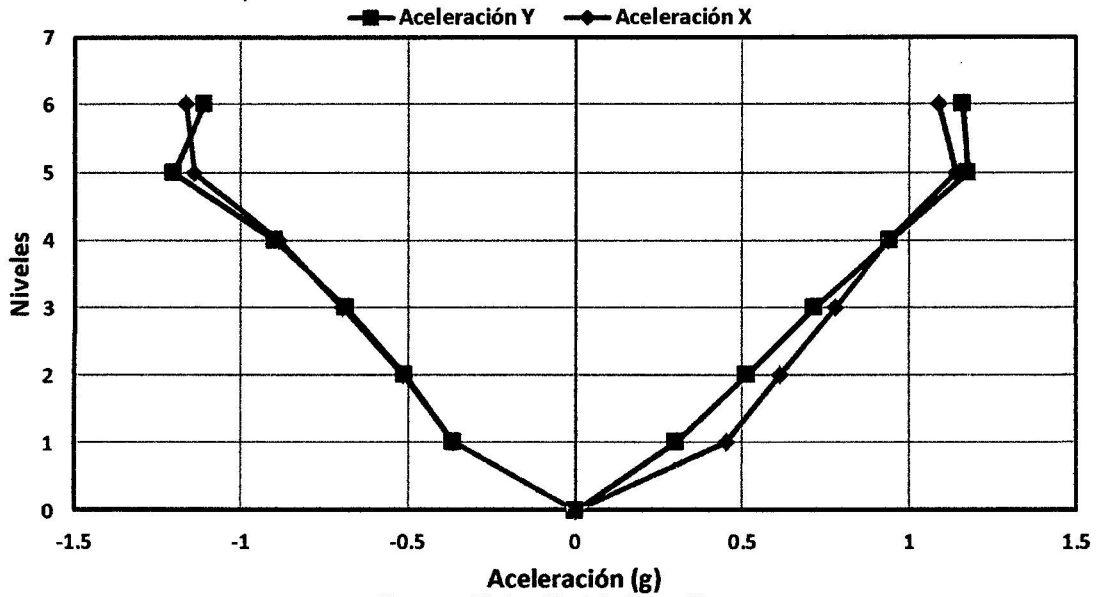
Nivel	Aceleración (g)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	1.0873	1.1624	-1.1667	-1.1132
5	1.1429	1.1763	-1.1425	-1.2057
4	0.9389	0.9445	-0.8898	-0.8987
3	0.7787	0.7168	-0.6986	-0.6849
2	0.6151	0.5124	-0.5148	-0.5103
1	0.4535	0.3045	-0.3645	-0.3643
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

La grafica a la tabla anterior se muestra a continuación:



Gráfico 1-5, Aceleración debido al sismo de IcaX en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

La aceleración máxima obtenida en el eje "X" es de 116.67% de la gravedad, mientras que en el eje "Y" es de: 117.67%.

Tabla 1.7, Aceleración debido al sismo de IcaY en estructura convencional.

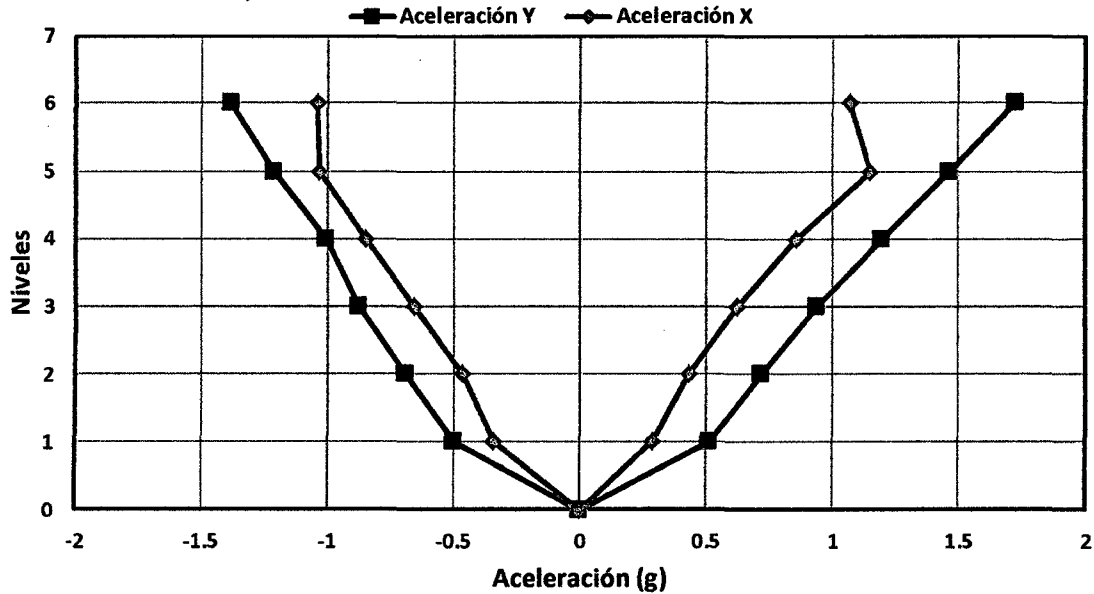
Nivel	Aceleración (g)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	1.0645	1.7263	-1.0385	-1.3840
5	1.1470	1.4625	-1.0335	-1.2134
4	0.8530	1.1939	-0.8498	-1.0091
3	0.6226	0.9362	-0.6554	-0.8776
2	0.4322	0.7155	-0.4659	-0.6951
1	0.2872	0.5114	-0.3415	-0.5002
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

A continuación se muestra la gráfica obtenida a partir de la tabla anterior:



Gráfico 1-6, Aceleración debido al sismo de IcaY en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

Se muestra que los valores de aceleración son: 114.70% y 172.63% en los ejes "X" e "Y" respectivamente.

4. Cortante basal de la estructura

Tabla 1.8, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.

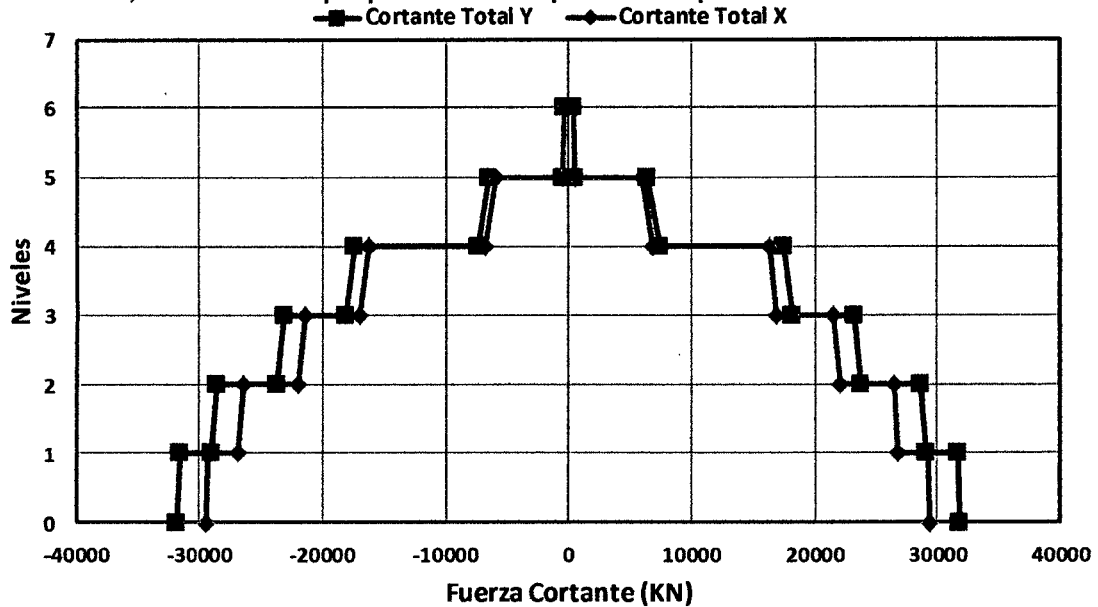
Nivel	Ubicación	Cortante (KN)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	325.416	383.439	-325.416	-383.439
	Abajo	465.715	543.217	-465.715	-543.217
5	Arriba	6005.030	6446.941	-6005.030	-6446.941
	Abajo	6869.813	7380.482	-6869.813	-7380.482
4	Arriba	16300.578	17488.406	-16300.578	-17488.406
	Abajo	16936.349	18180.762	-16936.349	-18180.762
3	Arriba	21509.161	23170.357	-21509.161	-23170.357
	Abajo	22030.195	23743.866	-22030.195	-23743.866
2	Arriba	26490.804	28634.803	-26490.804	-28634.803
	Abajo	26869.108	29054.077	-26869.108	-29054.077
1	Arriba	29282.110	31713.867	-29282.110	-31713.867
	Abajo	29439.928	31884.459	-29439.928	-31884.459

Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

La grafica de la tabla anterior es:



Gráfico 1-7, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.



Como se puede apreciar la cortante es mayor en la base de la estructura, teniendo un valor de 29439.928 KN en el eje "X" y de 31884.459 KN en el eje "Y".

Sismo de Ica:

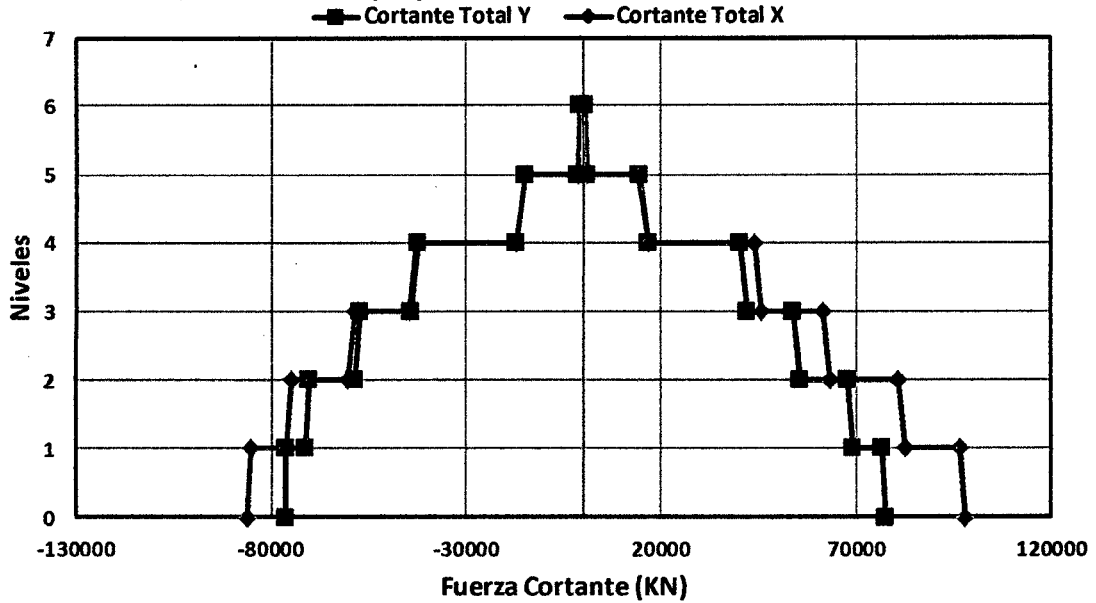
Tabla 1.9, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaX en estructura convencional.

Nivel	Ubicación	Cortante (KN)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	674.811	766.544	-732.583	-732.339
	Abajo	988.737	1108.431	-1062.041	-1069.597
5	Arriba	14318.938	14467.452	-14753.669	-14634.472
	Abajo	16620.749	16651.162	-16975.184	-16907.807
4	Arriba	43915.536	40513.531	-42673.191	-42438.733
	Abajo	45908.780	42137.243	-44540.289	-44216.141
3	Arriba	61463.081	54008.165	-58635.626	-57093.799
	Abajo	63399.958	55495.888	-60322.231	-58558.894
2	Arriba	80953.395	67947.146	-74809.903	-70112.123
	Abajo	82608.729	69036.754	-76096.770	-71007.815
1	Arriba	96534.365	77059.607	-85208.177	-75994.281
	Abajo	98247.285	77858.056	-86112.847	-76306.694

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor



Gráfico 1-8, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaX en estructura convencional.



Como se puede apreciar la cortante es mayor en la base de la estructura, teniendo un valor de 98247.285 KN en el eje "X" y de 77858.056 KN en el eje "Y".

Ica Y

Tabla 1.10, Fuerza cortante por piso debido a sismo de IcaY en estructura convencional.

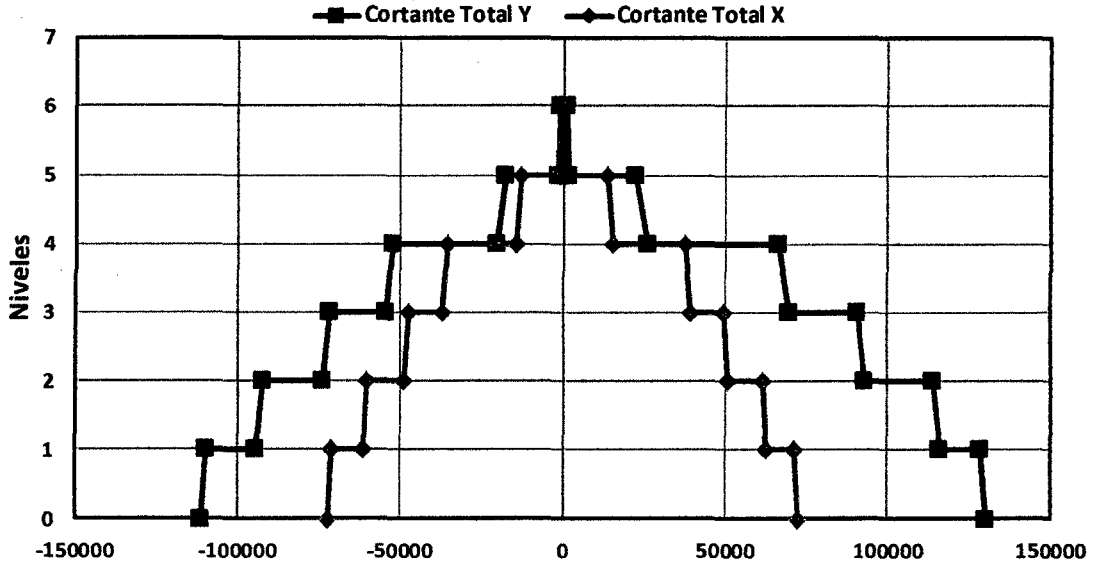
Nivel	Ubicación	Cortante (KN)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	668.290	1131.110	-646.792	-876.936
	Abajo	967.067	1649.016	-935.916	-1276.818
5	Arriba	13568.742	22645.028	-12709.892	-17468.227
	Abajo	15562.912	26189.234	-14631.667	-20225.036
4	Arriba	37669.461	66426.818	-35725.797	-52298.033
	Abajo	39151.774	69288.074	-37139.257	-54615.160
3	Arriba	49484.836	90559.440	-47586.843	-71915.592
	Abajo	50562.239	93070.296	-48933.590	-73959.577
2	Arriba	61283.152	114149.714	-60566.766	-92458.155
	Abajo	62443.791	115993.696	-61589.242	-94433.108
1	Arriba	71125.456	128761.299	-71190.467	-109904.000
	Abajo	72062.332	130026.207	-72509.313	-111544.000

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor.

El grafico se muestra a continuación:



Gráfico 1-9, Fuerza cortante por piso debido a sismo de lcaY en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor.

Como se puede apreciar la cortante es mayor en la base de la estructura, teniendo un valor de 72509.313 KN en el eje "X" y de 130026.207 KN en el eje "Y".

5. Momento de volteo

Tabla 1.11, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.

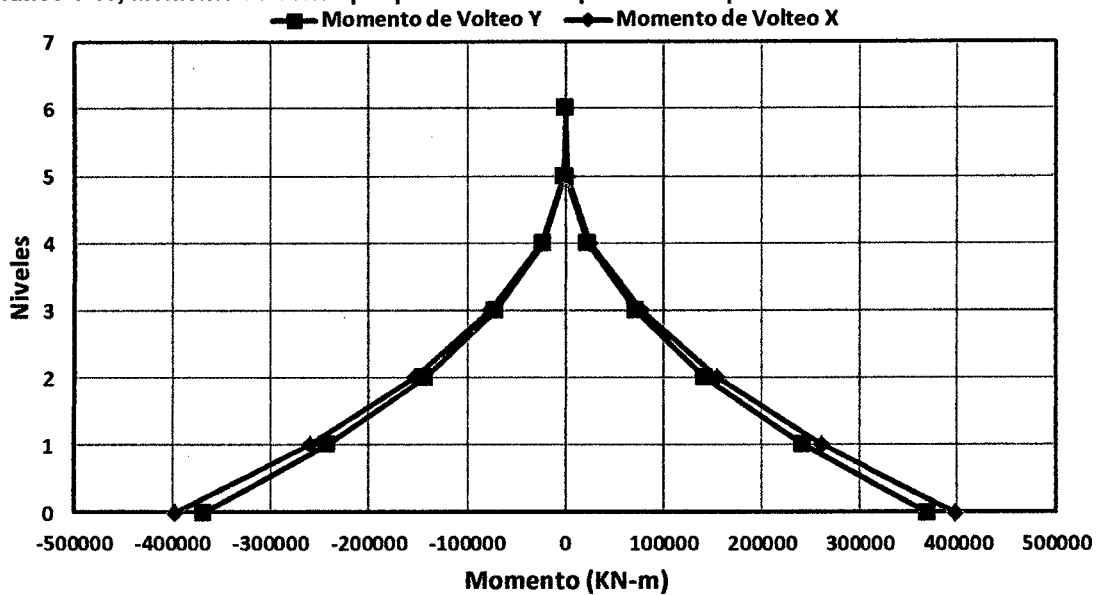
Nivel	Ubicación	Momento de Volteo (KN-m)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	5.674E-07	1.363E-06	-5.674E-07	-1.363E-06
	Abajo	1491.316	1271.422	-1491.316	-1271.422
5	Arriba	1491.317	1271.422	-1491.317	-1271.422
	Abajo	24279.354	22532.229	-24279.354	-22532.229
4	Arriba	24279.354	22532.229	-24279.354	-22532.229
	Abajo	77254.337	71974.169	-77254.337	-71974.169
3	Arriba	77254.335	71974.169	-77254.335	-71974.169
	Abajo	153744.087	143033.152	-153744.087	-143033.152
2	Arriba	153744.086	143033.153	-153744.086	-143033.153
	Abajo	260605.253	241940.696	-260605.253	-241940.696
1	Arriba	260605.253	241940.696	-260605.253	-241940.696
	Abajo	398168.042	368954.868	-398168.042	-368954.868

Fuente: Etabs_Modelo Base fija.
 Elaboración: El Autor

La grafica que se desarrolla a partir de la tabla anterior es:



Gráfico 1-10, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura convencional.



Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor.

El máximo momento de volteo generado es: 398168.042 KN-m en el eje "X" y de 368954.868 KN-m en el eje "Y"

Sismo Ica

Ica X

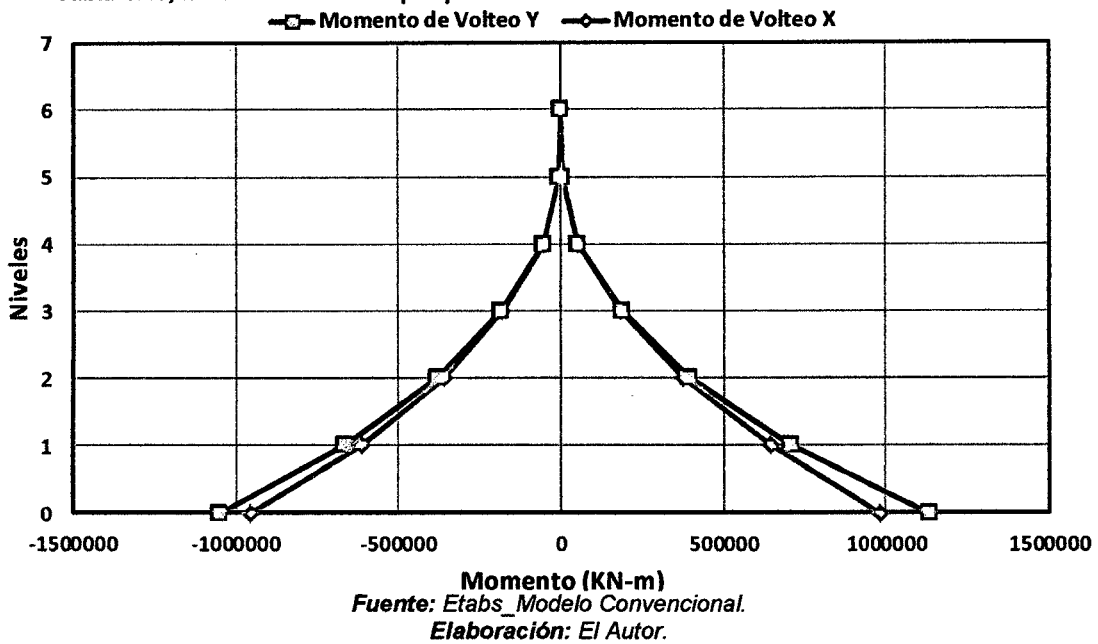
Tabla 1.12, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaX en estructura convencional.

Nivel	Ubicación	Momento de Volteo (KN-m)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	1.600E-06	4.569E-06	-1.893E-06	-3.854E-06
	Abajo	2890.723	2667.107	-3010.834	-2880.430
5	Arriba	2890.724	2667.107	-3010.835	-2880.429
	Abajo	55008.456	53713.597	-54444.878	-55319.872
4	Arriba	55008.454	53713.597	-54444.877	-55319.872
	Abajo	185090.069	188533.272	-178124.186	-184460.960
3	Arriba	185090.064	188533.271	-178124.182	-184460.957
	Abajo	375840.526	394623.066	-356748.988	-380821.030
2	Arriba	375840.523	394623.066	-356748.986	-380821.027
	Abajo	643620.745	705478.124	-613566.356	-667642.804
1	Arriba	643620.747	705478.124	-613566.358	-667642.805
	Abajo	982640.619	1133086.635	-955921.480	-1048969.901

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor.



Tabla 1.13, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaX en estructura convencional.



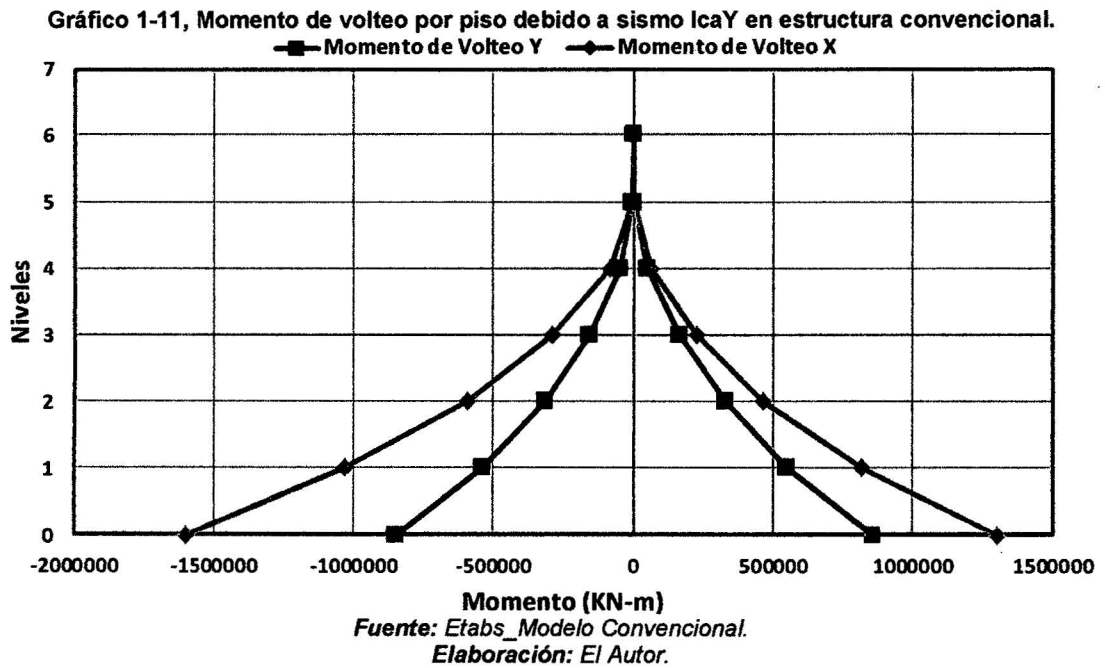
El máximo momento de volteo generado es: 982640.619 KN-m en el eje "X" y de 1133086.635 KN-m en el eje "Y"

Ica Y:

Tabla 1.14, Momento de volteo por piso debido a sismo IcaY en estructura convencional.

Nivel	Ubicación	Momento de Volteo (KN-m)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	2.125E-06	4.877E-06	-2.025E-06	-1.000E-05
	Abajo	3456.106	2625.308	-4460.543	-2540.703
5	Arriba	3456.107	2625.308	-4460.544	-2540.703
	Abajo	65724.870	50782.745	-85143.262	-47703.931
4	Arriba	65724.868	50782.748	-85143.260	-47703.933
	Abajo	225047.252	165075.521	-288713.732	-157089.153
3	Arriba	225047.245	165075.525	-288713.723	-157089.155
	Abajo	465849.057	330255.229	-591835.424	-313828.746
2	Arriba	465849.054	330255.232	-591835.420	-313828.748
	Abajo	819045.078	552288.735	-1029265.267	-541779.820
1	Arriba	819045.080	552288.734	-1029265.270	-541779.819
	Abajo	1302461.010	859074.638	-1605262.072	-849583.269

Fuente: Etabs_Modelo Convencional.
 Elaboración: El Autor.



El máximo momento de volteo generado es: 1605262.072 KN-m en el eje "X" y de 859074.638 KN-m en el eje "Y"



Apéndice 2.

Catálogo de aisladores elastoméricos.

DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS

Isolator Engineering Properties

Metric Units

DEVICE SIZE				MOUNTING PLATE DIMENSIONS						
Isolator Diameter, D_1 (mm)	Isolator Height, H (mm)	Number of Rubber Layers, N	Lead Diameter D_L (mm)	L (mm)	t (mm)	Hole Qty.	Hole ϕ (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	

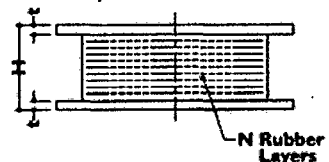
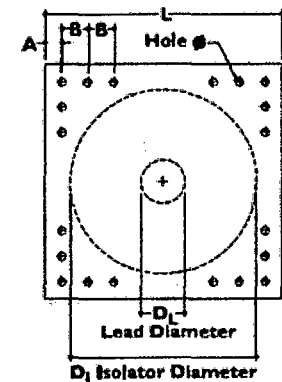
(1) The axial load capacities provided correspond to maximum displacements based on design limits of 250% rubber shear strain or 2/3 the Isolator diameter. An Isolator's actual displacement and load capacity are dependent on the rubber modulus and number of rubber layers.

(2) Rubber Shear Moduli (G) are available from 0.38 N/mm² to 0.70 N/mm².

(3) Elastic Stiffness (Ke) for analytical modeling may be taken as 10-times the yielded stiffness (Kd).

(4) Kd range shown in table is typical for most projects. If needed for specific projects, Kd values up to three times the maximum shown in the range can be achieved by limiting the displacement capacity to 2/3 of the shown value.

Isolator Diameter, D_1 (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	0.2-0.4	0-65	>50	150	450
355	0.2-0.4	0-65	>100	150	700
405	0.3-0.5	0-110	>100	200	900
455	0.3-0.7	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-0.7	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-0.9	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-1.1	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-1.4	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-1.6	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-1.6	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-1.8	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-1.9	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-2.0	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-2.0	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-2.1	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-2.1	0-665	>2,600	760	13,800
1260	1.2-2.3	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-2.5	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-2.5	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-2.5	0-1,025	>6,500	910	40,000



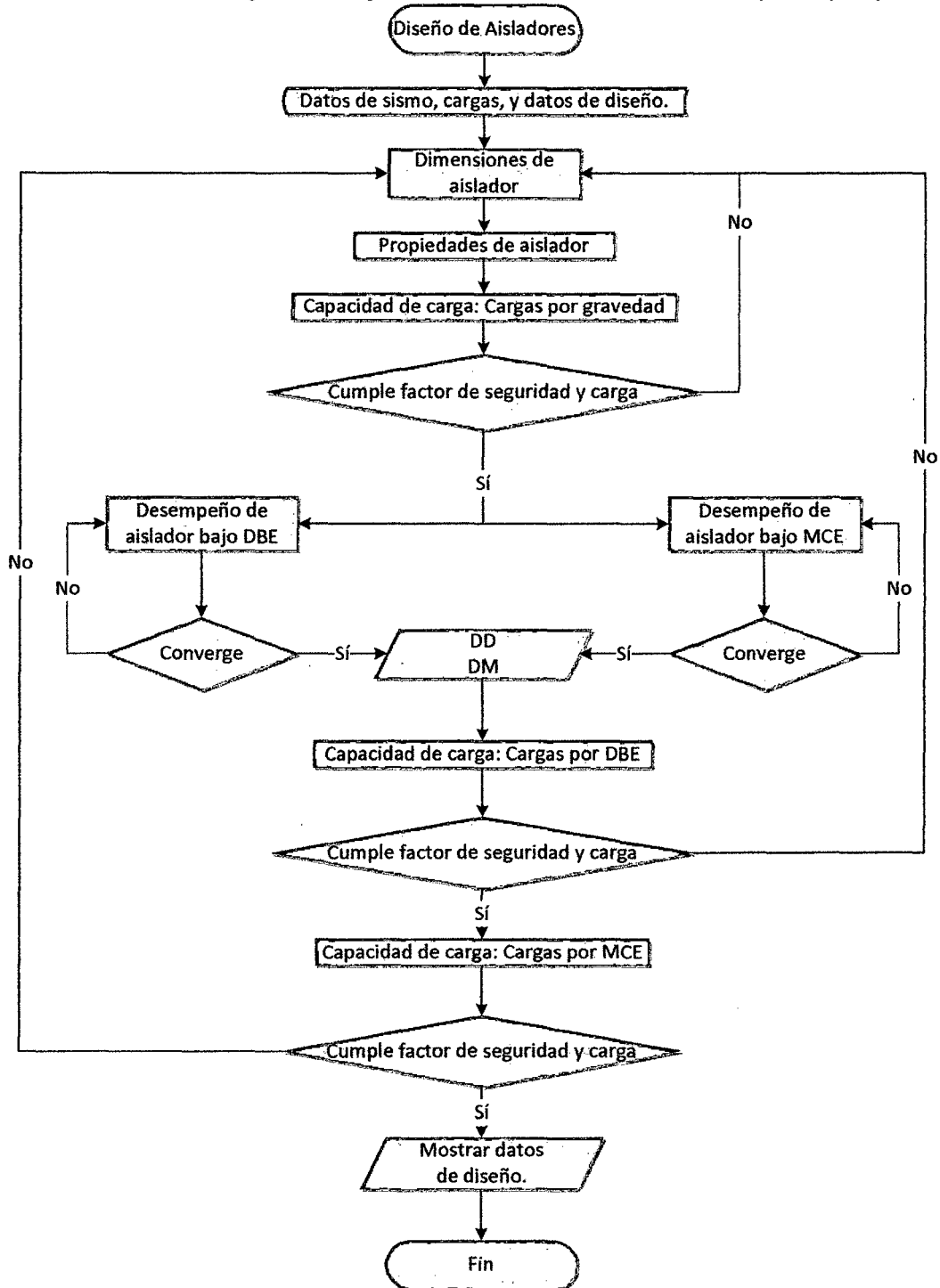


Apéndice 3.

Procedimiento de diseño para aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

El procedimiento se detalla mediante el siguiente diagrama de flujo:

Ilustración 3-1, Diagrama de flujo de diseño de aislador con núcleo de plomo (LRB).

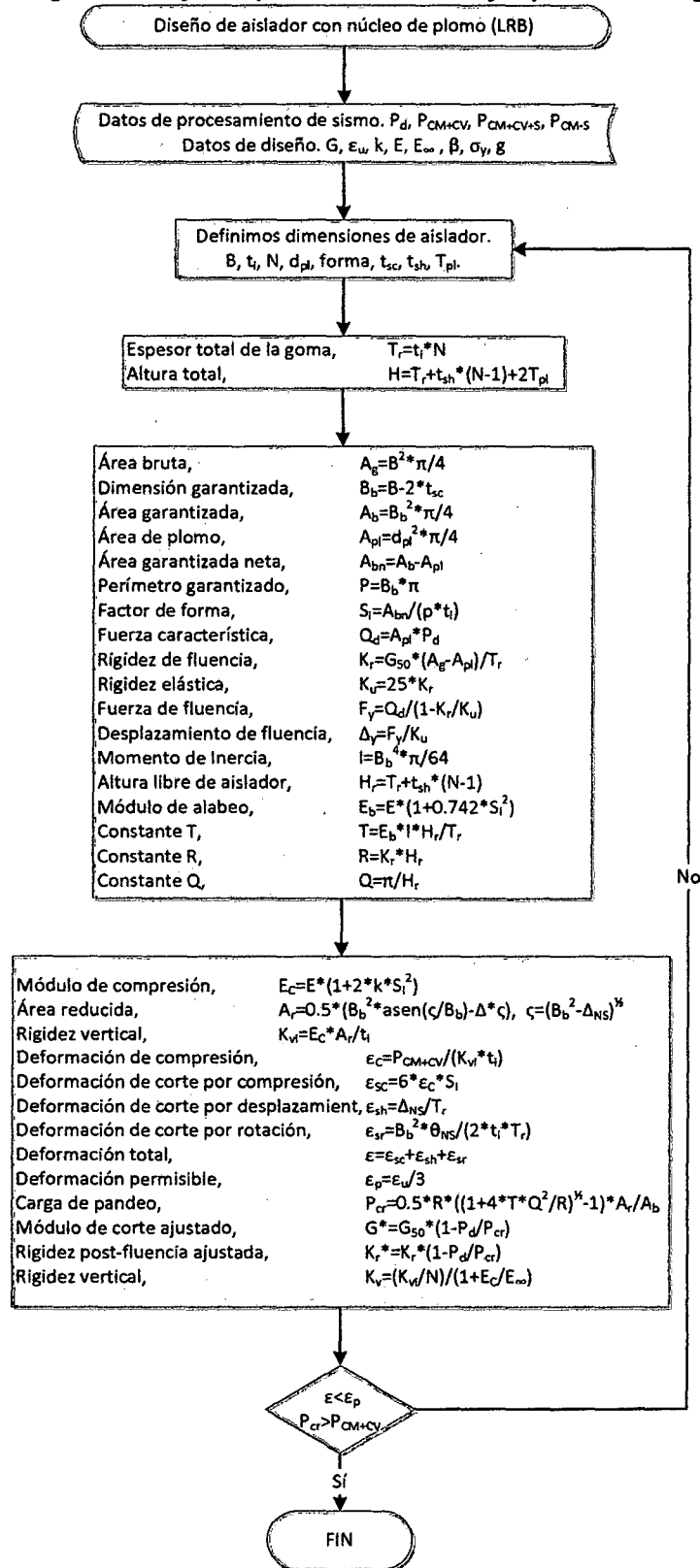


Fuente: Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers.
Elaboración: El Autor.



Propiedades del aislador y la capacidad de carga vertical: cargas por gravedad.

Ilustración 3-2, Diagrama de flujo: Propiedades de aislador y capacidad de carga por gravedad.



Fuente: Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers.
 Elaboración: El Autor.



Las dimensiones mínimas para los aisladores de tipo elastomérico son requeridas por las cargas máximas de gravedad. El factor de seguridad (F.S.) de gravedad, a cero desplazamientos, debe ser por lo menos 3 para ambos estados límite de deformación y pandeo.

El procedimiento de diseño requiere unas dimensiones en planta tal que el factor de seguridad sea logrado. En la práctica, la demanda sísmica es tal que el F.S. por gravedad es mayor a 3. Un buen punto es empezar con este factor superior a 5.

El espesor de las capas de goma es generalmente constante en 10 mm, este espesor provee de un buen confinamiento para el núcleo de plomo y es suficientemente delgado para lograr alta capacidad de carga vertical. Si las cargas verticales son críticas, entonces se puede reducir este grosor a 8 mm o incluso 6 mm, pero estos espesores se deben chequear con las compañías especializadas.

El espesor de la capa de goma usualmente no debe de exceder 10 mm para aisladores de tipo LRB, en cambio en aisladores tipo HDR y elastoméricos, capas gruesas de gomas se usan ampliamente (por encima de 15 mm). La capacidad de carga decrece dramáticamente mientras más gruesa sea la capa de goma.

El número de capas define la flexibilidad del sistema. Este necesita ser tal que el periodo este dentro del rango deseado y que la deformación máxima por corte no sea excesiva. Esto se logra probando y errando. El objetivo es mantener la deformación por debajo de 150% bajo el máximo desplazamiento (200% para HDR) y que el espesor total de la goma debe estar en un rango estimado del desplazamiento total dividido entre 1.5 y 2.

Un incremento del número de capas, decrece la capacidad de carga de pandeo, por lo tanto ante un incremento de las capas de goma es necesario un incremento en las dimensiones de planta. El factor de seguridad de deformación recomendado, bajo cargas de gravedad máximas, está en el rango de 4 o 5.

El tamaño del núcleo de plomo en los aisladores LRB define la cantidad de amortiguamiento del sistema. La relación de Q_D/W es calculada y debe de estar entre 3%, en zonas sísmicas bajas, y 10% o más, en zonas sísmicas altas.



Usualmente a mas suavidad del suelo, mayor nivel de fluencia para una zona sísmica dada.

La forma en planta del aislador usualmente es circular para edificios, esta forma se considera la mejor para las cargas horizontales en cualquier dirección. Cuadradas y rectangulares son más utilizados en puentes, ya que estas formas son espacio-eficientes.

Con las propiedades del aislador se calculan la capacidad de carga: capacidad de carga de gravedad. Para cargas por gravedad en zonas de alta sismicidad el factor de seguridad debería ser 4 o 5 a cero desplazamientos, este factor se va ajustando.

El análisis analítico incluye un ajuste empírico de la rigidez de fluencia, k_r , como una función de la relación de la carga aplicada y de la carga de pandeo. Esto ha sido incorporado por la observación de la rigidez del examen de prototipos en cargas verticales variadas.

La rigidez vertical no es usada directamente como parte del procedimiento de diseño y evaluación, pero es requerido para el análisis. Puede usarse para calcular las deflexiones verticales en los dispositivos al momento de la instalación.

Calculo de desempeño sísmico de aislador.

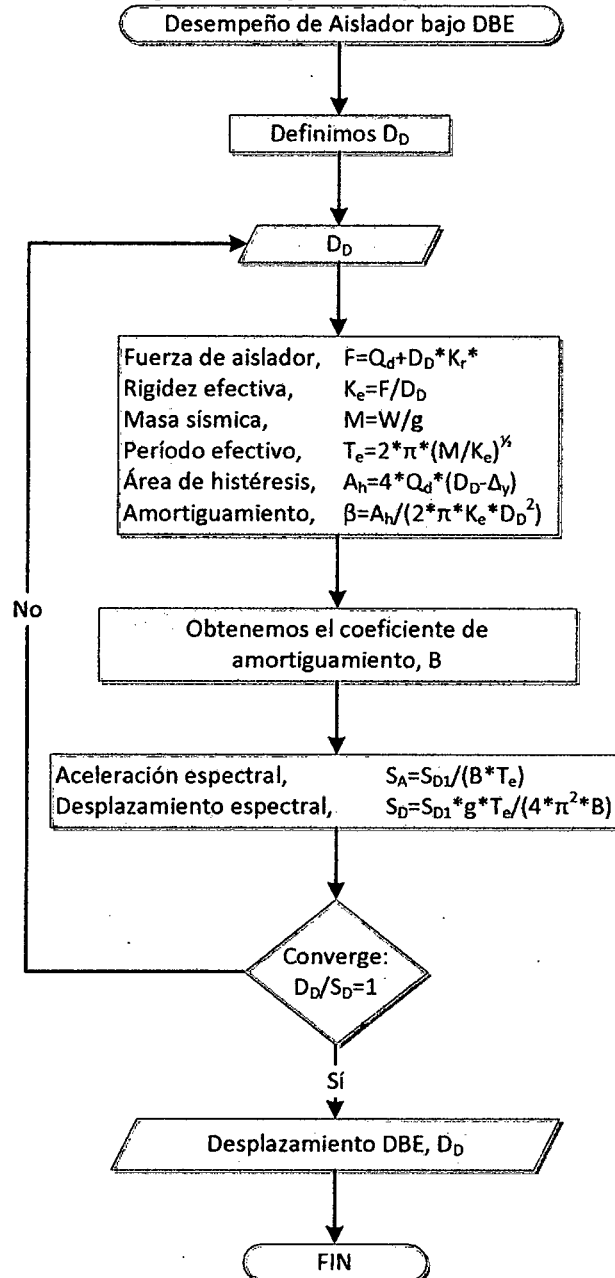
Los pasos para el diseño del aislador son:

1. Un desplazamiento, Δ , es asumido (se puede asumir el total de espesor de goma como punto inicial).
2. La fuerza máxima en cada aislador, F , es calculado para este desplazamiento.
3. La rigidez efectiva para cada dispositivo, a este desplazamiento, es calculado como F/Δ ,
4. El periodo se calcula usando la masa sísmica total y la rigidez efectiva.
5. El amortiguamiento viscoso equivalente se calcula del área de la curva de histéresis. Para HDR el amortiguamiento y el módulo de corte son interpolados de la tabla para estas cantidades versus la deformación de corte.



6. El factor de amortiguamiento, B , es calculado a partir del amortiguamiento viscoso equivalente.
7. El desplazamiento espectral es calculado a partir de la aceleración.
8. El desplazamiento es comparado con el asumido en el primer paso, si no se encuentra la convergencia se asume otro desplazamiento.

Ilustración 3-3, Diagrama de flujo: Desempeño de aislador bajo DBE.

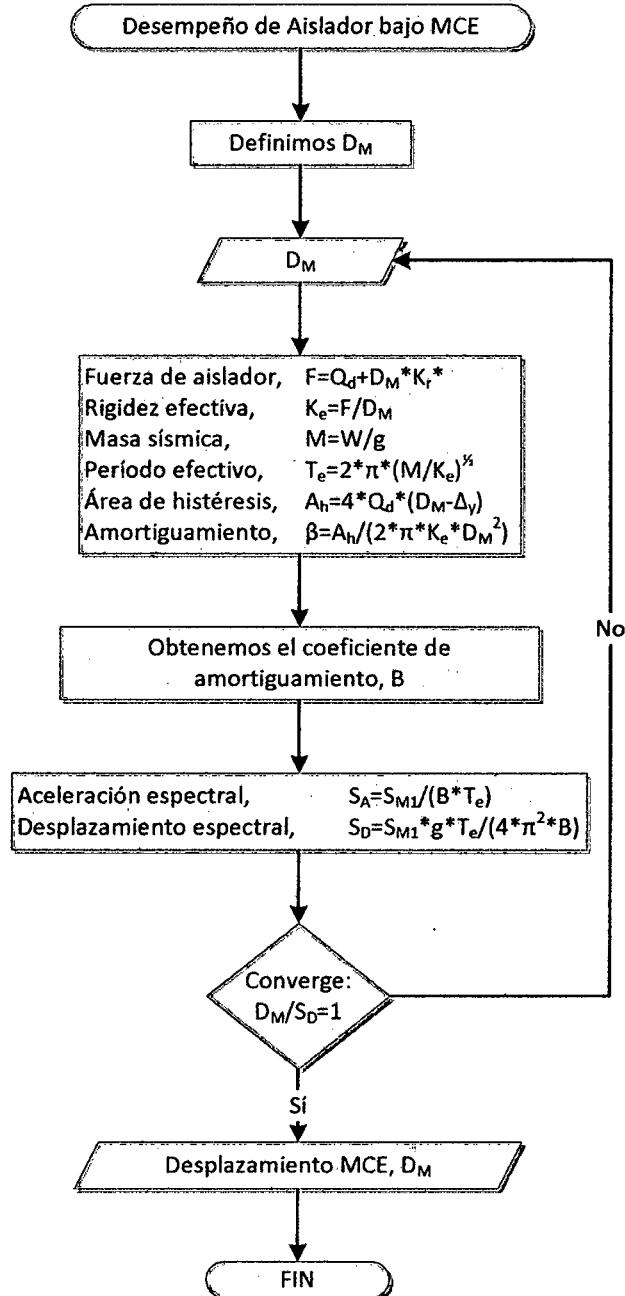


Fuente: Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers.
Elaboración: El Autor.

Para el cálculo del desempeño bajo el sismo MCE se desarrollan los mismos pasos.



Ilustración 3-4, Diagrama de flujo: Desempeño de aislador bajo MCE.



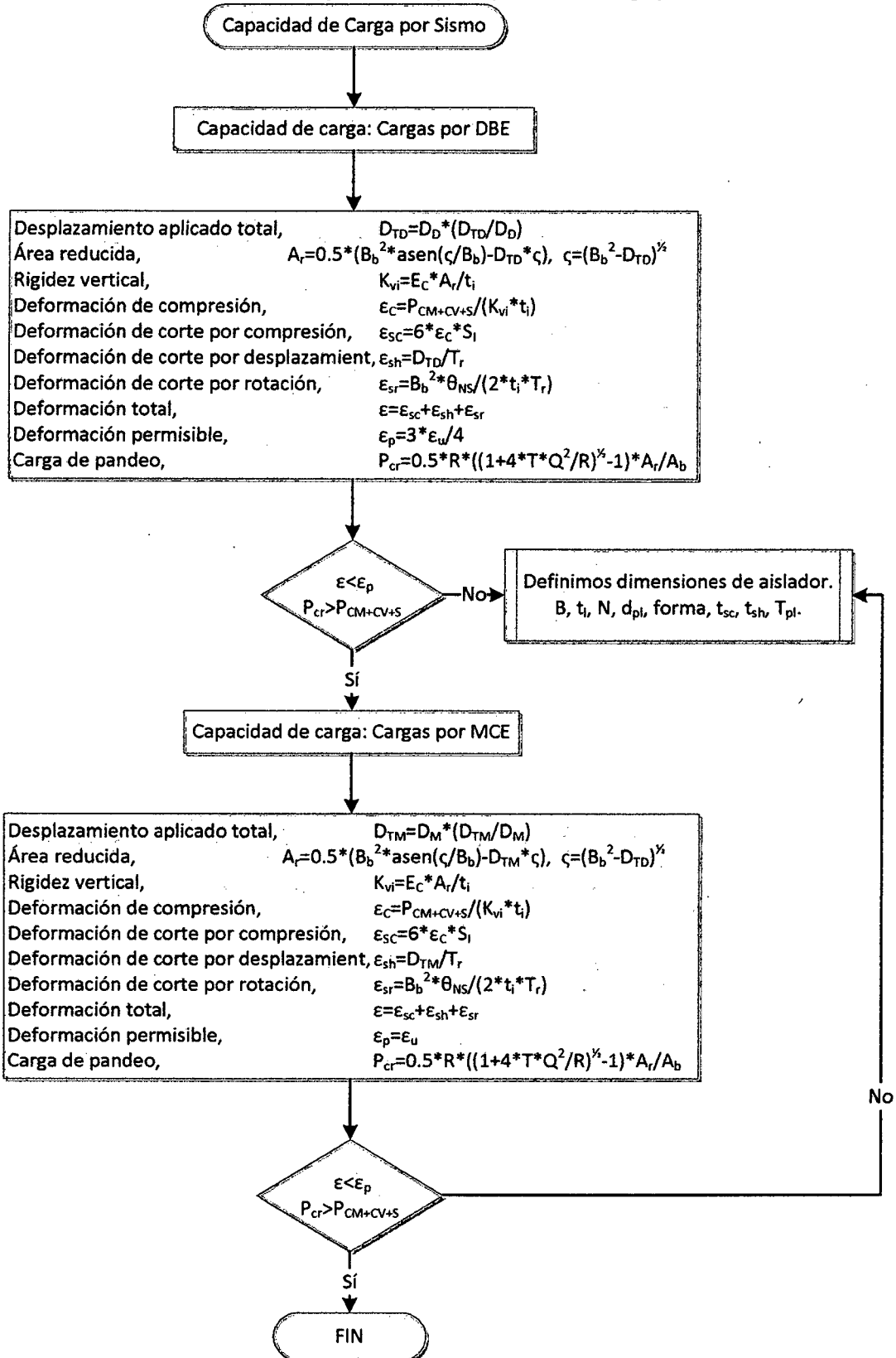
Fuente: *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers.*
Elaboración: El Autor.

Finalmente se comprueba la capacidad de carga bajo sismo.

Para aisladores elastoméricos la capacidad de carga vertical es función de aplicar el desplazamiento de corte y por eso la capacidad debe ser verificada usando los mismos procedimientos que para la carga por gravedad. Si no cumple, se define nuevamente las dimensiones del aislador.



Ilustración 3-5, Diagrama de flujo: Capacidad de carga por sismo.



Fuente: Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers.
 Elaboración: El Autor.



El factor de seguridad de gravedad debería exceder 3, para deformación y pandeo. Para zonas altamente sísmicas este factor será gobernado por el estado sísmico límite.

El factor de seguridad DBE deberá ser mínimo 1.5 de preferencia 2.0, para deformación y pandeo.

El factor de seguridad MCE deberá ser mínimo 1.25 de preferencia 1.5, para deformación y pandeo.

La relación de área reducida con respecto al área bruta, A_g , no deberá ser menor a 25% y preferentemente mayor a 30%.



Apéndice 4.

Resultados de la estructura aislada.

A continuación los resultados de la estructura aislada:

Modos de vibración:

Tabla 4.1, Modos de vibración de estructura aislada.

Modo	Período (seg)	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	2.949	0.02%	99.79%	0.06%	0.02%	99.79%	0.06%
2	2.912	99.43%	0.01%	0.52%	99.45%	99.81%	0.58%
3	2.654	0.51%	0.07%	99.36%	99.96%	99.87%	99.94%
4	0.449	0.00%	0.13%	0.00%	99.96%	100.00%	99.94%
5	0.348	0.02%	0.00%	0.04%	99.98%	100.00%	99.97%
6	0.331	0.02%	0.00%	0.03%	100.00%	100.00%	100.00%
7	0.135	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	0.088	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
9	0.083	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
10	0.083	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
11	0.068	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
12	0.056	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
13	0.053	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
14	0.050	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
15	0.046	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
16	0.044	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
17	0.040	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
18	0.022	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
19	0.009	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
20	0.009	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%
21	0.008	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Etabs, Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

Como se muestra de la tabla anterior, el primer modo tiene un periodo de 2.949 segundos concentrando un 99.79% de la masa esta oscilación se da en el eje "Y".

El segundo modo le corresponde al eje "X", con un periodo de 2.912 segundos y concentrando 99.43% de la masa.

El tercer modo le corresponde al rozamiento alrededor del eje "Z", con un periodo de 2.654 segundos y concentrando 99.36% de la masa.

Se tiene para las direcciones, "X e Y", una concentración de masa mayor al 90% en los 2 primeros modos de vibración.



Desplazamiento del centro de masa

Desplazamiento debido a espectro de respuesta E30

Tabla 4.2, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura aislada.

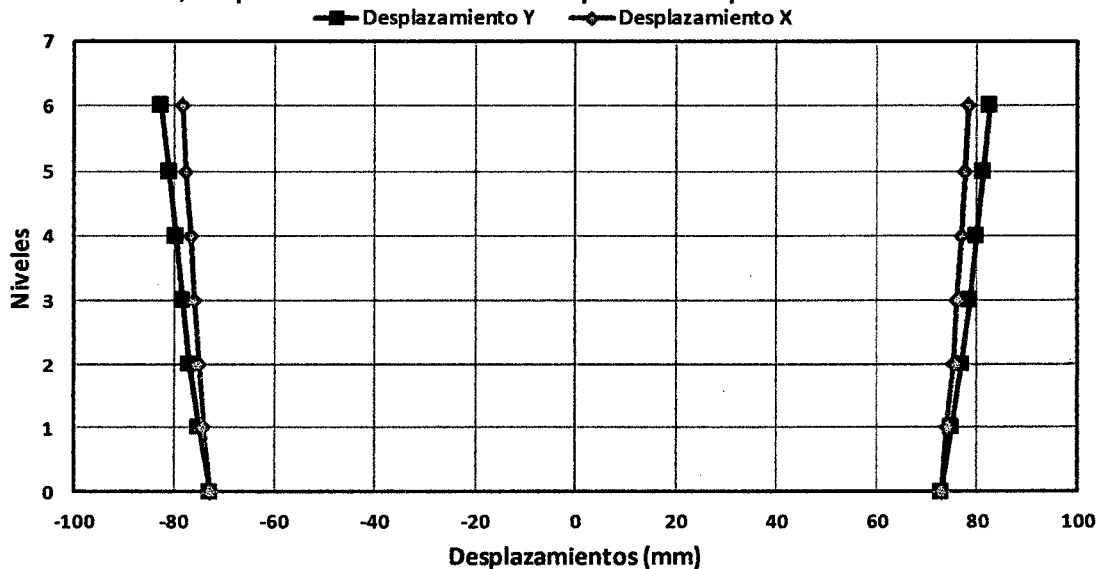
Nivel	Desplazamiento (mm)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	78.413	82.717	-78.413	-82.717
5	77.666	81.195	-77.666	-81.195
4	76.830	79.911	-76.830	-79.911
3	76.086	78.588	-76.086	-78.588
2	75.188	77.041	-75.188	-77.041
1	74.117	74.980	-74.117	-74.980
0	72.994	72.853	-72.994	-72.853

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se tiene la siguiente gráfica:

Gráfico 4-1, Desplazamiento lateral debido a espectro de respuesta en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

El desplazamiento del sistema de aislación es: 72.994 mm en el eje "X" y 72.853 mm en el eje "Y".

Y el desplazamiento en el último piso de la estructura es de: 78.413 mm y de 82.717 mm en los ejes "X" e "Y" respectivamente.

Sismo Ica



IcaX

Tabla 4.3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura aislada.

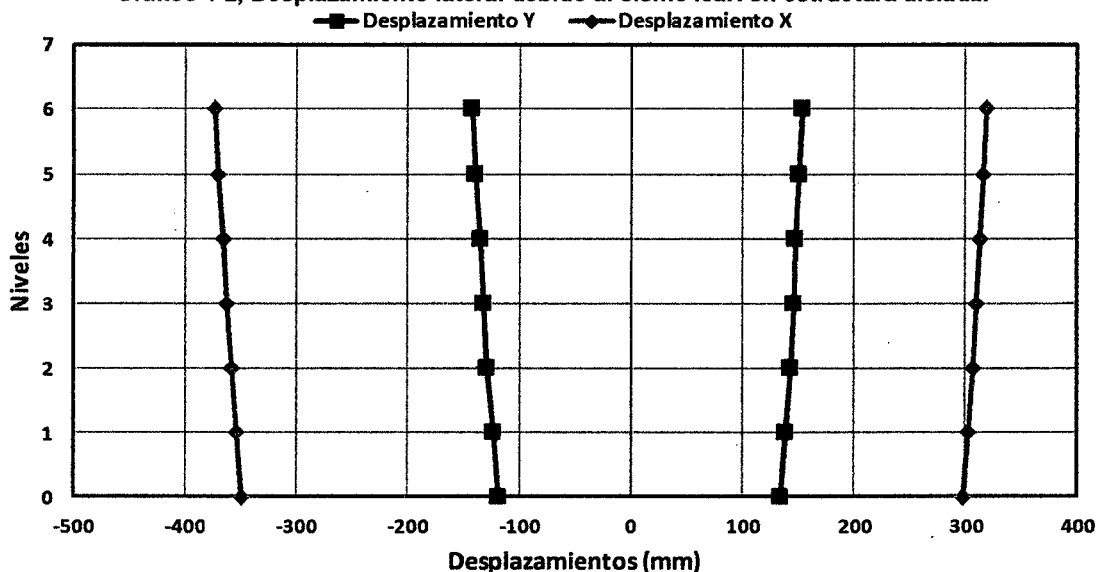
Nivel	Desplazamiento (mm)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	318.739	153.044	-372.861	-142.773
5	316.299	150.533	-370.131	-139.176
4	312.866	148.011	-366.264	-135.881
3	309.912	145.432	-362.876	-132.335
2	306.349	142.367	-358.781	-128.555
1	302.210	138.562	-353.142	-123.564
0	297.936	134.434	-348.726	-119.179

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 4-2, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaX en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

El desplazamiento del sistema de aislación es: 348.726 mm en el eje "X" y 134.434 mm en el eje "Y".

Mientras que los desplazamientos en el último piso de la estructura son: 372.861 mm y de 153.044 mm en los ejes "X" e "Y" respectivamente.

Ica Y:



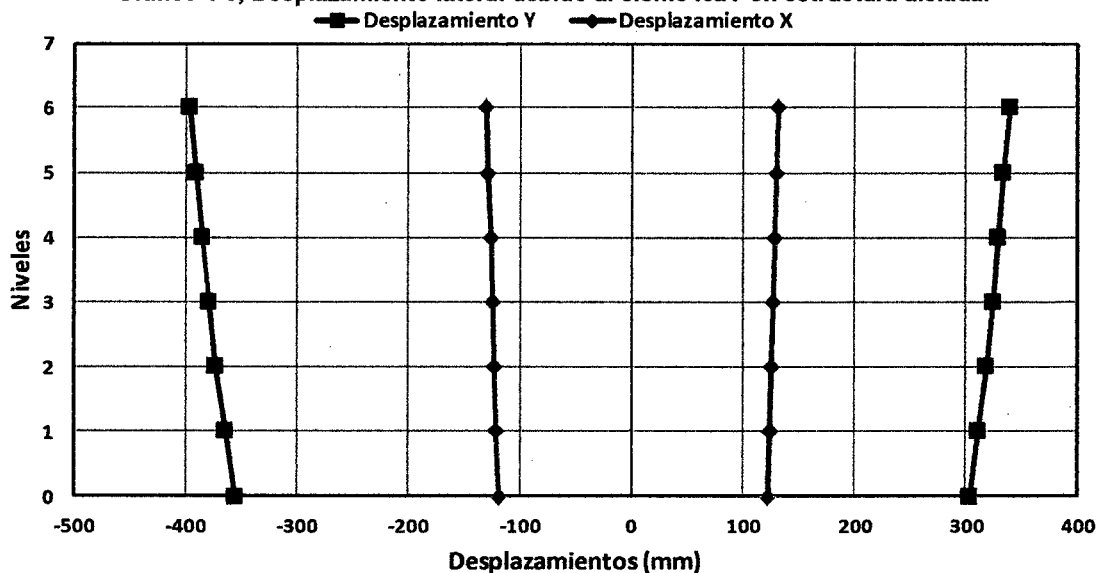
Tabla 4.4, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura aislada.

Nivel	Desplazamiento (mm)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	130.641	338.860	-130.225	-397.314
5	129.373	333.809	-128.790	-391.174
4	127.785	329.354	-126.973	-385.631
3	126.548	324.467	-125.326	-379.569
2	125.230	319.325	-123.383	-373.153
1	123.766	311.810	-121.068	-363.638
0	122.268	304.135	-119.037	-354.685

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se desprende:

Gráfico 4-3, Desplazamiento lateral debido al sismo IcaY en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
Elaboración: El Autor.

De la gráfica y tabla anteriores se muestra un desplazamiento en la base de: 122.268 mm en el eje "X" y 354.685 mm en el eje "Y".

Mientras que los desplazamientos en el último piso de la estructura son: 130.641 mm y de 397.314 mm en los ejes "X" e "Y" respectivamente.

Aceleración

Debido al espectro de respuesta



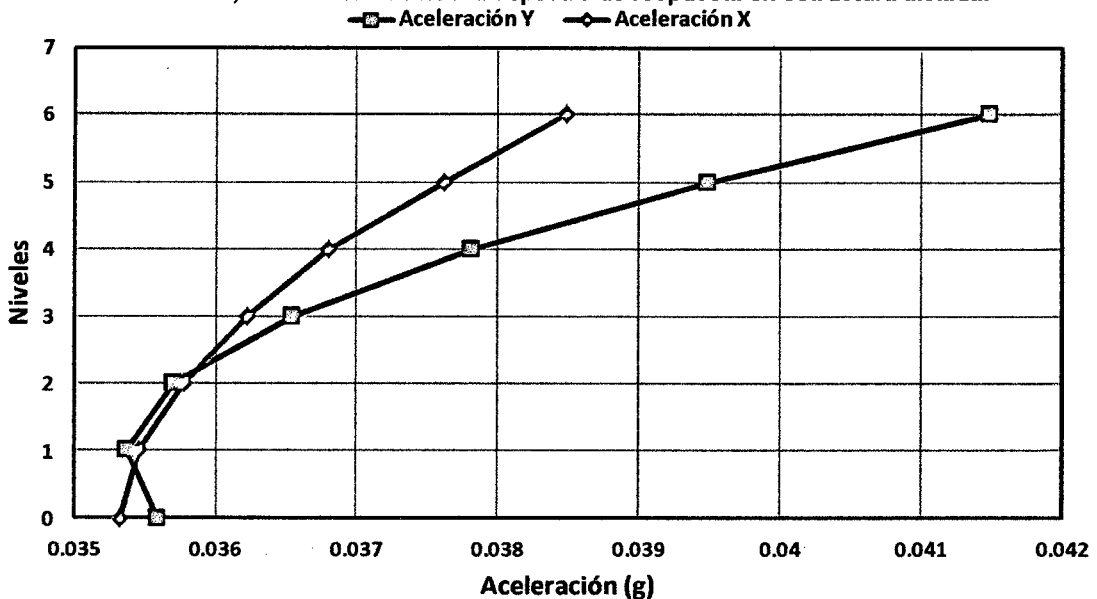
Tabla 4.5, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura aislada.

Nivel	Aceleración (g)	
	X	Y
6	0.0385	0.0415
5	0.0376	0.0395
4	0.0368	0.0378
3	0.0362	0.0365
2	0.0358	0.0357
1	0.0355	0.0354
0	0.0353	0.0356

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla obtenemos el siguiente gráfico:

Gráfico 4-4, Aceleración debido al espectro de respuesta en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

Se muestra que la aceleración en el eje "X" es de: 0.0385 veces la gravedad en el último piso, mientras que en el eje "Y" es de: 0.0415 veces la gravedad en el último piso

Sismo de Ica

IcaX:

Tabla 4.6, Aceleración debido al sismo IcaX en estructura aislada.

Nivel	Aceleración (g)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	0.0385	0.0415	0.0385	0.0415
5	0.0376	0.0395	0.0376	0.0395
4	0.0368	0.0378	0.0368	0.0378
3	0.0362	0.0365	0.0362	0.0365
2	0.0358	0.0357	0.0358	0.0357
1	0.0355	0.0354	0.0355	0.0354
0	0.0353	0.0356	0.0353	0.0356

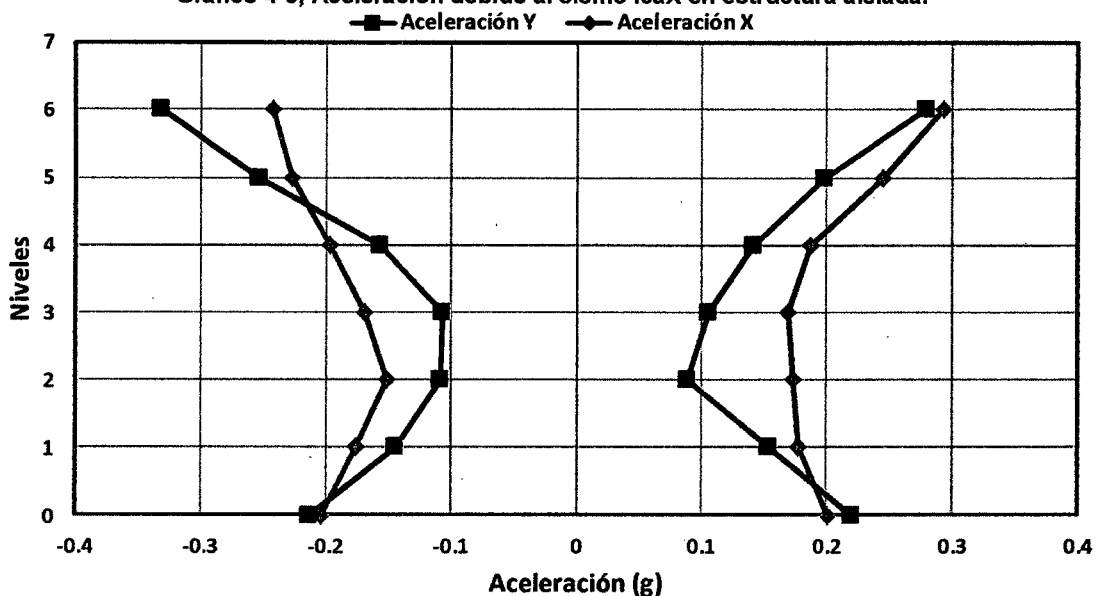


6	0.2934	0.2792	-0.2425	-0.3319
5	0.2445	0.1980	-0.2274	-0.2539
4	0.1874	0.1416	-0.1966	-0.1564
3	0.1693	0.1060	-0.1690	-0.1069
2	0.1727	0.0887	-0.1507	-0.1088
1	0.1779	0.1544	-0.1765	-0.1450
0	0.2007	0.2202	-0.2033	-0.2128

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

La grafica muestra la aceleración

Gráfico 4-5, Aceleración debido al sismo IcaX en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla y grafico anteriores se observa que la gravedad es: 0.2934 veces la gravedad en el último piso para la coordenada "X" mientras que en la coordenada "Y" es: 0.3319 veces la gravedad.

IcaY:

Tabla 4.7, Aceleración debido al sismo IcaY en estructura aislada.

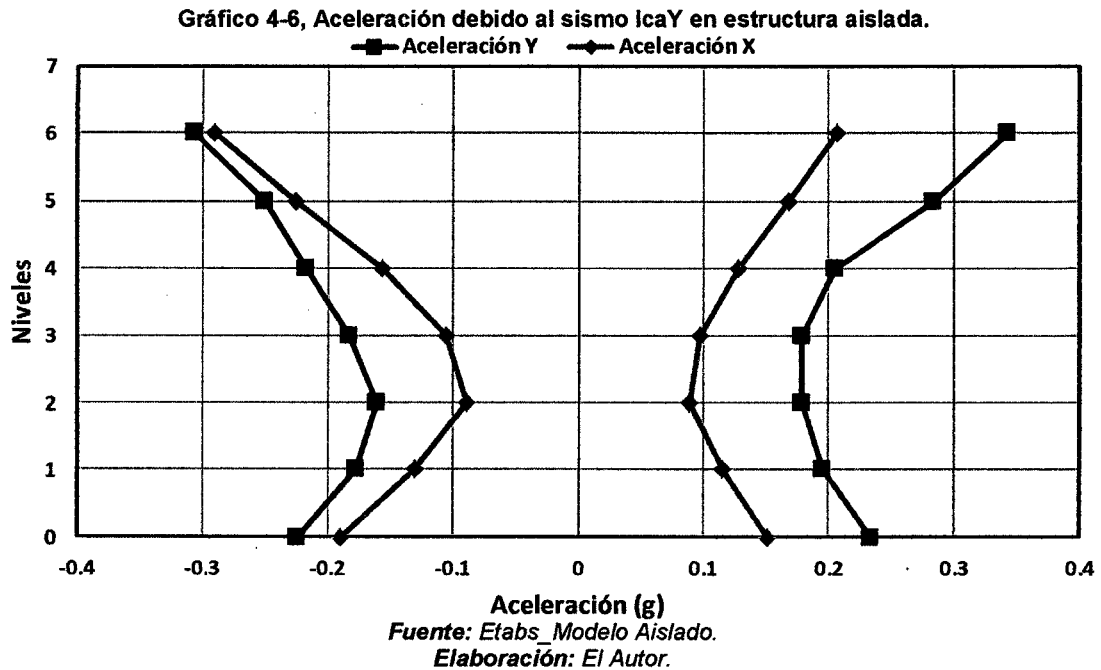
Nivel	Aceleración (g)			
	Máximo		Mínimo	
	X	Y	X	Y
6	0.2058	0.3430	-0.2909	-0.3070
5	0.1673	0.2832	-0.2256	-0.2502
4	0.1277	0.2052	-0.1566	-0.2171
3	0.0973	0.1793	-0.1054	-0.1827
2	0.0885	0.1787	-0.0889	-0.1605



1	0.1145	0.1957	-0.1308	-0.1769
0	0.1512	0.2334	-0.1895	-0.2251

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

La grafica a partir de los datos anteriores es la siguiente:



Se observa que la gravedad es: 0.2909 veces la gravedad en el último piso para la coordenada "X" mientras que en la coordenada "Y" es: 0.343 veces la gravedad.

Cortante

Espectro de respuesta:

Tabla 4.8, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.

Nivel	Ubicación	Cortante (KN)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	25.532	27.542	-25.532	-27.542
	Abajo	35.242	37.869	-35.242	-37.869
5	Arriba	590.145	620.448	-590.145	-620.448
	Abajo	637.103	669.158	-637.103	-669.158
4	Arriba	1911.471	1976.980	-1911.471	-1976.980
	Abajo	1968.561	2034.938	-1968.561	-2034.938
3	Arriba	2816.440	2886.539	-2816.440	-2886.539
	Abajo	2879.722	2949.375	-2879.722	-2949.375

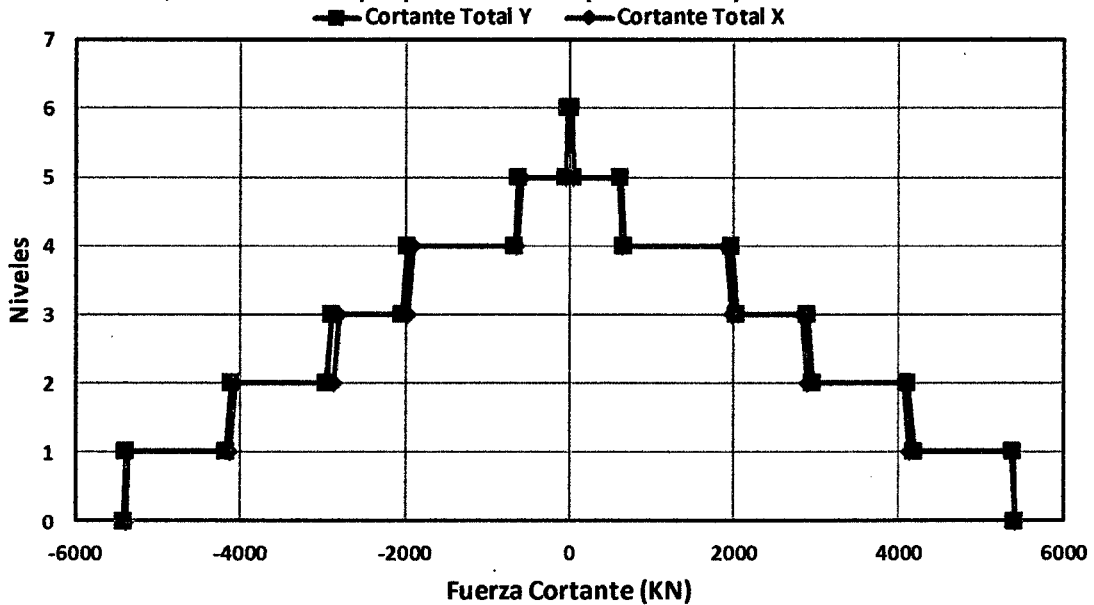


2	Arriba	4064.827	4117.236	-4064.827	-4117.236
	Abajo	4134.931	4185.719	-4134.931	-4185.719
1	Arriba	5378.925	5395.408	-5378.925	-5395.408
	Abajo	5406.229	5421.906	-5406.229	-5421.906

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 4-7, Fuerza cortante por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

Como se puede observar el máximo cortante en la base en el eje "X" es: 5406.229 KN, mientras en el eje "Y" es: 5421.906 KN.

Sismo Ica

Ica X

Tabla 4.9, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.

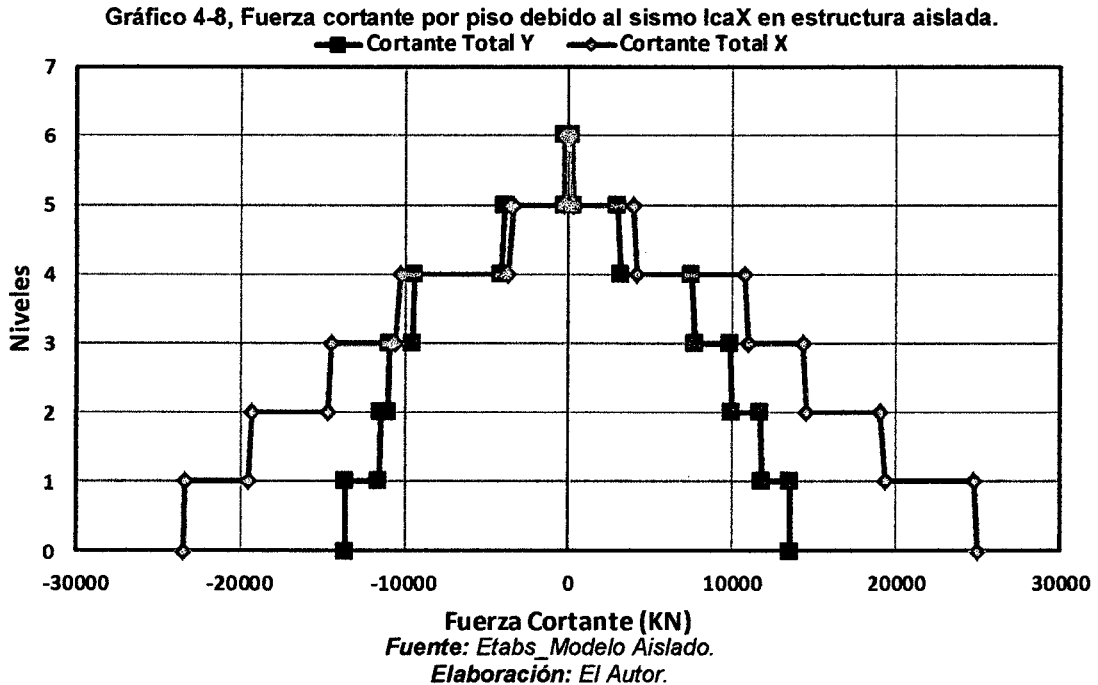
Nivel	Ubicación	Cortante (KN)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	200.438	181.516	-159.802	-221.870
	Abajo	270.568	240.507	-218.265	-295.636
5	Arriba	3911.419	3024.320	-3424.744	-3890.223
	Abajo	4183.045	3206.221	-3682.227	-4138.909
4	Arriba	10719.431	7518.378	-10296.981	-9368.019
	Abajo	10974.801	7694.228	-10576.197	-9531.040
3	Arriba	14286.076	9823.958	-14458.890	-10965.589



	Abajo	14503.448	9943.408	-14726.070	-11007.592
2	Arriba	19058.176	11701.390	-19332.519	-11425.067
	Abajo	19350.489	11817.474	-19576.191	-11551.152
1	Arriba	24772.173	13535.152	-23417.643	-13618.924
	Abajo	24896.754	13565.240	-23491.511	-13659.668

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la gráfica anterior se tiene:



Como se puede observar el máximo cortante en la base en el eje "X" es: 24896.754 KN, mientras en el eje "Y" es: 13659.668 KN.

Ica Y:

Tabla 4.10, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.

Nivel	Ubicación	Cortante (KN)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	138.939	236.430	-189.773	-200.524
	Abajo	185.924	317.064	-254.833	-267.404
5	Arriba	2574.965	4309.208	-3538.759	-3477.262
	Abajo	2754.836	4601.346	-3776.642	-3712.742
4	Arriba	6994.073	11198.470	-9128.553	-10474.208
	Abajo	7156.813	11448.887	-9320.170	-10761.803
3	Arriba	9292.507	14450.903	-11407.514	-14783.782
	Abajo	9430.175	14631.341	-11502.187	-15060.193

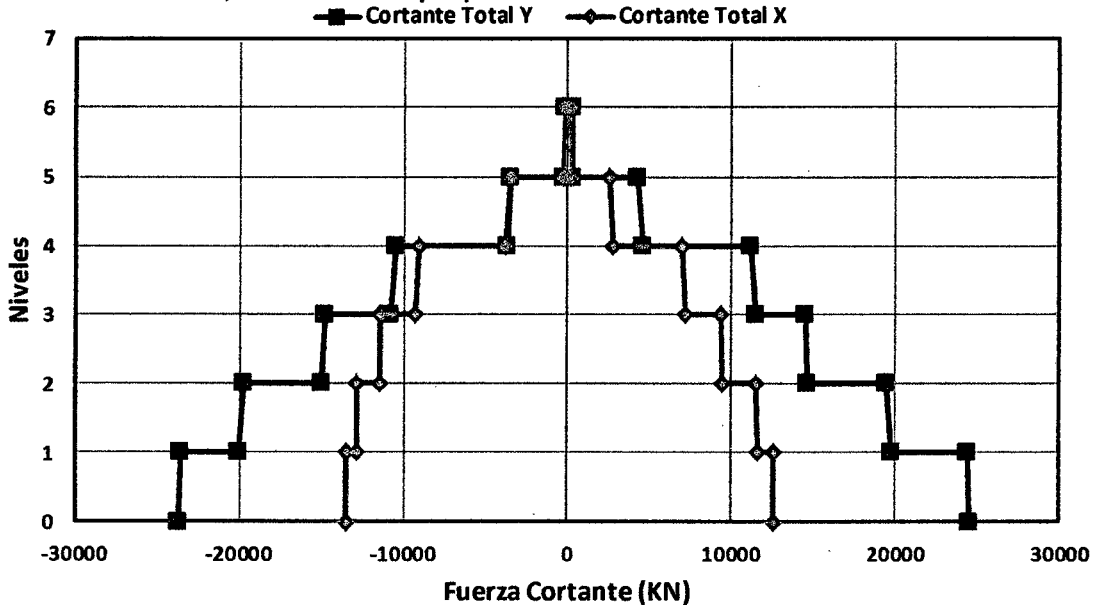


2	Arriba	11492.045	19473.725	-12825.614	-19780.612
	Abajo	11579.621	19734.895	-12870.382	-20022.861
1	Arriba	12538.908	24422.535	-13494.436	-23635.988
	Abajo	12546.917	24562.817	-13519.237	-23701.327

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

La grafica a la anterior tabla es:

Gráfico 4-9, Fuerza cortante por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

Como se puede observar el máximo cortante en la base en el eje "X" es: 13519.237 KN, mientras en el eje "Y" es: 24562.817 KN.

Momento de volteo:

Espectro de respuesta

Tabla 4.11, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.

Nivel	Ubicación	Momento de Volteo (KN-m)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	4.077E-06	1.000E-05	-4.077E-06	-1.000E-05
	Abajo	104.733	97.270	-104.733	-97.270
5	Arriba	104.733	97.270	-104.733	-97.270
	Abajo	2232.569	2122.244	-2232.569	-2122.244
4	Arriba	2232.569	2122.244	-2232.569	-2122.244
	Abajo	8248.531	7942.967	-8248.531	-7942.967
3	Arriba	8248.531	7942.967	-8248.531	-7942.967

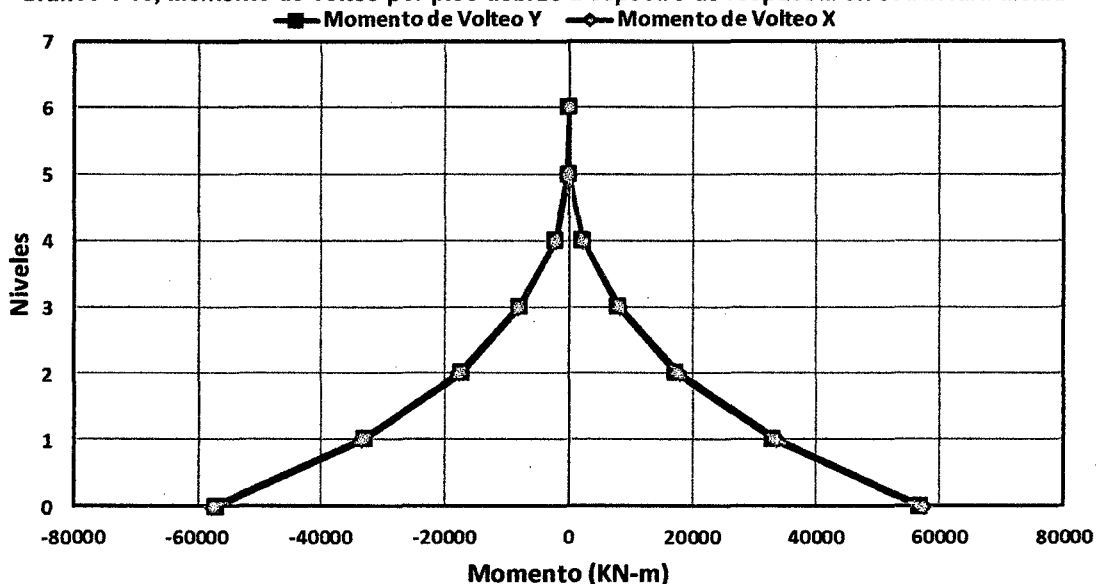


	Abajo	17868.180	17338.040	-17868.180	-17338.040
2	Arriba	17868.180	17338.040	-17868.180	-17338.040
	Abajo	33600.312	32901.903	-33600.312	-32901.903
1	Arriba	33600.312	32901.903	-33600.312	-32901.903
	Abajo	57555.701	56862.316	-57555.701	-56862.316

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se desprende la gráfica:

Gráfico 4-10, Momento de volteo por piso debido a espectro de respuesta en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla y grafica anteriores se observa que el momento de volteo en la base máximo para el eje "X" es: 57555.701 KN-m, mientras para el eje "Y" es: 56862.316 KN-m.

Sismo Ica

Ica X

Tabla 4.12, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.

Nivel	Ubicación	Momento de Volteo (KN-m)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	2.000E-05	5.000E-05	-2.000E-05	-5.000E-05
	Abajo	831.251	755.601	-678.230	-605.753
5	Arriba	831.251	755.601	-678.230	-605.753
	Abajo	14091.778	14122.386	-10974.843	-12336.929
4	Arriba	14091.778	14122.386	-10974.843	-12336.929

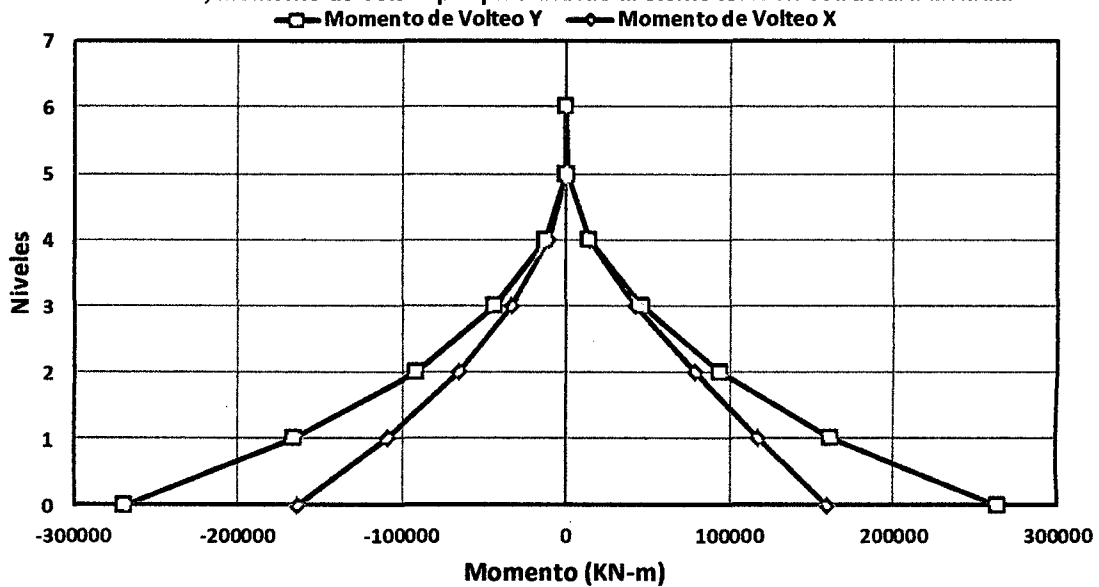


	Abajo	42459.055	46612.678	-33108.755	-43663.168
3	Arriba	42459.055	46612.677	-33108.755	-43663.168
	Abajo	78288.979	93713.770	-65369.146	-91825.677
2	Arriba	78288.979	93713.770	-65369.146	-91825.677
	Abajo	116857.941	161567.729	-108915.480	-165610.695
1	Arriba	116857.941	161567.729	-108915.480	-165610.695
	Abajo	159524.878	264319.529	-163633.533	-269669.767

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se obtiene la siguiente gráfica:

Tabla 4.13, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaX en estructura aislada.



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.
 Elaboración: El Autor.

Se observa que el momento de volteo en la base máximo para el eje "X" es: 163633.533 KN-m, mientras para el eje "Y" es: 264319.529 KN-m.

Ica Y:

Tabla 4.14, Momento de volteo por piso debido al sismo IcaY en estructura aislada.

Nivel	Ubicación	Momento de Volteo (KN-m)			
		Máximo		Mínimo	
		X	Y	X	Y
6	Arriba	4.000E-07	8.000E-07	-1.000E-05	-3.000E-05
	Abajo	751.637	521.582	-888.582	-713.577
5	Arriba	751.637	521.582	-888.582	-713.577
	Abajo	12605.888	9301.262	-15590.854	-12796.132
4	Arriba	12605.889	9301.262	-15590.854	-12796.132
	Abajo	44293.611	30541.203	-49531.524	-40488.667

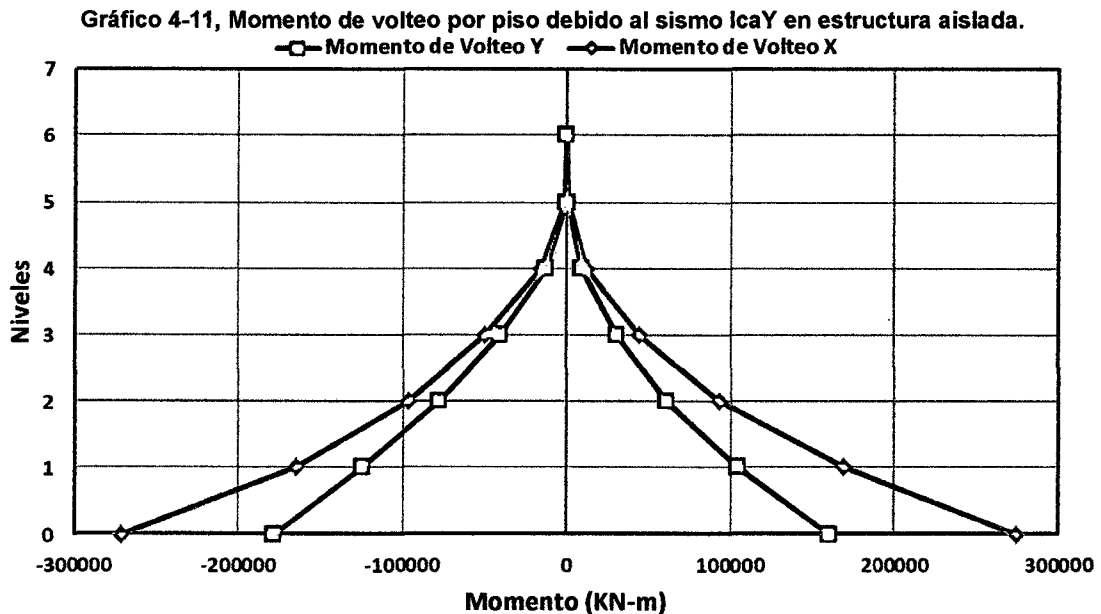


3	Arriba	44293.611	30541.203	-49531.524	-40488.667
	Abajo	93512.994	60863.767	-96489.743	-78307.775
2	Arriba	93512.994	60863.767	-96489.743	-78307.775
	Abajo	169150.583	104599.819	-164916.386	-124328.750
1	Arriba	169150.583	104599.819	-164916.386	-124328.750
	Abajo	274466.370	160422.526	-271578.744	-178706.687

Fuente: Etabs_Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

La grafica para la tabla anterior es:



Fuente: Etabs_Modelo Aislado.

Elaboración: El Autor.

Se observa que el momento de volteo en la base máximo para el eje "X" es: 274466.37 KN-m, mientras para el eje "Y" es: 178706.687 KN-m.

De la gráfica y tabla anteriores se tiene:



Apéndice 5.

Comparación de Resultados.

Para efectos de demostrar la hipótesis se deben comparar los resultados, alguno de estos se detallarán a continuación porque su desarrollo en el cuerpo de la tesis sería largo.

Desplazamiento lateral

Debido a espectro de norma E.30

La comparación del desplazamiento generado por el espectro es la siguiente:

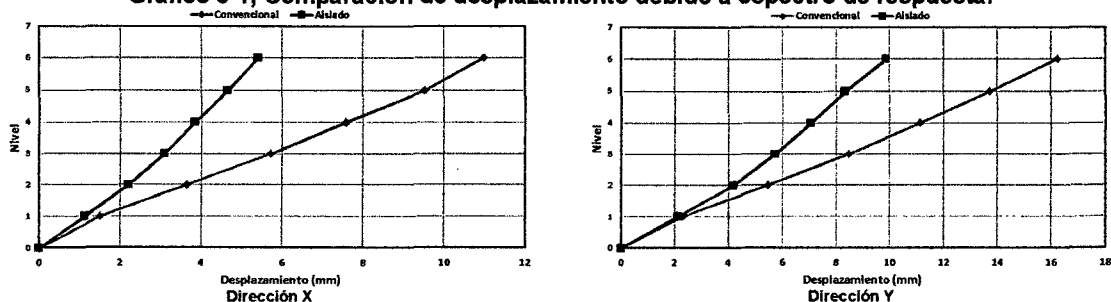
Tabla 5.1, Comparación de desplazamiento debido a espectro de respuesta.

Nivel	Convencional		Aislado		Variación	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
6	10.99	16.254	5.419	9.864	50.69%	39.31%
5	9.534	13.737	4.672	8.342	51.00%	39.27%
4	7.571	11.127	3.836	7.058	49.33%	36.57%
3	5.71	8.456	3.092	5.735	45.85%	32.18%
2	3.633	5.461	2.194	4.188	39.61%	23.31%
1	1.489	2.261	1.123	2.127	24.58%	5.93%
0	0	0	0	0	0.00%	0.00%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior se desprende el siguiente gráfico:

Gráfico 5-1, Comparación de desplazamiento debido a espectro de respuesta.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

Como se observa la variación que se produce es de entre 5 a 51% en el desplazamiento esto genera derivas mínimas en el edificio aislado con respecto al edificio convencional.

Debido a sismo Ica

Para efectos de comparación, se compara de manera general ambos resultados:

Tabla 5.2, Comparación de desplazamiento debido a sismo Ica.

Nivel	Convencional		Aislado		Variación	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y

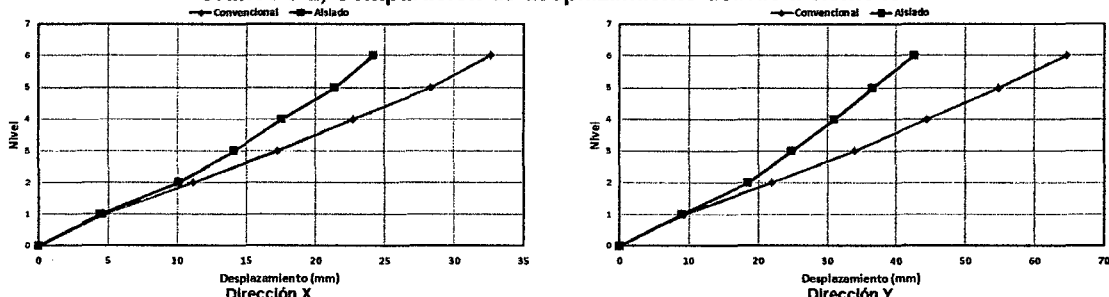


6	32.617	64.54	24.135	42.629	26.00%	33.95%
5	28.302	54.771	21.405	36.489	24.37%	33.38%
4	22.657	44.454	17.538	30.946	22.59%	30.39%
3	17.254	33.92	14.15	24.884	17.99%	26.64%
2	11.16	21.955	10.055	18.468	9.90%	15.88%
1	4.699	9.175	4.416	8.953	6.02%	2.42%
0	0	0	0	0	0.00%	0.00%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De lo cual tenemos lo siguiente:

Gráfico 5-2, Comparación de desplazamiento debido a sismo Ica.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

Como se observa de la tabla anterior la variación es de 2 a 34%, esto ya que para el análisis bajo el sismo de Ica se utilizaron las tres componentes (norte sur, este oeste y vertical).

De ambas tablas se desprende que: la mejora que proporciona el uso de aisladores es significativa ya que otorga a la estructura de una amplia absorción de la energía entrante y así se puede retirar elementos rigidizantes y volver más flexible la estructura, como en este caso, y aun así la estructura aislada no se desplaza más que la convencional y por ende las derivas de entrepiso no son mayores a las obtenidas por la estructura convencional.

Aceleración por piso

Debido a espectro de respuesta:

Tabla 5.3, Comparación de aceleración debido a espectro de respuesta.

Nivel	Convencional		Aislado		Variación	
	X (g)	Y (g)	X (g)	Y (g)	X	Y
6	0.5504	0.615	0.0385	0.0415	93.01%	93.25%
5	0.4605	0.4097	0.0376	0.0395	91.83%	90.36%
4	0.341	0.3071	0.0368	0.0378	89.21%	87.69%
3	0.267	0.2466	0.0362	0.0365	86.44%	85.20%
2	0.2244	0.2059	0.0358	0.0357	84.05%	82.66%
1	0.1546	0.1418	0.0355	0.0354	77.04%	75.04%
0	0	0	0.0353	0.0356	0.00%	0.00%

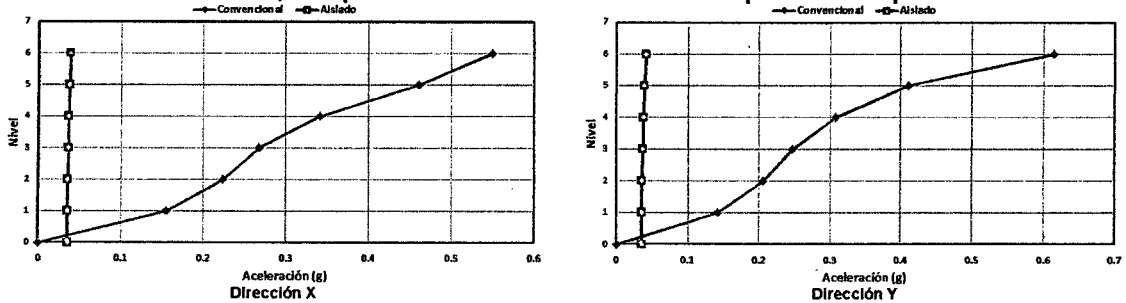
Fuente: Etabs.



Elaboración: El Autor.

De lo anterior se desprende:

Gráfico 5-3, Comparación de aceleración debido a espectro de respuesta.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

La tabla anterior nos muestra que la aceleración de la estructura aislada se disminuye en un 75% en el primer piso hasta un 93% en el último, con respecto a las aceleraciones en el edificio convencional.

Debido a sismo de Ica

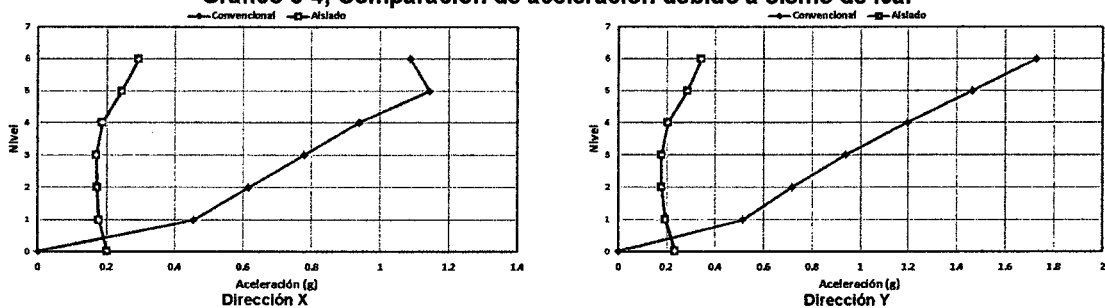
Tabla 5.4, Comparación de aceleración debido a sismo de Ica.

Nivel	Convencional		Aislado		Variación	
	X (g)	Y (g)	X (g)	Y (g)	X	Y
6	1.0873	1.7263	0.2934	0.343	73.02%	80.13%
5	1.1429	1.4625	0.2445	0.2832	78.61%	80.64%
4	0.9389	1.1939	0.1874	0.2052	80.04%	82.81%
3	0.7787	0.9362	0.1693	0.1793	78.26%	80.85%
2	0.6151	0.7155	0.1727	0.1787	71.92%	75.02%
1	0.4535	0.5114	0.1779	0.1957	60.77%	61.73%
0	0	0	0.2007	0.2334	0.00%	0.00%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla anterior tenemos:

Gráfico 5-4, Comparación de aceleración debido a sismo de Ica.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



La tabla anterior nos muestra que la aceleración de la estructura aislada se disminuye en un 60% en el primer piso hasta un 80% en el último, con respecto a las aceleraciones en el edificio convencional.

Fuerza cortante

Debido a espectro de respuesta.

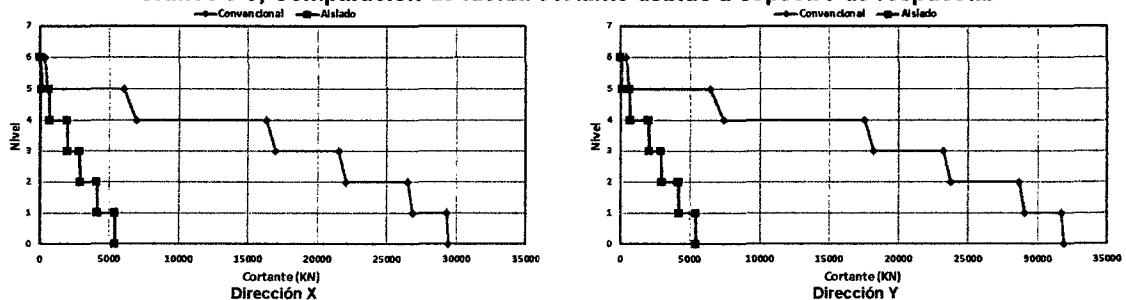
Tabla 5.5, Comparación de fuerza cortante debido a espectro de respuesta.

Nivel	Ubicación	Convencional		Aislado		Variación	
		X (KN)	Y (KN)	X (KN)	Y (KN)	X	Y
6	Arriba	325.416	383.439	25.532	27.542	92.15%	92.82%
	Abajo	465.715	543.217	35.242	37.869	92.43%	93.03%
5	Arriba	6005.03	6446.941	590.145	620.448	90.17%	90.38%
	Abajo	6869.813	7380.482	637.103	669.158	90.73%	90.93%
4	Arriba	16300.578	17488.406	1911.471	1976.98	88.27%	88.70%
	Abajo	16936.349	18180.762	1968.561	2034.938	88.38%	88.81%
3	Arriba	21509.161	23170.357	2816.44	2886.539	86.91%	87.54%
	Abajo	22030.195	23743.866	2879.722	2949.375	86.93%	87.58%
2	Arriba	26490.804	28634.803	4064.827	4117.236	84.66%	85.62%
	Abajo	26869.108	29054.077	4134.931	4185.719	84.61%	85.59%
1	Arriba	29282.11	31713.867	5378.925	5395.408	81.63%	82.99%
	Abajo	29439.928	31884.459	5406.229	5421.906	81.64%	83.00%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De lo anterior se desprende:

Gráfico 5-5, Comparación de fuerza cortante debido a espectro de respuesta.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

La tabla anterior nos muestra que la fuerza cortante de la estructura aislada se disminuye en un 81% en el primer piso hasta un 93% en el último, con respecto al edificio convencional.

Debido a sismo de Ica

Tabla 5.6, Comparación de fuerza cortante debido a sismo de Ica.

Nivel	Ubicación	Convencional	Aislado	Variación
-------	-----------	--------------	---------	-----------

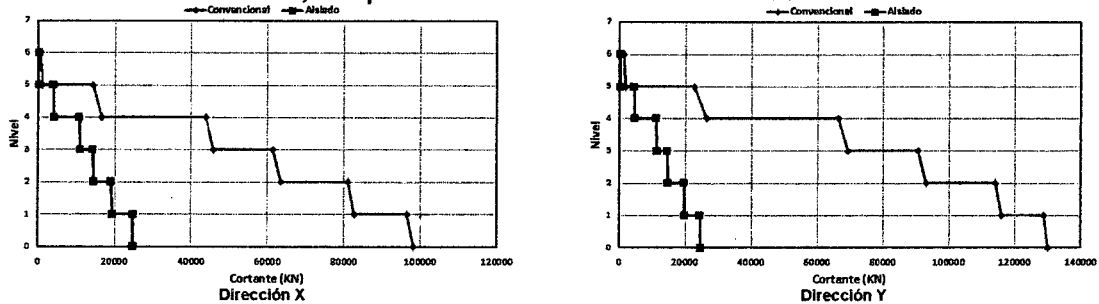


		X (KN)	Y (KN)	X (KN)	Y (KN)	X	Y
6	Arriba	674.811	1131.11	200.438	236.43	70.30%	79.10%
	Abajo	988.737	1649.016	270.568	317.064	72.63%	80.77%
5	Arriba	14318.938	22645.028	3911.419	4309.208	72.68%	80.97%
	Abajo	16620.749	26189.234	4183.045	4601.346	74.83%	82.43%
4	Arriba	43915.536	66426.818	10719.431	11198.47	75.59%	83.14%
	Abajo	45908.78	69288.074	10974.801	11448.887	76.09%	83.48%
3	Arriba	61463.081	90559.44	14286.076	14450.903	76.76%	84.04%
	Abajo	63399.958	93070.296	14503.448	14631.341	77.12%	84.28%
2	Arriba	80953.395	114149.71	19058.176	19473.725	76.46%	82.94%
	Abajo	82608.729	115993.7	19350.489	19734.895	76.58%	82.99%
1	Arriba	96534.365	128761.3	24772.173	24422.535	74.34%	81.03%
	Abajo	98247.285	130026.21	24896.754	24562.817	74.66%	81.11%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De lo anterior se desprende:

Gráfico 5-6, Comparación de fuerza cortante debido a sismo de Ica.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

La tabla anterior nos muestra que la fuerza cortante de la estructura aislada se disminuye en un 74% en el primer piso hasta un 80% en el último, con respecto al edificio convencional.

Momento de volteo

Debido a espectro de diseño

Tabla 5.7, Comparación de momento de volteo debido a espectro de respuesta.

Nivel	Ubicación	Convencional		Aislado		Variación	
		X (KN-m)	Y (KN-m)	X (KN-m)	Y (KN-m)	X	Y
6	Arriba	5.67E-07	1.36E-06	3.98E-08	1.00E-07	92.99%	92.66%
	Abajo	1491.316	1271.422	104.733	97.27	92.98%	92.35%
5	Arriba	1491.317	1271.422	104.733	97.27	92.98%	92.35%
	Abajo	24279.354	22532.229	2232.569	2122.244	90.80%	90.58%
4	Arriba	24279.354	22532.229	2232.569	2122.244	90.80%	90.58%
	Abajo	77254.337	71974.169	8248.531	7942.967	89.32%	88.96%
3	Arriba	77254.335	71974.169	8248.531	7942.967	89.32%	88.96%

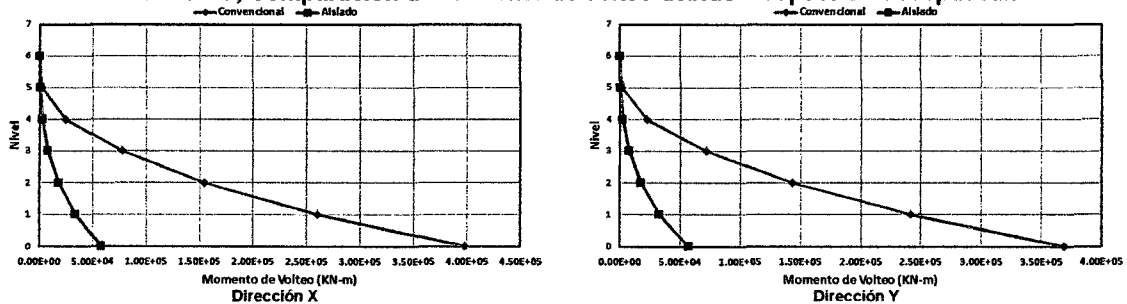


	Abajo	153744.09	143033.15	17868.18	17338.04	88.38%	87.88%
2	Arriba	153744.09	143033.15	17868.18	17338.04	88.38%	87.88%
	Abajo	260605.25	241940.7	33600.312	32901.903	87.11%	86.40%
1	Arriba	260605.25	241940.7	33600.312	32901.903	87.11%	86.40%
	Abajo	398168.04	368954.87	57555.701	56862.316	85.54%	84.59%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla tenemos:

Gráfico 5-7, Comparación de momento de volteo debido a espectro de respuesta.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

La tabla anterior nos muestra que el momento de volteo correspondiente a la estructura aislada se disminuye en un 85% en el primer piso hasta un 93% en el último, con respecto al edificio convencional.

Debido al sismo de Ica

Tabla 5.8, Comparación de momento de volteo debido a sismo de Ica.

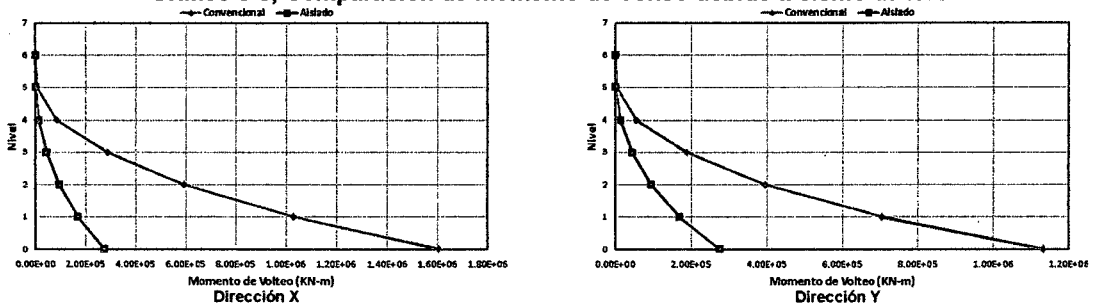
Nivel	Ubicación	Convencional		Aislado		Variación	
		X (KN-m)	Y (KN-m)	X (KN-m)	Y (KN-m)	X	Y
6	Arriba	2.03E-06	4.57E-06	4.00E-07	4.00E-07	80.25%	91.25%
	Abajo	4460.543	2667.107	751.637	751.637	83.15%	71.82%
5	Arriba	4460.544	2667.107	751.637	751.637	83.15%	71.82%
	Abajo	85143.262	53713.597	12605.888	12605.888	85.19%	76.53%
4	Arriba	85143.26	53713.597	12605.889	12605.889	85.19%	76.53%
	Abajo	288713.73	188533.27	44293.611	44293.611	84.66%	76.51%
3	Arriba	288713.72	188533.27	44293.611	44293.611	84.66%	76.51%
	Abajo	591835.42	394623.07	93512.994	93512.994	84.20%	76.30%
2	Arriba	591835.42	394623.07	93512.994	93512.994	84.20%	76.30%
	Abajo	1029265.3	705478.12	169150.58	169150.58	83.57%	76.02%
1	Arriba	1029265.3	705478.12	169150.58	169150.58	83.57%	76.02%
	Abajo	1605262.1	1133086.6	274466.37	274466.37	82.90%	75.78%

Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.

De la tabla se desprende:



Gráfico 5-8, Comparación de momento de volteo debido a sismo de Ica.



Fuente: Etabs.
Elaboración: El Autor.

La tabla anterior nos muestra que el momento de volteo correspondiente a la estructura aislada se disminuye en un 75% en el primer piso hasta un 91% en el último, con respecto al edificio convencional.



Apéndice 6.

Verificación de elementos estructurales.

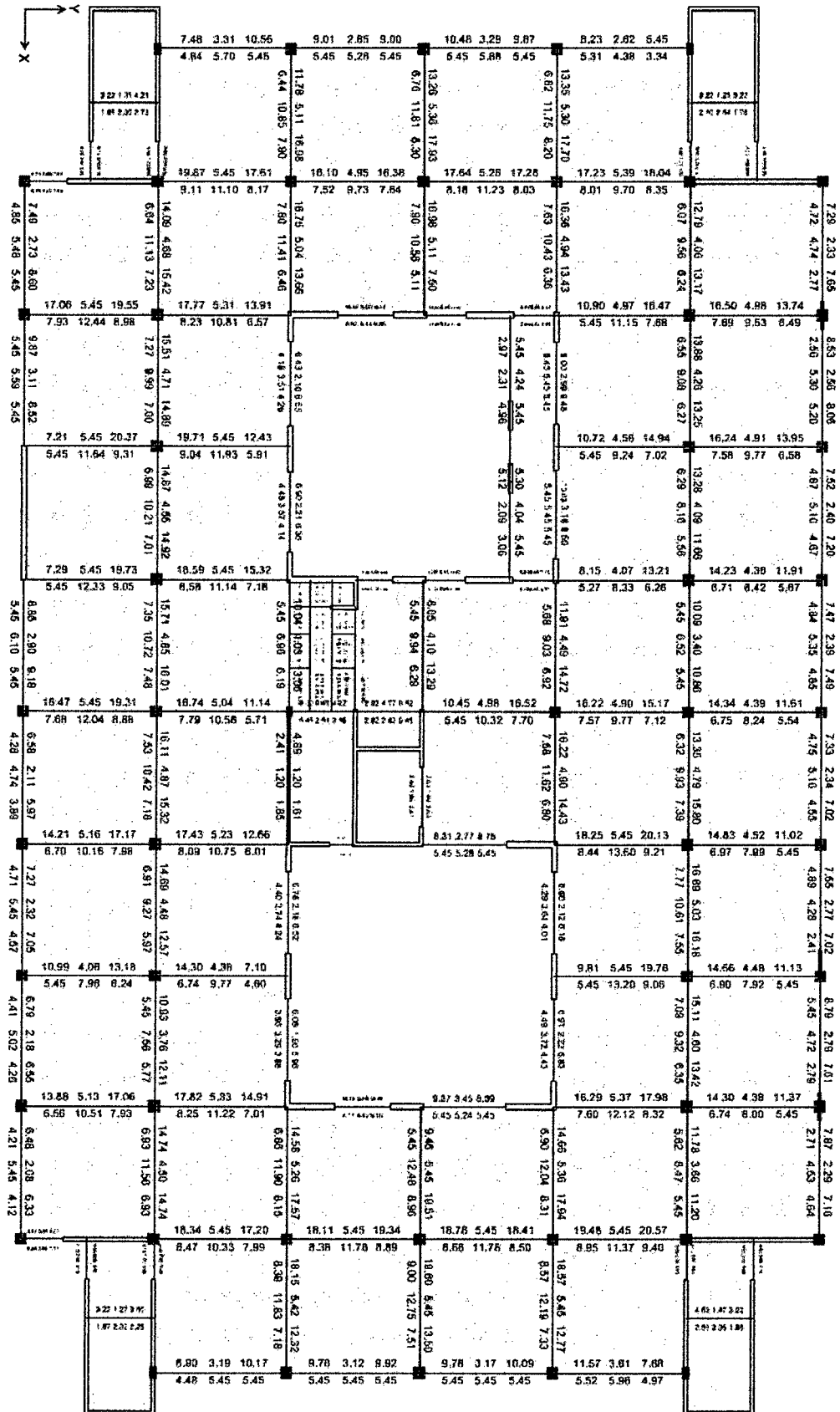
La verificación de los elementos estructurales se realiza enteramente en el programa Etabs mediante su herramienta de diseño, como se ha mencionado en los capítulos: ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL y ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA AISLADA.

Como se observa los elementos estructurales que se muestran en las ilustraciones siguientes, tanto de la estructura convencional como de la estructura aislada, soportan los esfuerzos a los que están sometidos; ya que el programa Etabs no nos arroja error O/S (observación/sobreesfuerzo), cuando los elementos no soportan las fuerzas a las que están sometidos, cuando la estructura no está sobre esforzada el software nos arroja la cuantía de acero lo cual corresponde al diseño.

De esta manera se verifica los elementos estructurales.

Estructura convencional

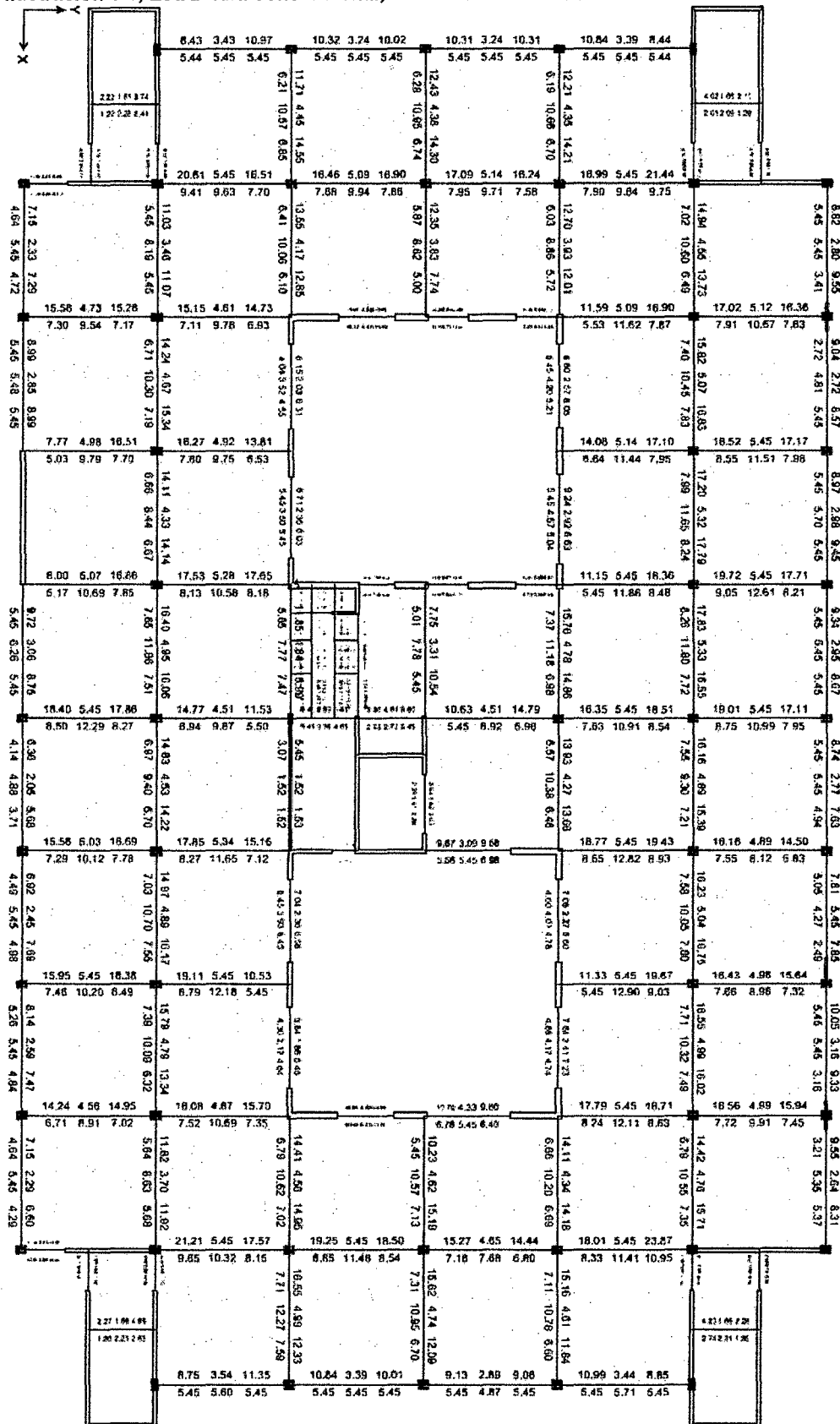
A continuación se presentan las cuantías de acero en cm^2 resultado del diseño en Etabs de los elementos estructurales.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



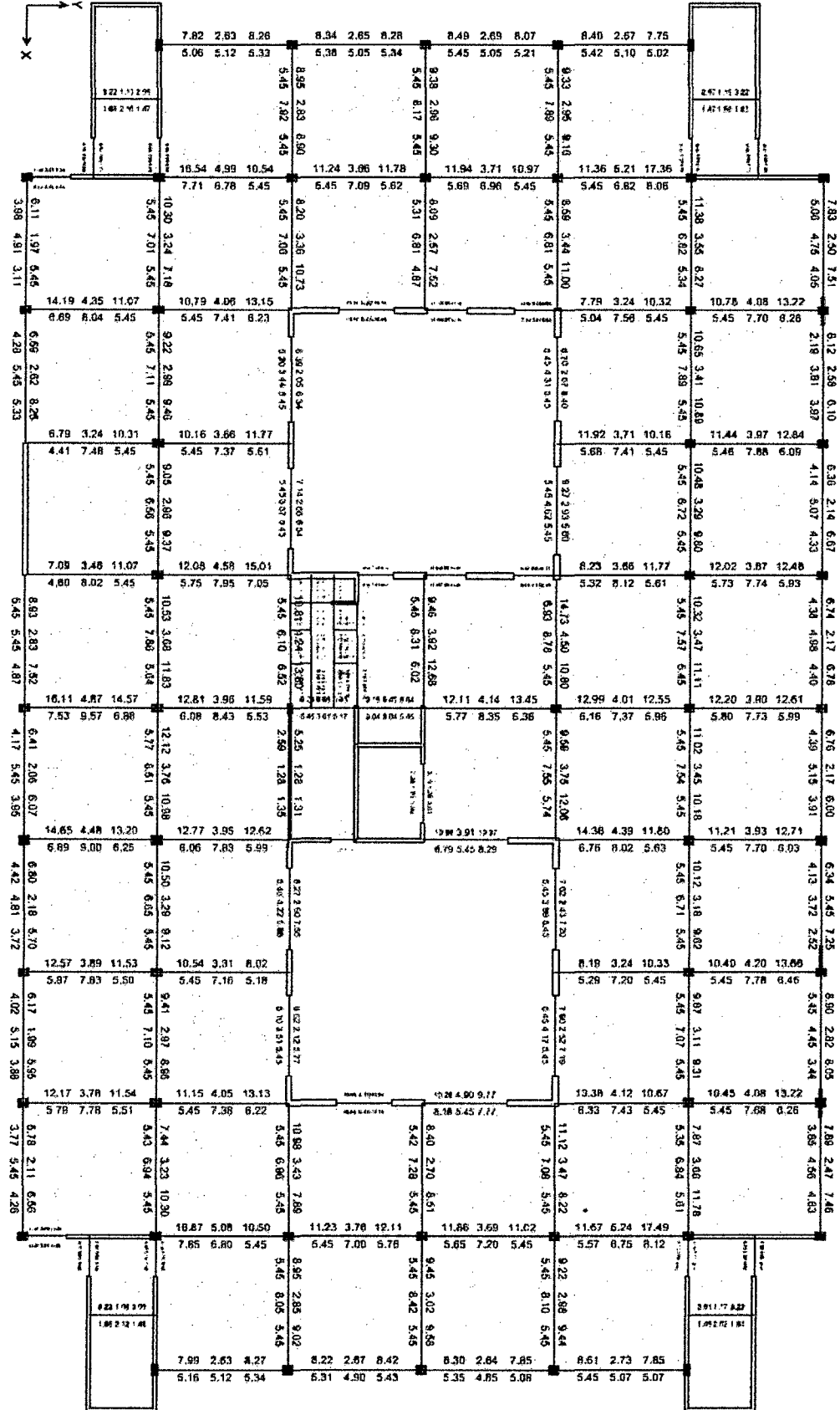
Ilustración 6-1, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 2.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



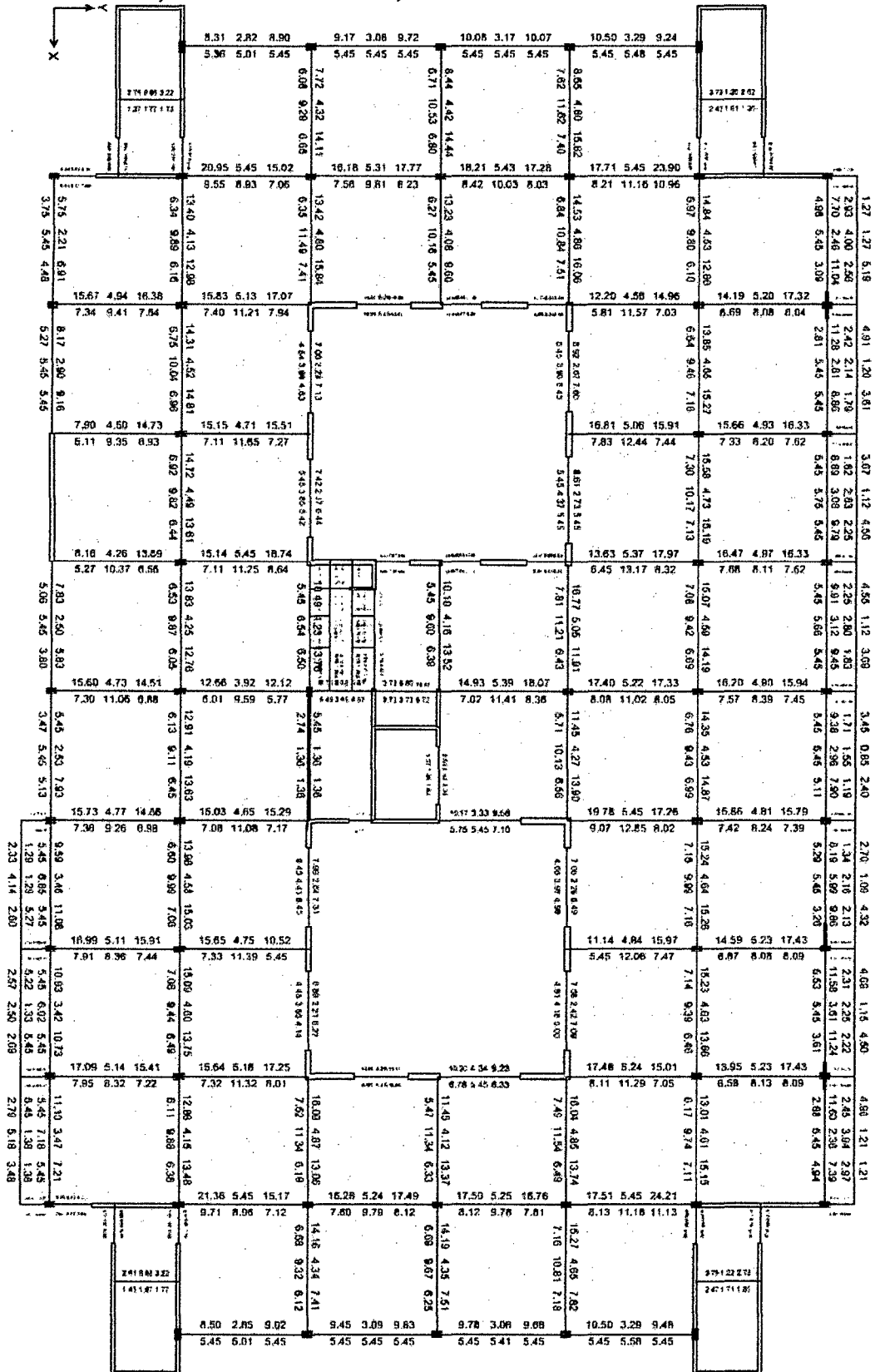
Ilustración 6-2, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 3.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



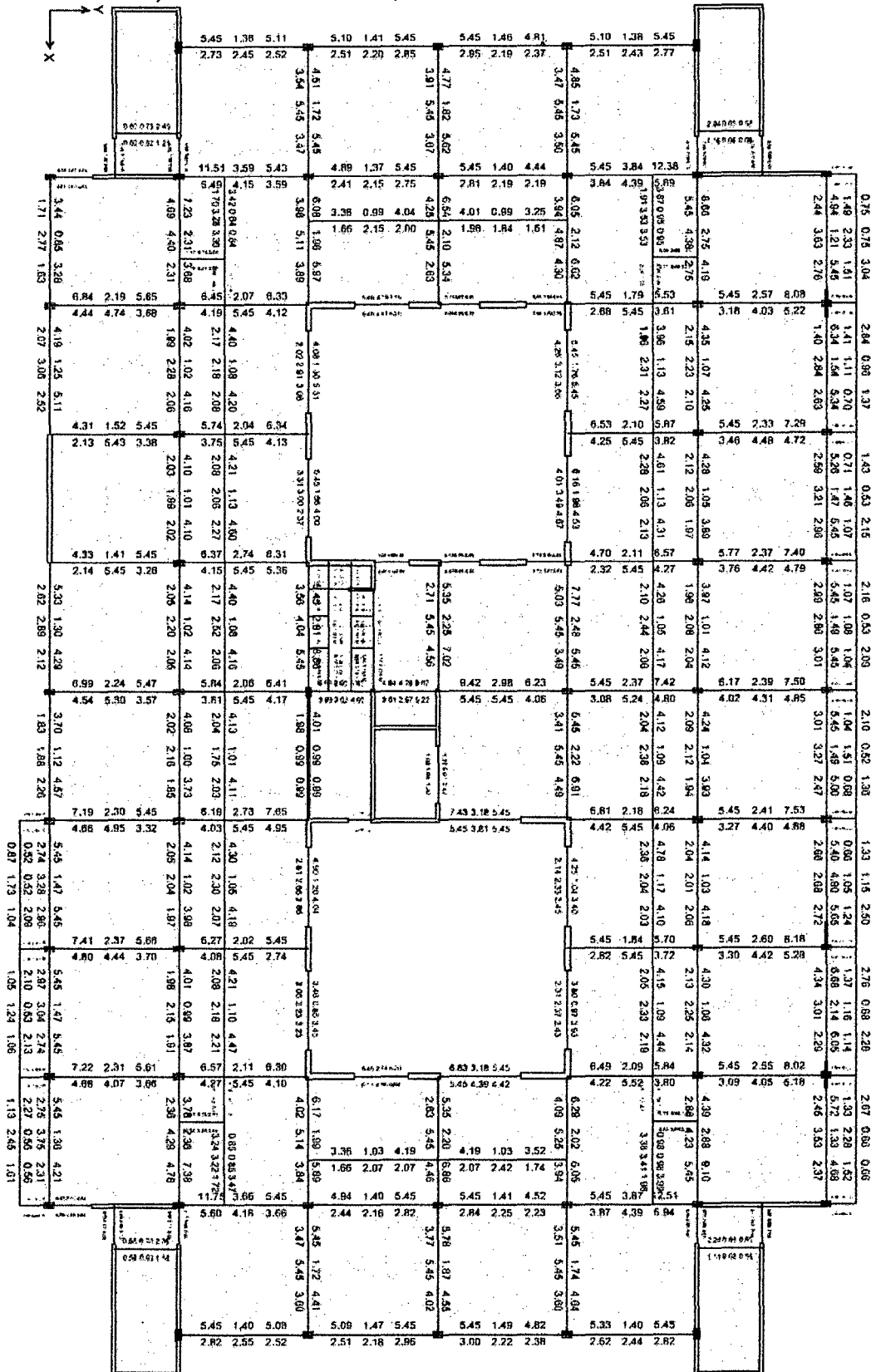
Ilustración 6-3, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 4.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



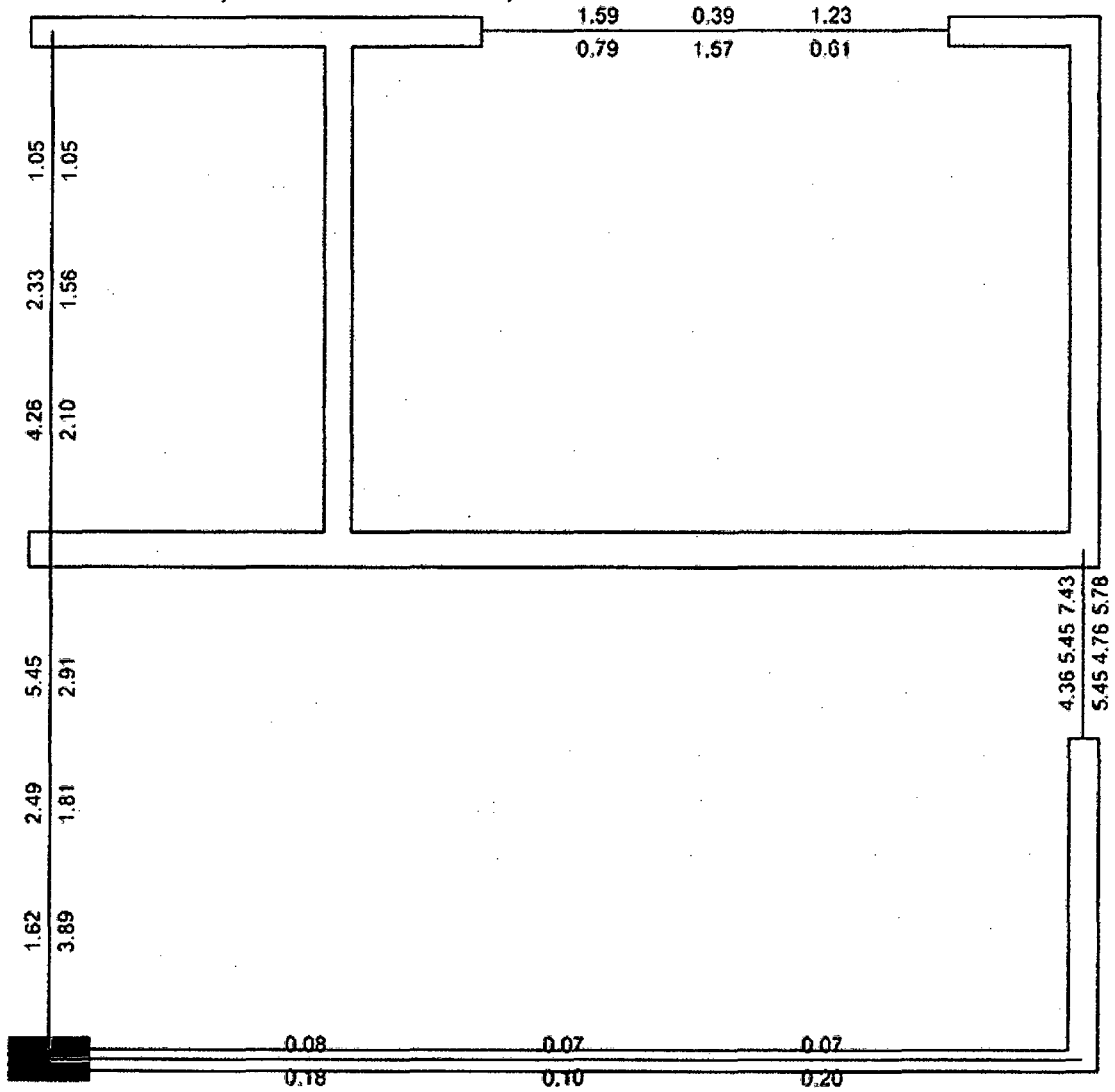
Ilustración 6-4, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 5.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



Ilustración 6-5, Estructura convencional, Verificación de elementos estructurales - Piso 6.



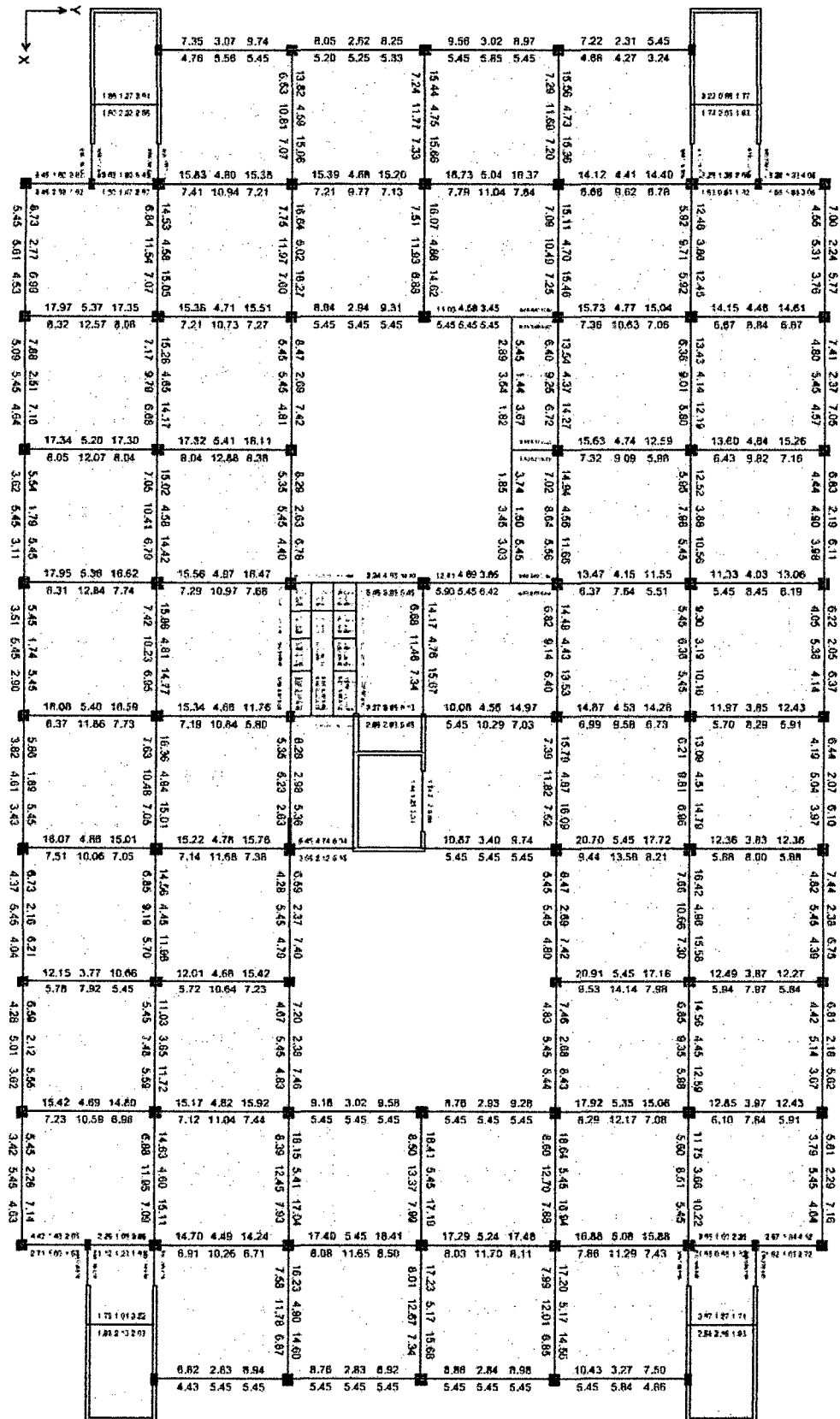
Fuente: Etabs.
Elaboración: El Autor.

Estructura aislada

De manera similar tenemos las cuantías de acero en cm² resultado del diseño en Etabs de los elementos estructurales.



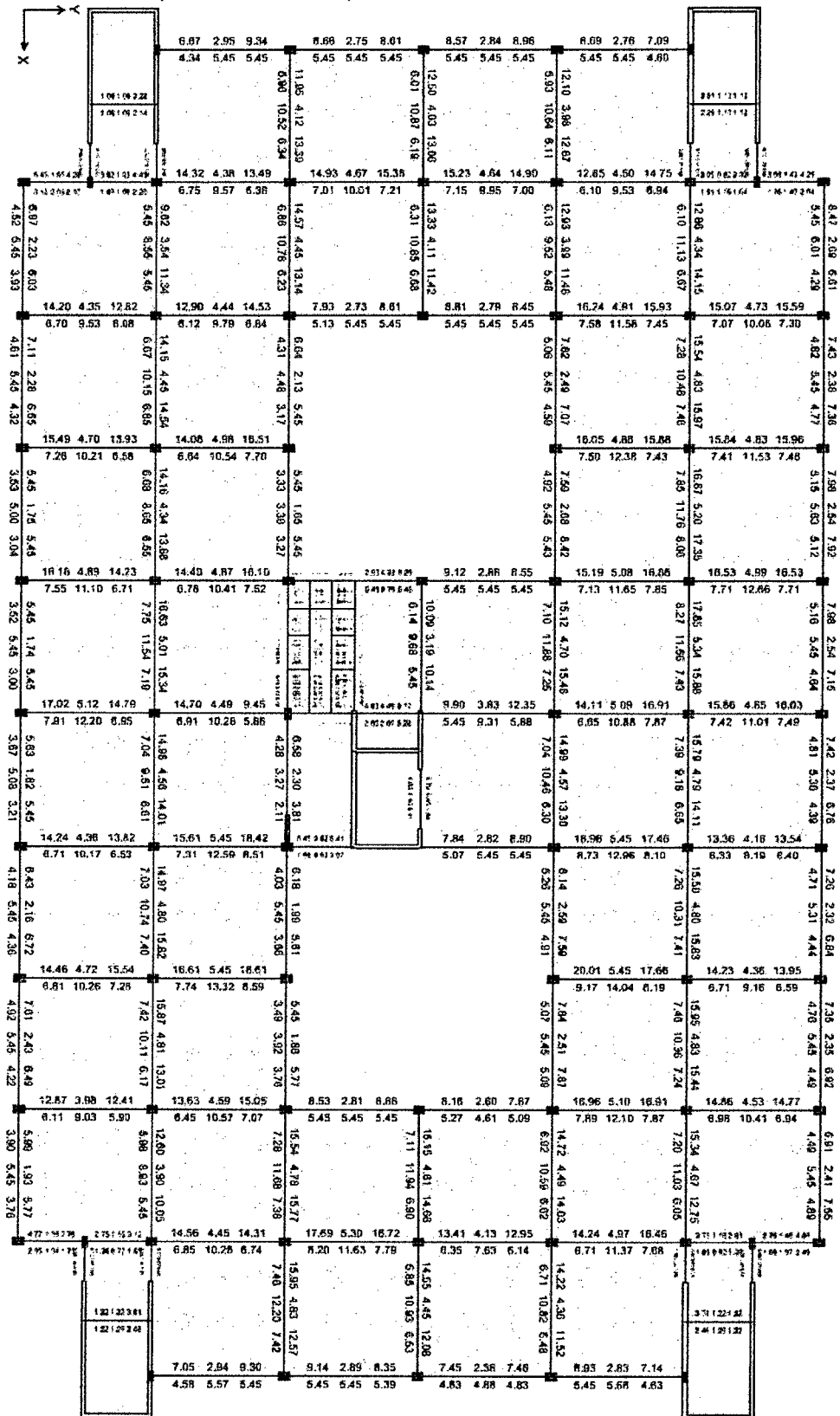
Ilustración 6-7, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 1.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



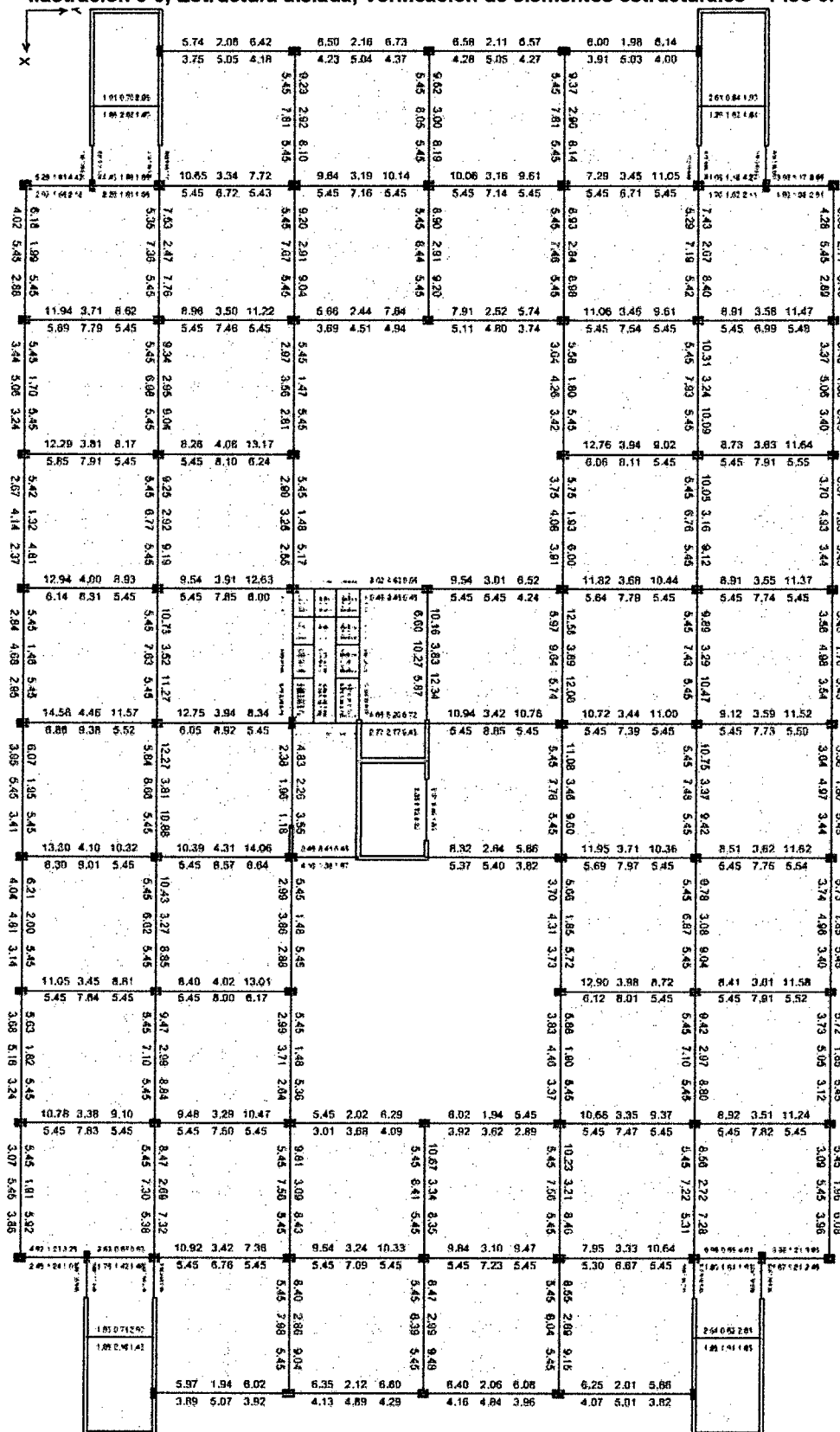
Ilustración 6-8, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 2.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



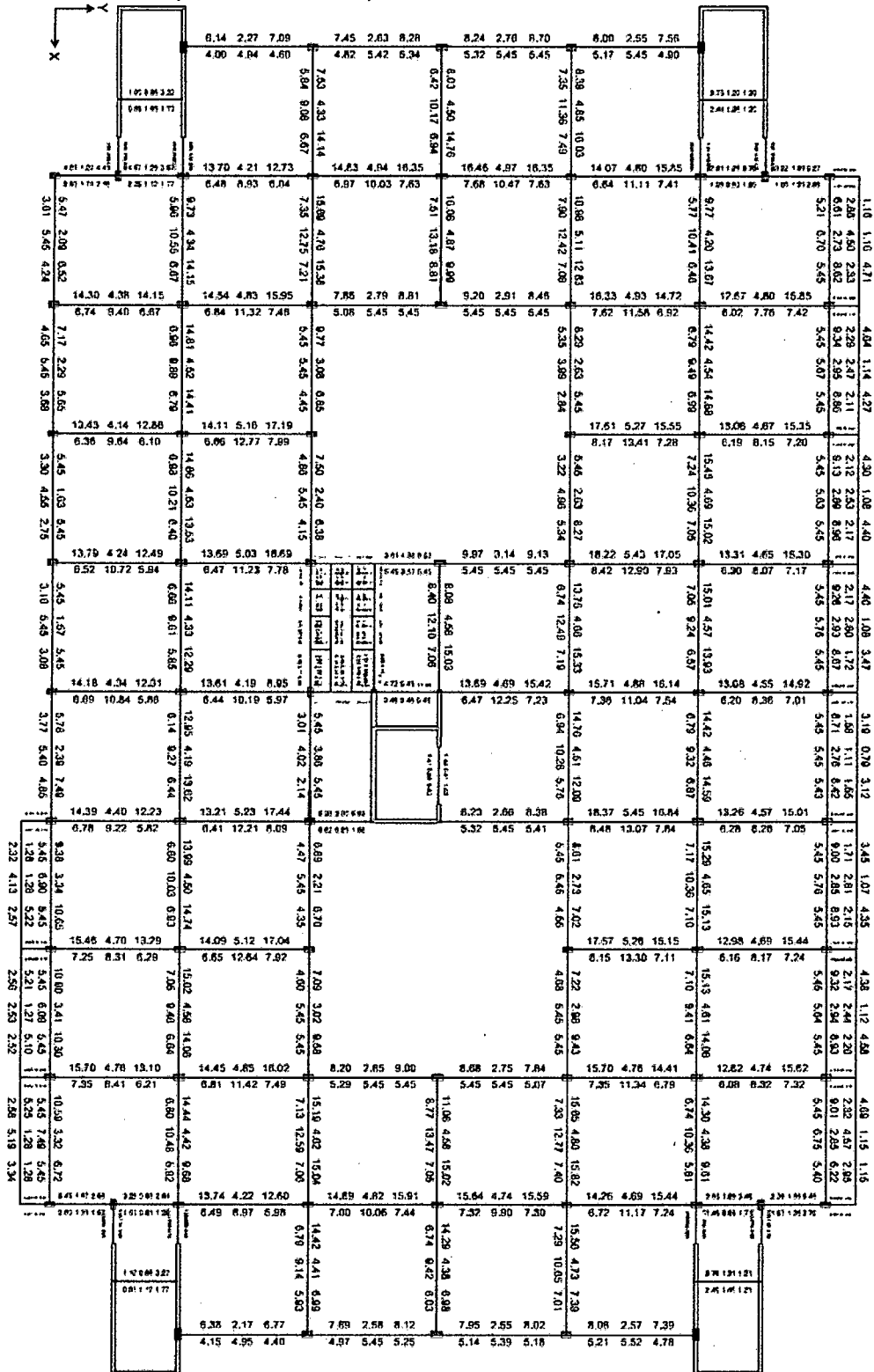
Ilustración 6-9, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 3.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



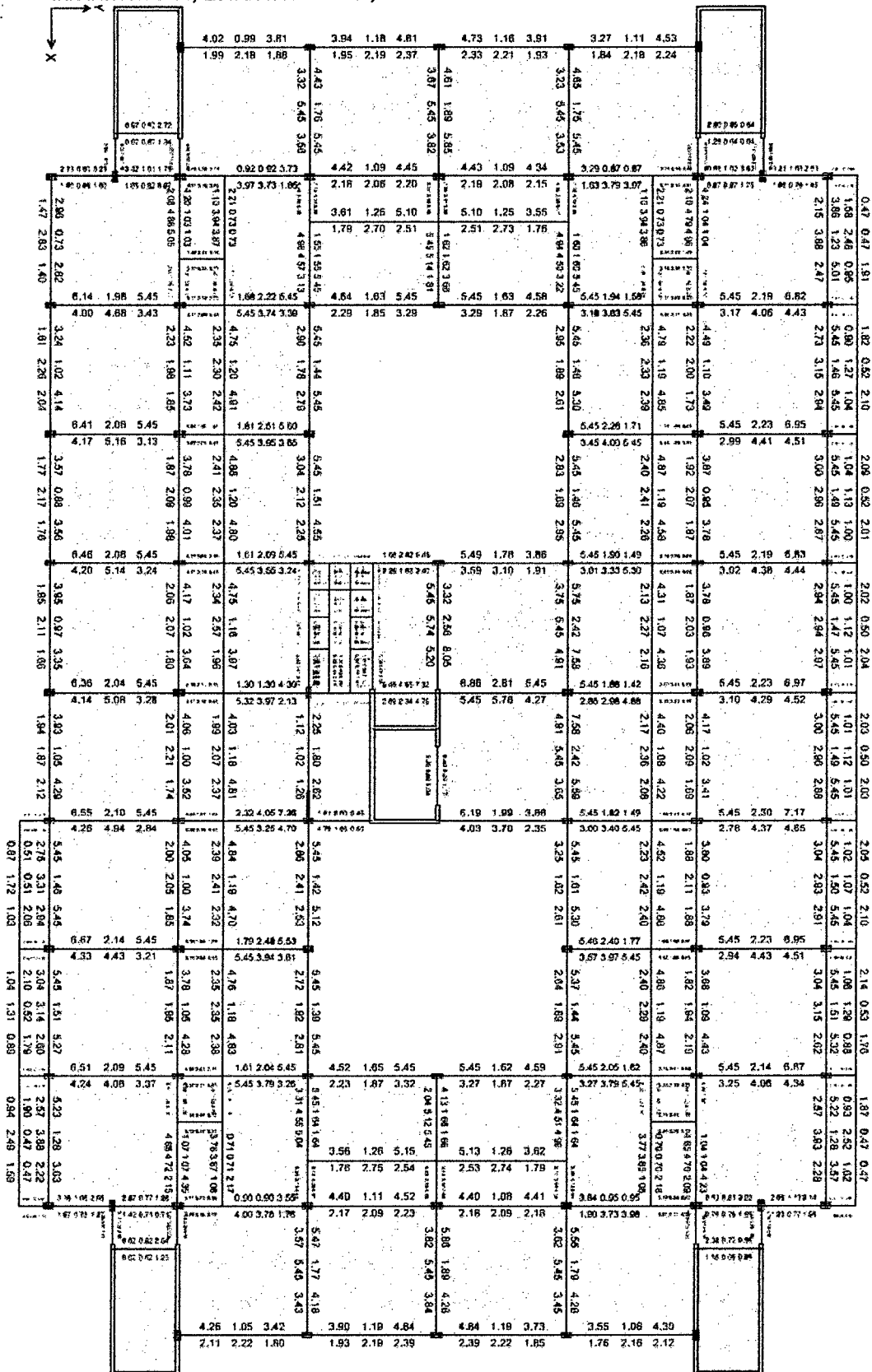
Ilustración 6-10, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 4.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



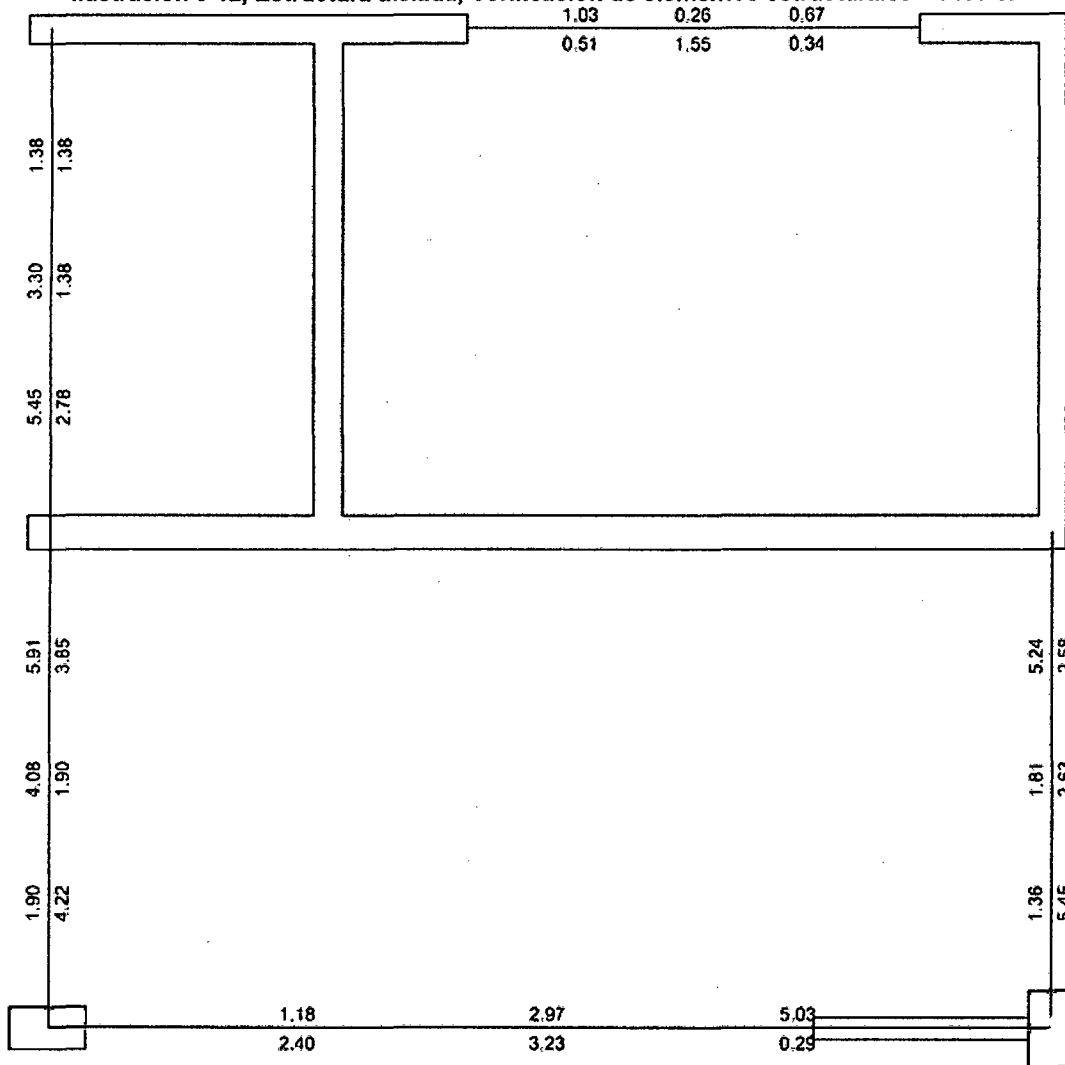
Ilustración 6-11, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 5.



Fuente: Etabs.
 Elaboración: El Autor.



Ilustración 6-12, Estructura aislada, Verificación de elementos estructurales – Piso 6.



Fuente: Etabs.
Elaboración: El Autor.



Apéndice 7.

Costo de aisladores

En cuanto al costo, se tiene que un aislador sísmico de tipo elastomérico con núcleo de plomo tiene un costo de entre 30 a 50 dólares por m² en el Perú, esto dependiendo de la configuración de cada aislador, el costo de los aisladores con de características semejantes a los utilizados en la presente investigación oscila en 5000 dólares americanos cada uno.

Los costos por mantenimiento no existen durante la vida útil de los aisladores, ya que los modernos aisladores sísmicos tienen un recubrimiento de caucho de alta resistencia que brinda protección para los mismos, incluso llegan a soportar altas temperaturas.

A continuación se presentan algunos datos acerca del costo implicado alrededor del mundo:

Tabla 7.1, Costos de edificios aislados sísmicamente.

Estructura	Descripción	Variación de costo
Hospital Regional de Wellington – Nueva Zelanda (2008)	Se usaron 135 LRB y 132 aisladores deslizantes. El edificio conto con 7 pisos con un área total de 44700 m ² .	Tuvo un costo de 165 millones de dólares. El costo de los aisladores represento el 1% del costo total. El costo de todos los componentes del sistema de aislación sísmica (incluido instalación, brecha sísmica, etc) fue de alrededor del 3% del total de la construcción, lo cual es



		aproximadamente \$110/m ² .
Hospital Whanganui - Nueva Zelanda (2008)	Sistema de aisladores Ro-Glider patentados por Robinson seismic isolation. Edificio de dos pisos	Costo total de la estructura 18 millones de dólares. Costo de los dispositivos de aislación: 2% Costo total del sistema de aislación fue 3%, significando un aproximado de \$140/m ² .

*Fuente: Costs and Benefits of Seismic / Base Isolation.
 Elaboración: Robinson Seismic Isolation.*

Como se puede extraer de la gráfica anterior los costos alrededor del mundo representan un 5% aproximadamente del costo total de la estructura.

En Perú hay edificios aislados sísmicamente como son:

El Centro de Información de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, que cuenta con 5400 m² de área construida, 8 pisos y con 20 aisladores sísmicos de base de tipo LRB.

El costo de los dispositivos se encuentra en el orden de \$45/m².

Edificio corporativo de la empresa GyM en Petit Thouars Lima.

Edificio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología UTEC

Y edificios residenciales como el Atlantik Ocean Tower construida por el grupo inmobiliario Labok de 15 pisos en San Miguel, este edificio es el primer multifamiliar con aislación sísmica en el Perú.



Apéndice 8.

**Plano de ubicación de Secto "E" del Hospital Regional de Cajamarca
utilizado como modelo.**



Apéndice 9.

**Plano de ubicación de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)
en el edificio hospitalario.**