

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“EDIFICIO CON MDL UTILIZANDO AISLADORES ELASTOMÉRICOS PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DEL PROYECTO MULTIFAMILIAR CIUDAD SOL DE RETABLO DEL DISTRITO DE COMAS, 2020”

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero Civil**

Autor:

Luigi Dante Dávila Del Aguila

Asesor:

Ing. Tello Malpartida, Omart

Lima - Perú

2020



## DEDICATORIA

Resulta difícil tomar la responsabilidad de predecir el futuro, y la dificultad es mayor cuando se trata de predecir acciones humanas. Lo cierto es que nuestro país, pese a la gran trayectoria histórica que nos enorgullece, aún demuestra ser una sociedad joven y todavía se le adjudica un largo trecho de desarrollo por recorrer. El trecho a ese futuro podría por un momento significar a los menos valientes una razón para rendirse a una realidad actual de carencias, sin embargo, mi mayor osadía consiste en sostener el concepto de que la dificultad no es sino una de las mejores razones e inspiraciones para superarse y alcanzar metas antes insospechadas, y que esta idea no está solo en mi cabeza, sino en la gran mayoría de compatriotas que amanecen con el sueño de dejar un mundo mejor que el de ayer.

No es sino por la insaciable necesidad de perseguir ese sueño, que he llegado hasta este punto y apenas pienso que es el inicio. De esa forma, bajo el principio seguro de que vivimos en una comunidad ansiosa por obtener el título de progreso y desarrollo, es que puedo transmitir el mensaje de predecir un futuro glorioso y entusiasta para la tierra que me vio nacer.

Lo que importa hoy es nunca perder ese ánimo y determinación, por eso es que dedico la presente investigación a la joven y contemporánea comunidad de estudiantes de Ingeniería Civil, paladines del progreso y futuros gestores de infraestructuras, que al igual que yo se entusiasman por conocer más sobre el mundo que nos rodea y buscan conquistarlo a partir del esfuerzo y la constancia para hacerlo un lugar mejor, para hacerlo el país que merece ser, y para que ese futuro que predigo sea un alegre presente.

## AGRADECIMIENTO

A mi madre, Pilar Del Águila, por acompañarme en mi camino, frente a los altos y bajos del recorrido, por tener la capacidad de ser omnipresente y recordarme siempre el porqué de no rendirme nunca. Pienso que todo amor, de la misma forma como el conocimiento, debe ser conseguido y merecido, independientemente de los lazos de sangre que puedan unirnos, y pues, ante eso, solo puedo aseverar con pleno absolutismo, que nadie se ha ganado mi amor y eterno afecto como la ha hecho mi querida madre, y que sin ella muchos sueños propios jamás hubieran surgido.

A la Ing. Annedy Salazar, por ser tanto un soporte emocional como intelectual en el desarrollo de este trabajo de investigación. Ha sido gratificante retomar esta tesis, empezarla desde cero, y llegar hasta el final apoyado de su esclarecedora compañía.

A los gerentes e ingenieros de Consorcio DH MONT & CG & M S.A.C., quienes me acompañaron en mis primeros días involucrándome con la construcción y la ingeniería civil, y de cuyas charlas y su aprendizaje surgieron los cimientos para realizar este proyecto de investigación.

A los docentes de la Universidad Privada del Norte, por brindarme una base de formación que me acompaña en el día a día de mi ejercicio profesional, y de la cual, sin desconsiderar el valiente mérito de cada estudiante por su propia actitud y esfuerzo para aprender más y más en el día a día, solo puedo sentirme siempre agradecido.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES .....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1. Planteamiento y Delimitación del Problema.....</b>	<b>19</b>
1.1.1. Realidad problemática.....	19
1.1.2. Formulación del problema .....	26
1.1.3. Importancia y Justificación del Estudio .....	26
1.1.4. Limitación del estudio.....	28
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>29</b>
1.2.1. Objetivo general .....	29
1.2.2. Objetivos específicos.....	29
<b>1.3. Hipótesis .....</b>	<b>29</b>
1.3.1. Hipótesis general .....	29
1.3.2. Hipótesis específicas .....	30
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1. Marco Histórico.....</b>	<b>31</b>
2.1.1. Sistema de Muro de Ductilidad Limitada .....	31
2.1.2. Sistema de aisladores sísmicos.....	32
<b>2.2. Antecedentes .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3. Bases Teóricas .....</b>	<b>45</b>
2.3.1. Sistema de Muros de Ductilidad Limitada.....	45
2.3.2. Sistema de aisladores sísmicos.....	71

---

<b>2.4. Definición de términos básicos .....</b>	<b>110</b>
<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>114</b>
<b>3.1. Operacionalización de Variables .....</b>	<b>114</b>
<b>3.2. Tipo de Estudio.....</b>	<b>116</b>
<b>3.3. Diseño de investigación.....</b>	<b>116</b>
<b>3.4. Población, muestra y muestreo (Materiales, instrumentos y métodos) .....</b>	<b>117</b>
<b>3.5. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....</b>	<b>118</b>
3.5.1. Para recolección de datos .....	118
3.5.2. Para el análisis de datos.....	119
<b>3.6. Procedimiento de análisis de datos .....</b>	<b>119</b>
<b>CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>121</b>
<b>4.1. Modelamiento estructural.....</b>	<b>121</b>
4.1.1. Modelamiento y análisis del sistema con base fija .....	121
4.1.2. Modelamiento y análisis del sistema aislado .....	145
4.1.3. Desempeño sísmico de la estructura aislada con respecto a sismo de diseño .....	183
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS .....</b>	<b>187</b>
<b>5.1. Comparación del desempeño sísmico entre el sistema aislado y el sistema con aislamiento.....</b>	<b>187</b>
5.1.1. Cortante basal sísmica.....	187
5.1.2. Desplazamientos laterales del último nivel.....	189
5.1.3. Derivas máximas .....	191

<b>CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN.....</b>	<b>194</b>
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>196</b>
<b>CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>198</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>199</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Distribución de área techada por nivel – proyecto Techo Propio CSDR .....	69
Tabla 2.	Cuadro comparativo de normas de aislamiento sísmico .....	101
Tabla 3.	Propiedades en función del diámetro del aislador .....	107
Tabla 4.	Dimensiones de la unidad de aislación en función a su diámetro .....	107
Tabla 5.	Propiedades de los materiales para la unidad de aislación .....	108
Tabla 6.	Coefficientes sísmicos para fuerza cortante en la base .....	123
Tabla 7.	Distribución de cargas por piso y peso sísmico de la estructura .....	124
Tabla 8.	Distribución de fuerzas inerciales y cortantes por piso .....	125
Tabla 9.	Periodos de la estructura sin aislamiento.....	138
Tabla 10.	Fuerzas de piso en X-X con respecto a sismo de diseño.....	141
Tabla 11.	Fuerzas de piso en Y-Y con respecto a sismo de diseño.....	141
Tabla 12.	Desplazamientos en entrepiso en X-X con respecto a sismo de diseño. ....	142
Tabla 13.	Desplazamientos en entrepiso en Y-Y con respecto a sismo de diseño. ....	142
Tabla 14.	Derivas máximas debido a sismo de diseño en dirección X-X .....	143
Tabla 15.	Derivas máximas debido a sismo de diseño en dirección Y-Y .....	144
Tabla 16.	Tipos de aisladores y propiedades .....	152
Tabla 17.	Periodo natural para estructura aislada.....	155
Tabla 18.	Cortante mínima de estructura aislada con respecto a SMC .....	157
Tabla 19.	Desplazamientos en X-X para estructura aislada con respecto a SMC .....	158
Tabla 20.	Desplazamientos en Y-Y para estructura aislada con respecto a SMC .....	158
Tabla 21.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores para SMC en X-X ...	159
Tabla 22.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores para SMC en Y-Y ...	159
Tabla 23.	Derivas máximas en estructura aislada para SMC en X-X .....	160
Tabla 24.	Derivas máximas en estructura aislada para SMC en Y-Y .....	160
Tabla 25.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Ancash 1970 .. .....	162
Tabla 26.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Arequipa 2001 .....	162
Tabla 27.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Lagunas 2019 .....	162

Tabla 28.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1966.....	162
Tabla 29.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1974	163
Tabla 30.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Moyobamba 2005 .....	163
Tabla 31.	Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Pisco 2007 .....	163
Tabla 32.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Ancash 1970 .....	164
Tabla 33.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Ancash 1970 .....	164
Tabla 34.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Arequipa 2001 .....	165
Tabla 35.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Arequipa 2001 .....	165
Tabla 36.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lagunas 2019 .....	166
Tabla 37.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lagunas 2019 .....	166
Tabla 38.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1966 .....	167
Tabla 39.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1966 .....	167
Tabla 40.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1974 .....	168
Tabla 41.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1974 .....	168
Tabla 42.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Moyobamba 2005 .....	169
Tabla 43.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Moyobamba 2005 .....	169



Tabla 44.	Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Pisco 2007 .....	170
Tabla 45.	Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Pisco 2007 .....	170
Tabla 46.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Ancash 1970 .....	171
Tabla 47.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Arequipa 2001 .....	171
Tabla 48.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Lagunas 2019 .....	171
Tabla 49.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Lima 1966 .....	172
Tabla 50.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Lima 1974 .....	172
Tabla 51.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Moyobamba 2005 .....	172
Tabla 52.	Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Pisco 2007 .....	172
Tabla 53.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Ancash 1970 .....	173
Tabla 54.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Ancash 1970 .....	173
Tabla 55.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Arequipa 2001 .....	174
Tabla 56.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Arequipa 2001 .....	174
Tabla 57.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Lagunas 2019 .....	175
Tabla 58.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Lagunas 2019 .....	175
Tabla 59.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Lima 1966 .....	176

Tabla 60.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Lima 1966 .....	176
Tabla 61.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Lima 1974 .....	177
Tabla 62.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Lima 1974 .....	177
Tabla 63.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Moyobamba 2005 .....	178
Tabla 64.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Moyobamba 2005 .....	178
Tabla 65.	Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Pisco 2007 .....	179
Tabla 66.	Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Pisco 2007 .....	179
Tabla 67.	Fuerzas de piso en X-X de estructura aislada con respecto a sismo de diseño .....	183
Tabla 68.	Fuerzas de piso en Y-Y de estructura aislada con respecto a sismo de diseño .....	184
Tabla 69.	Desplazamientos en X-X para estructura aislada con respecto a sismo de diseño. ....	184
Tabla 70.	Desplazamientos en Y-Y para estructura aislada con respecto a sismo de diseño. ....	185
Tabla 71.	Derivas máximas en X-X de estructura aislada con respecto a sismo de diseño.....	185
Tabla 72.	Derivas máximas en Y-Y de estructura aislada con respecto a sismo de diseño.....	186
Tabla 73.	Cuadro comparativo cortante sísmica Sismo de diseño X-X en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento .....	187
Tabla 74.	Cuadro comparativo cortante sísmica Sismo de diseño Y-Y en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento .....	187
Tabla 75.	Cuadro comparativo desplazamiento con Sismo de diseño X-X en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento .....	189

Tabla 76.	Cuadro comparativo desplazamiento con Sismo de diseño Y-Y en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento .....	189
Tabla 77.	Cuadro comparativo derivas máximas con Sismo de diseño X-X en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento .....	191
Tabla 78.	Cuadro comparativo derivas máximas con Sismo de diseño Y-Y en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento .....	192

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución de cargas en un sistema MDL dividido en sus 3 componentes principales.....	47
Figura 2.	Colocación de acero para muros en obra Ciudad Sol de Retablo - Comas .....	54
Figura 3.	Encofrado de sistema muro-losa en obra Ciudad Sol de Retablo.....	56
Figura 4.	Vaciado en sistema muro-losa de obra Ciudad Sol de Retablo .....	60
Figura 5.	Instalaciones de agua, desagüe, luz y gas en obra Ciudad Sol de Retablo .....	61
Figura 6.	Distribución de departamentos y áreas comunes en planta típica – Proyecto Ciudad Sol de Retablo (CSDR) en Comas .....	67
Figura 7.	Distribución interna en departamento típico - CSDR.....	68
Figura 8.	Sistema de dos grados de libertad.....	73
Figura 9.	Sistema con aislación idealizado como sistema con dos grados de libertad ....	74
Figura 10.	Parámetros de ciclo de histéresis para modelo bilineal de aislador sísmico ....	77
Figura 11.	Espectros de respuesta para un 5% de amortiguamiento.....	81
Figura 12.	Aceleración en función al periodo/Desplazamiento en función al periodo .....	82
Figura 13.	Aislador de bajo amortiguamiento LRD .....	83
Figura 14.	Aislador con núcleo de plomo LRB .....	86
Figura 15.	Aislador de alto amortiguamiento HDR.....	88
Figura 16.	Aislador con sistema de péndulo friccional (FPS) .....	90
Figura 17.	Aislador con sistema de péndulo de fricción de doble curvatura.....	91
Figura 18.	Dimensiones de análisis para aislador con péndulo de fricción de doble curvatura .....	92
Figura 19.	Gráfica distribución de edificios aislados en el Perú (2017).....	94
Figura 20.	Edificios aislados en el Perú según n° de pisos (2017) .....	94
Figura 21.	Centro de información e investigación de FIC-UNI .....	96
Figura 22.	Atlantik Ocean Tower .....	97
Figura 23.	Edificio Paseo Colonial .....	97
Figura 24.	Hospital Santa Gema, Yurimaguas.....	98
Figura 25.	Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC).....	99
Figura 26.	Estructuración de interfaz de aislamiento en planta .....	103
Figura 27.	Partes del sistema de aislamiento .....	104

Figura 28.	Factor de amortiguamiento $B_M$ .....	104
Figura 29.	Lazo histerético de un aislador sísmico.....	108
Figura 30.	Fuerzas inerciales por piso.....	125
Figura 31.	Espectro para sismo de diseño según E 0.30-2018.....	126
Figura 32.	Definición de espectro de respuesta para sismo de diseño.....	127
Figura 33.	Combinación para análisis modal.....	128
Figura 34.	Registro de aceleración Lima 1966 E-O en Z4 y S1.....	129
Figura 35.	Registro de aceleración Lima 1966 N-S en Z4 y S1.....	129
Figura 36.	Registro de aceleración Ancash 1970 E-O en Z4 y S1.....	130
Figura 37.	Registro de aceleración Ancash 1970 N-S en Z4 y S1.....	130
Figura 38.	Registro de aceleración Lima 1974 E-O en Z4 y S1.....	130
Figura 39.	Registro de aceleración Lima 1974 N-S en Z4 y S1.....	131
Figura 40.	Registro de aceleración Arequipa 2001 E-O en Z4 y S1.....	131
Figura 41.	Registro de aceleración Arequipa 2001 N-S en Z4 y S1.....	131
Figura 42.	Registro de aceleración Moyobamba 2005 E-O en Z4 y S1.....	132
Figura 43.	Registro de aceleración Moyobamba 2005 N-S en Z4 y S1.....	132
Figura 44.	Registro de aceleración Pisco 2007 E-O en Z4 y S1.....	133
Figura 45.	Registro de aceleración Pisco 2007 N-S en Z4 y S1.....	133
Figura 46.	Registro de aceleración Lagunas 2019 E-O en Z4 y S1.....	133
Figura 47.	Registro de aceleración Lagunas 2019 N-S en Z4 y S1.....	134
Figura 48.	Definición de propiedades para concreto $f'_c$ 210 kg/cm <sup>2</sup> .....	134
Figura 49.	Definición de propiedades para concreto $f'_c$ 175 kg/cm <sup>2</sup> .....	135
Figura 50.	Definición de propiedades para acero $f'_y$ 4200 kg/cm <sup>2</sup> .....	135
Figura 51.	Definición de elementos de muro 10 cm.....	136
Figura 52.	Definición de elementos de muro 15 cm.....	136
Figura 53.	Definición de elementos de losa 12 cm.....	137
Figura 54.	Resistencia del concreto en modelo de 8 pisos.....	137
Figura 55.	Primer modo de vibración sin aislamiento.....	139
Figura 56.	Segundo modo de vibración sin aislamiento.....	139
Figura 57.	Tercer modo de vibración sin aislamiento.....	139
Figura 58.	Espectro de respuesta para sismo máximo considerado en Z <sub>4</sub> y S <sub>1</sub> en términos de g.....	146

Figura 59.	Predimensionado nivel de base proyecto Techo Propio .....	147
Figura 60.	Diagrama de histéresis aislador tipo 1 .....	151
Figura 61.	Diagrama de histéresis aislador tipo 2 .....	152
Figura 62.	Diagrama de histéresis aislador tipo 3 .....	152
Figura 63.	Definición de aislador Tipo I en ETABS V15 .....	153
Figura 64.	Definición de aislador Tipo II en ETABS V15 .....	153
Figura 65.	Definición de aislador Tipo III en ETABS V15.....	153
Figura 66.	Primer modo de vibración con aislamiento .....	156
Figura 67.	Segundo modo de vibración con aislamiento .....	156
Figura 68.	Tercer modo de vibración con aislamiento.....	156
Figura 69.	Modelo final de la interfaz de aislamiento .....	180
Figura 70.	Secciones de vigas en nivel de base .....	181
Figura 71.	Planta de cimentación del sistema aislado.....	182
Figura 72.	Viga de cimentación perimetral de sistema aislado.....	182
Figura 73.	Reducción de cortante sísmica en estructura con aislamiento.....	188
Figura 74.	Reducción de desplazamiento lateral de entrepiso en estructura aislada con Sismo de diseño X-X.....	190
Figura 75.	Reducción de desplazamiento lateral de entrepiso en estructura aislada con Sismo de diseño Y-Y .....	190
Figura 76.	Reducción de deriva máxima de entrepiso en estructura aislada .....	192

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.	Ecuación del movimiento $m_1$ .....	73
Ecuación 2.	Ecuación del movimiento $m_2$ .....	73
Ecuación 3.	Ecuación del movimiento de un sistema aislado con 2 gdl .....	75
Ecuación 4.	Factor de rigidez del modelo aislado .....	75
Ecuación 5.	Frecuencia natural del sistema de aislamiento .....	75
Ecuación 6.	Periodo natural del sistema de aislamiento.....	76
Ecuación 7.	Factor que modifica el periodo natural de la estructura aislada .....	76
Ecuación 8.	Desplazamiento máximo en el rango elástico .....	78
Ecuación 9.	Rigidez plástica.....	78
Ecuación 10.	Rigidez efectiva .....	78
Ecuación 11.	Energía disipada .....	79
Ecuación 12.	Amortiguamiento efectivo .....	79
Ecuación 13.	Amortiguamiento efectivo en términos adimensionales .....	80
Ecuación 14.	Capacidad de carga del aislador .....	84
Ecuación 15.	Rigidez lateral.....	84
Ecuación 16.	Rigidez vertical.....	85
Ecuación 17.	Desplazamiento lateral admisible .....	85
Ecuación 18.	Capacidad de carga aislador LRB .....	86
Ecuación 19.	Rigidez elástica aislador LRB .....	87
Ecuación 20.	Rigidez plástica aislador LRB .....	87
Ecuación 21.	Carga de cedencia aislador LRB .....	87
Ecuación 22.	Capacidad de carga aislador HRD .....	89
Ecuación 23.	Fuerza horizontal aislador FPS.....	90
Ecuación 24.	Rigidez horizontal aislador FPS .....	91
Ecuación 25.	Periodo natural aislador FPS .....	91
Ecuación 26.	Fuerza de fricción aislador FPS.....	92
Ecuación 27.	Aceleración debido al SMC.....	104
Ecuación 28.	Desplazamiento máximo .....	105
Ecuación 29.	Desplazamiento máximo total .....	105
Ecuación 30.	Periodo fundamental de la estructura .....	105

Ecuación 31. Rigidez efectiva del sistema de aislamiento .....	106
Ecuación 32. Rigidez efectiva de una unidad de aislamiento .....	106
Ecuación 33. Rigidez vertical.....	109
Ecuación 34. Módulo de elasticidad.....	110
Ecuación 35. Fuerza cortante basal .....	123
Ecuación 36. Espectro de aceleraciones según sismo de diseño .....	126
Ecuación 37. Espectro de aceleraciones según SMC .....	145



## RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar de qué manera mejora el desempeño sísmico en un edificio con muros de ductilidad limitada (MDL) utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo del distrito de Comas, ciudad de Lima-Perú.

El método consistió en una investigación del tipo cuasi experimental de nivel explicativo y de alcance exploratorio y comparativo, recolectando datos por medio de la observación directa y analizando resultados utilizando la estadística descriptiva. El procedimiento consistió en el modelamiento estructural del edificio de MDL de 08 pisos con base fija partiendo de la documentación y estudios recolectados del proyecto existente para luego ser sometido a un análisis sísmico y verificar que cumpla con los requisitos de la norma E 030 de Diseño Sismorresistente. Con el modelo verificado, se implementó aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo de manera que cumplan con la norma E 031 de aislamiento sísmico aprobado para el Perú y se realizó un análisis comparativo del desempeño sísmico de cada modelo.

Como resultado se demostró que el modelo aislado alcanza una reducción del orden del 63-65% en la fuerza cortante basal, una reducción del 94% en los desplazamientos laterales del último nivel y una reducción del orden del 75% en las derivas máximas de entrepiso con respecto al modelo de base fija, concluyendo así que el edificio de muros de ductilidad limitada utilizando aisladores sísmicos elastoméricos alcanza una mejora importante en el desempeño sísmico del proyecto.

**Palabras clave:** muros de ductilidad limitada, aisladores sísmicos elastoméricos, desempeño sísmico.

## ABSTRACT

The research work have the goal to determine how the seismic performance improve in a building with limited ductility walls using elastomeric seismic isolators in the Ciudad Sol de Retablo project located in Comas, city of Lima-Peru.

The method consists of a quasi-experimental type investigation of explanatory level and exploratory and comparative scope, collecting data through direct observation and analyzing results using descriptive statistics. The procedure consisted of the structural modeling of the 08-story MDL building with a fixed base starting with the compilation of the documentation and studies of the existing project to then doing a seismic analysis and verifying that it meets the requirements of the E030 code for seismic design. With the verified model, elastomeric seismic isolators with lead core were implemented complying with the E 031 code for seismic isolation approved for Peru and a comparative analysis of the seismic performance of each model was performed.

As a result, it was shown that the isolated model achieves a reduction of the order of 63-65% in the basal shear force, a reduction of 94% in the lateral displacements of the last level and a reduction of the order of 75% in the maximum drift of the project with respect to the fixed base model, thus concluding that the construction of limited ductility walls using elastomeric seismic isolators achieves a significant improvement in seismic performance of the building.

**Keywords:** limited ductility walls, elastomeric seismic isolators, seismic performance.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento y Delimitación del Problema

#### 1.1.1. Realidad problemática

El distrito de Comas, correspondiente a la ciudad de Lima, es el cuarto distrito más poblado del país (520 450 habitantes según censo de 2017, reportado por INEI) con una tasa de crecimiento de 0.7%. A su vez, su población se encuentra caracterizado socioeconómicamente por grupos del sector C y D (aprox. 75% de la población del distrito según estudios realizados por APEIM en el año 2016).

El crecimiento de esta población se encuentra correlacionado a un incremento en la demanda de hogares que viene siendo cubierta a través de un conjunto de proyectos de vivienda social respaldados por el gobierno a través de programas como Techo Propio y Mi Vivienda.

En el sector que antaño correspondió al aeródromo de Collique, ubicado en el corazón del distrito, se vienen desarrollando 3 proyectos importantes de vivienda social que en su conjunto cubrirán una demanda proyectada inicialmente el año 2012 de aprox. 20,000 viviendas. Para el año 2020, ya se ha habilitado y edificado cerca del 25% del terreno del megaproyecto.

Estos proyectos están compuesto por unidades de edificios con sistemas mixtos que utilizan muros de ductilidad limitada con muros estructurales. Las edificaciones con muros de ductilidad limitada, también denominados MDL, componen un mecanismo estructural y constructivo identificado por la norma de diseño sismorresistente y extensamente aplicado en proyectos de vivienda social como multifamiliares. Esta realidad puede a su vez verse reflejada en toda la extensión del territorio peruano. La

E.030-2018 señala en el numeral 16.1.d) que con el sistema MDL es posible edificar un máximo de 08 pisos.

Sin embargo, vale mencionar que existe hasta la fecha una serie de investigaciones y regulaciones que buscan un mayor grado de certidumbre con respecto al comportamiento real de estas estructuras frente a un sismo de intensidad severa. En una entrevista de julio del 2015 al Ing. Genner Villarreal este menciona su preocupación por el desempeño de edificios con MDL frente a sismos de larga duración. Asimismo, debido a que es un tipo de estructura recientemente introducido en nuestro país y con una demanda creciente desde inicios del siglo, no ha existido la oportunidad de que este sistema sea ensayado en escala natural frente a un movimiento sísmico de intensidad severa, y esto en el contexto de un país con alta actividad sísmica.

Las estructuras con sistema MDL en nuestro país surgen alrededor de los años 80, con un importante apogeo en los 90 y principios de siglo, impulsado por su ventaja de poseer un proceso de construcción rápido y costos comparativamente competitivos frente a edificaciones semejantes con sistemas aporticados y duales.

Fue el ingeniero Blanco Blasco (2006), en el contexto de una expansión importante de este sistema constructivo sin respaldo de una normativa, uno de los primeros en plantear la necesidad de comprender mejor el comportamiento de estas estructuras frente a movimientos sísmicos, surgiendo así una comisión del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP) y posteriormente el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) estableció en 2004 las disposiciones para los EMDL en las normas de diseño sismorresistente (E 0.30) y Concreto Armado (E 0.60).

En este periodo, diversas investigaciones sobre los edificios con MDL se han presentado.

Raúl Delgado y Catalina Rodríguez (2006) realizaron una de las primeras investigaciones en el país consistente en la consulta a expertos sobre la vulnerabilidad de estas edificaciones frente a sismos, concluyendo que ante sismos severos los daños a la estructura corresponderían a un 50% por concepto de reparación. Además se concluye que edificios con MDL entre 5 y 7 pisos quedarían irreparables ante los efectos de sismos de intensidades de IX MM o más. En el 2007 Ángel San Bartolomé y Alejandro Muñoz elaboraron un estudio experimental para comprobar el comportamiento de muros delgados de concreto armado con mallas electrosoldadas, ensayando tres testigos con características distintas y evaluando su respuesta frente a cortante y flexión. El estudio concluyó que teniendo en cuenta las deficiencias de obra, que pueden ser comunes en este tipo de construcciones, es posible encontrar fallas por deslizamiento que exigen la necesidad de limitar las derivas máximas de entrepiso en este tipo de edificaciones.

Así mismo Ernesto Rodríguez (2011) siguiendo esta línea de investigación analizó y sometió a ensayos dos modelos de muros delgados de concreto armado con 8 cm de espesor con fines de evaluar su comportamiento frente a la cortante basal, demostrando de manera experimental su validez acorde con el actualizado código E.060 del RNE. Sin embargo, vale mencionar que las conclusiones y recomendaciones siguen los pasos de los obtenidos por la investigación previa, preocupándose por la calidad de la colocación del concreto y por el hecho de que pese a ser el muro diseñado para una falla por flexión, siendo mayor la resistencia por corte, la falla finalmente se haya presentado debido a la fuerza cortante.

Finalmente, con fines de expandir el conocimiento generado a partir de los estudios de Delgado y Rodríguez en el 2006, Cesar Reyes (2017) realizó un estudio analítico para verificar la vulnerabilidad sísmica de edificios con MDL, en la cual se concluyó que frente a sismos raros y muy raros el costo de reconstrucción se halla entre un rango del 33% y 49% del costo de reconstrucción, que si bien resulta en un rango inferior a la estimación inicial con el método Delphi, sigue representando un porcentaje importante del costo teniendo en cuenta la condición socioeconómica del ocupante promedio en este tipo de edificaciones, quienes se hallarían en grave perjuicio al no poseer los medios para solventar esta reconstrucción.

Teniendo en cuenta que el Perú es un país de importante vulnerabilidad sísmica las normas de ingeniería se vienen revisando para otorgar mayor seguridad al usuario final y equipos primordiales que ocupan las edificaciones, lo que se ve reflejado en la más reciente norma E 0.30 en su tabla N° 05, donde introduce la obligatoriedad en la introducción de mecanismos de aislación para proyectos categorizados como A1 (esenciales). Además, en su acápite 3.9 menciona que se encuentra autorizado el uso de estos dispositivos sin restricción en la categoría del uso del proyecto mientras se halle en cumplimiento con la norma ASCE/SEI 7-10. Actualmente ya existe una norma para aislamiento sísmico que tiene en cuenta la realidad peruana, y hay evidencia de la tecnología de aislamiento en el mercado que incluyen iniciativas privadas para viviendas multifamiliares. Cabe mencionar que es gracias a la introducción del uso de aisladores por parte de la norma que ha podido surgir una creciente oferta de proyectos que incluyen esta tecnología antisísmica en diversas edificaciones del país, tanto correspondientes al sector salud, como edificios comerciales e incluso de vivienda, no existiendo todavía una propuesta de vivienda

social que incluya estos dispositivos. Así mismo, pese a la introducción de los aisladores sísmicos al mercado de la construcción en nuestro país y su consecuente demanda, como puede evidenciarse en la presentación de A. Talavera en el año 2017 sobre el estado de proyectos con mecanismos de aislación, nuestro país sigue encontrándose rezagado tanto en la oferta de edificaciones antisísmicas como en el desarrollo de investigación relacionada con aisladores frente a los países vecinos.

Entre las variantes de aisladores sísmicos, uno de los dispositivos más utilizados comercialmente es el de los aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo LRB, los cuales son dispositivos pasivos que “desacoplan” la estructura de un edificio del suelo de fundación de manera que frente al efecto de la carga horizontal de un sismo tienen la capacidad de mitigar una parte de la energía convirtiéndola en movimiento, reduciendo el efecto de la cortante sísmica y teniendo una considerable ventaja en su aplicación a estructuras con periodos naturales cortos, propiedad que caracteriza a las estructuras rígidas tales como los edificios con muros de ductilidad limitada.

Frente al panorama mencionado, surge la alternativa de incorporar una propuesta de diseño estructural que adicione protección antisísmica a los proyectos de muros de ductilidad limitada que sirven como viviendas multifamiliares añadiendo un sistema de aisladores sísmicos elastoméricos, controlando en mayor medida el riesgo al colapso y mitigando la incertidumbre del comportamiento real de estas estructuras frente a sismos severos cuando su base es fija, considerando que en la actualidad ya se dispone con precedentes de implementación de aisladores en vivienda social, por ejemplo, en el vecino país de Chile, que construyó el edificio de la comunidad de Andalucía en los años 90 con fines de comparar la respuesta entre un edificio con

base aislada y un similar con base fija, pudiendo constatarse la mejora en su desempeño durante el sismo ocurrido en el año 2010. El edificio de la comunidad Andalucía es una construcción de vivienda con muros de albañilería y 4 niveles.

La demanda de viviendas a la actualidad se mantiene y para el año 2035 se proyecta en alrededor de 600,000, es por tanto posible suponer que la oferta de proyectos con MDL intentará corresponder a esta demanda en distritos con gran población y tasa de crecimiento como la de Comas.

Es posible por tanto considerar los parámetros de sismo que correspondan a la zona mencionada de este distrito, a fin de elaborar una propuesta que se afiance con la realidad, contando para ello con el EMS del lugar, así como los planos de arquitectura y estructuras de un edificio de 8 pisos tipo Techo Propio, correspondiente al proyecto Ciudad Sol de Retablo, uno de los 3 megaproyectos de vivienda que se vienen desarrollando en el ex aeródromo de Collique.

Si bien no existen investigaciones precedentes en nuestro país que hayan considerado un análisis comparativo del comportamiento entre un edificio con muros de ductilidad limitada y una versión del mismo aislada por dispositivos elastoméricos, investigaciones análogas han surgido con la finalidad de evaluar la mejora en el desempeño sísmico de edificios con otros sistemas estructurales.

En Chile, Jaime Arriagada elaboró en el año 2005 un estudio para comparar la respuesta sísmica de un edificio de oficinas de siete pisos cuando la base es desacoplada con aisladores sísmicos. Acorde con su análisis, pudo constatar una reducción del 84-90% de la cortante sísmica y una reducción del 82-95% en el desplazamiento lateral relativo del último nivel.



Paul Korswagen, Julio Arias y Pamela Huaringa elaboraron en el 2012 una de las primeras investigaciones nacionales relacionadas con la implementación de aisladores sísmicos. En su estudio concluyeron que edificios más rígidos son mejor beneficiados por mecanismos aislantes, así mismo edificios que no superan entre los 30 a 40 metros de altura. José Soriano (2014) comparó la respuesta estructural del pabellón A de la Universidad Privada del Norte sede Cajamarca realizando un modelo matemático de la estructura aislada y evaluando su respuesta cuando son añadidos aisladores sísmicos. Su análisis permitió obtener una reducción de la cortante basal en un 71%, así como una reducción del 50% de las derivas de entrepiso, obteniendo una mejora en el desempeño sísmico. Zutner Meza (2015) evaluó en la ciudad de Piura el diseño de un edificio hospitalario cuando son incorporados aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, verificando una reducción de la fuerza cortante basal de 73.9%, así como una reducción del 86.9% de las derivas de entrepiso. Marcos Leyton (2017) realizó nuevamente una comparación de la respuesta sísmica esta vez aplicado a un edificio de vivienda con 7 pisos y 2 sótanos, obteniendo que su alternativa de modelo con aisladores sísmicos alcanza una reducción de 78.8% de las fuerzas cortantes basales y un decremento del 69.5% en las derivas máximas.

Considerando que la adición de mecanismos de aislación en otros modelos estructurales para edificaciones ha resultado efectiva, brindando resultados satisfactorios, la problemática en el asunto de su utilización en edificios con MDL radica en si este mejoramiento del comportamiento sismorresistente tiene resultados similares, a fin de que pueda resultar una alternativa viable para resolver la problemática hallada en la vulnerabilidad frente a sismos de intensidad severa en este

tipo de estructuras. Se tiene en cuenta que el desempeño sísmico puede ser evaluado en términos de su cortante basal, desplazamientos laterales del último nivel y derivas máximas.

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **Problema General:**

- ¿De qué manera mejorará el desempeño sísmico de un edificio con MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo, Comas?

#### **Problemas Específicos:**

- ¿En cuánto mejorará el comportamiento frente a la cortante basal sísmica en un edificio con MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo, Comas?
- ¿En cuánto se mejorarán los desplazamientos laterales del último nivel en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo, Comas?
- ¿En cuánto se mejorarán las derivas máximas en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo, Comas?

### **1.1.3. Importancia y Justificación del Estudio**

#### **1.1.3.1 Justificación**

La justificación de esta investigación parte de la necesidad de resolver la problemática de la vulnerabilidad sísmica en edificios con muros de ductilidad limitada, ante los cuales recientes estudios demuestran que los costos de reparación superarían los alcances de los ocupantes de estos edificios muchas veces

construidos con fines de vivienda social para sectores socioeconómicos C y D, esto sin tener en cuenta el riesgo que existe sobre la seguridad y las vidas involucradas frente al desastre inminente debido a un movimiento telúrico de intensidad severa en un país de alta sismicidad como el Perú. Con la implementación de aisladores sísmicos como una oportunidad para otorgar una mejor garantía de protección antisísmica, esta investigación se propone a verificar una alternativa de edificio con muros de ductilidad limitada, tomando como muestra representativa un modelo preexistente del proyecto Ciudad Sol de Retablo ubicado en el distrito de Comas, para compararlo con su versión aislada y comprobar su mejora en el desempeño sísmico, apoyando sus resultados en investigaciones previas realizadas en otro tipo de edificaciones con diferente sistema estructural. Dado que no existe en la actualidad mucha investigación centrada en la protección antisísmica para viviendas sociales, esta tesis se dispone a servir como punto de partida para un mejor entendimiento de las alternativas que existen y se vienen implementando ya en nuestro país, como son los dispositivos de protección antisísmica que vienen siendo utilizados de forma obligatoria por la normativa vigente en edificios de categoría esencial, como hospitales de segundo y tercer nivel de atención.

En resumen, esta tesis se justifica porque emplea herramientas y conocimientos sobre la aislación sísmica obtenidos en investigaciones previas para resolver una problemática poco explorada sobre un sistema estructural del cual otros estudios señalan una preocupación por su condición de vulnerabilidad sísmica, y que busca resolverse analizando una propuesta estructural con aisladores sísmicos verificando su mejora sobre la reducción de la fuerza cortante basal, el desplazamiento relativo en el último nivel y la reducción de derivas de entrepiso.

### **1.1.3.2 Importancia**

La importancia del presente estudio reside en que, si bien podría considerarse justificado en un análisis comparativo que asemeja a muchos estudios previos, es, si no el primero, uno de los pocos estudios en nuestro país que combina la idea de aplicar aisladores sísmicos a una estructura consistente exclusivamente en muros portantes, es decir, sin elementos lineales tales como columnas y vigas que suelen ser el sistema que mejor se ajusta en cuanto a diseño de aisladores se refiere. Existe un limitado estudio en la investigación peruana dedicada a la adición de mecanismos de aislación en vivienda social, tipo de vivienda que suele tener como característica algún sistema pocas veces basados en pórticos, sino más bien en muros (se trate de albañilería confinada, armada, o MDL).

### **1.1.4. Limitación del estudio**

Cabe tener en cuenta que el estudio se limita al modelado y cálculo estructural, agregando al modelo de un edificio existente una propuesta de aisladores sísmicos y verificando que en los cálculos correspondientes se cumpla con los parámetros de las normas locales de ingeniería vigentes. Se utiliza como herramienta software de ingeniería.

El presente estudio no incorpora un modelo de laboratorio para ser ensayado y se limita a una sola propuesta con aisladores sísmicos, específicamente aisladores LRB, los cuales tienen amplia vigencia y comercialización en el contexto local, sin explorar diferentes alternativas con otros modelos de aisladores también presentes en el mercado local e internacional.

Esta investigación tampoco incorpora una optimización estructural de la superestructura, esto porque se busca una comparativa directa entre el modelo fijo y el aislado.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Determinar de qué manera mejorará el desempeño sísmico en un edificio con muros de ductilidad limitada utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar en cuanto mejorará el comportamiento frente a la cortante basal sísmica en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo.
- Calcular en cuanto se mejorarán los desplazamientos laterales del último nivel en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo.
- Demostrar en cuanto se mejorarán las derivas máximas en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos en el proyecto Ciudad Sol de Retablo.

## **1.3. Hipótesis**

### **1.3.1. Hipótesis general**

- La utilización de aisladores sísmicos en edificios con MDL permitirá una mejora en el desempeño sísmico del proyecto Ciudad Sol de Retablo, Comas.

### 1.3.2. Hipótesis específicas

- El comportamiento frente a la cortante basal sísmica en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos mejorará con respecto al sistema MDL con base fija para el proyecto Ciudad Sol de Retablo.
- Los desplazamientos laterales del último nivel en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos mejorarán con respecto al sistema MDL con base fija para el proyecto Ciudad Sol de Retablo.
- Las derivas máximas en un edificio MDL utilizando aisladores sísmicos elastoméricos mejorarán con respecto al sistema MDL con base fija para el proyecto Ciudad Sol de Retablo.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Marco Histórico**

#### **2.1.1. Sistema de Muro de Ductilidad Limitada**

Delgado et. al (2006) presenta una breve reseña histórica del surgimiento de este sistema en nuestro país, en la que se tiene como antecesores de los EMDL a las construcciones de los años 40 que consistían en viviendas con sistema de albañilería sobre cimentaciones corridas o plateas de cimentación.

El sistema de EMDL surge en el Perú en los años 80, apoyado en los bajos costos del mercado del acero y concreto, los cuales se vieron incrementados en los años 90, mitigando su expansión, pero obteniendo un resurgimiento a principios del milenio, nuevamente impulsado por los costos del mercado. Desde entonces, se proliferó en gran medida la producción de estas edificaciones, sobre todo orientado a vivienda multifamiliar de índole social, satisfaciendo la demanda en aquel entonces en déficit, teniendo como principal ventaja la velocidad de construcción y costos comparativos muy competentes. A partir de aquí adquiere gran importancia y lleva consigo la atención de los ingenieros de nuestro medio, como el ingeniero Antonio Blanco (2006), planteándose la necesidad de estudiar mejor el comportamiento de estas estructuras frente a los movimientos sísmicos.

Para entonces, los EMDL consistían en edificios de entre 6 pisos en promedio con muros de 10 cm y 15 cm, utilizando mallas de acero electrosoldado dispuestas como malla central o doble malla, losas macizas de dos direcciones de 10 cm y en otros casos de 12 cm con ensanches en áreas de servicios, losas aligeradas, y cimentaciones consistentes en plateas o losas con peralte de 15 a 25 centímetros con vigas perimetrales a manera de dientes de 40 cm de peralte. Además, con el propósito de

concebir edificaciones multifamiliares con sótanos para estacionamientos, las losas de los primeros niveles se convertían en losas de transferencia. Todo este desarrollo transcurría sin el respaldo de una normativa de ingeniería, es así que surge una comisión del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP).

Al cabo de un tiempo el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) establece en 2004 las disposiciones para los EMDL en las normas de Diseño Sismo resistente (E 0.30) y Concreto Armado (E 0.60).

### **2.1.2. Sistema de aisladores sísmicos**

J. Valerio (2015) realizó una investigación en la cual pudo identificar algunos hitos que anteceden a la realidad actual de los aisladores sísmicos. Uno de estos hitos más lejanos nos lleva al geólogo e ingeniero minero John Milne, a quien se le atribuye mejoras al sismógrafo con su diseño de péndulo horizontal. El ingeniero, quien residió en Japón con el objetivo de estudiar con mayor cercanía los terremotos, fue profesor en la Universidad de Tokyo durante el periodo de 1876 a 1895, tiempo en el cual aprovechó para realizar experimentos con modelos de edificios aislados a través de esferas de deslizamiento. Estudios consecutivos le llevaron a obtener un modelo que considerase también los eventuales efectos del viento, marcando una base conceptual para futuras aplicaciones de dispositivos integrados en un sistema de aislación.

Es conocida la carta remitida al director de servicio sismológico de Chile en 1909 por parte del médico inglés J.A. Calantarients, quien propuso un modelo de estructura separada de la fundación mediante una capa fina de talco, esto con el supuesto de que otorgaría un decremento de las acciones horizontales ante el efecto de un movimiento



sísmico, mediante un deslizamiento. Esta idea de edificación segura ante terremotos brindaba todavía una idea incipiente sobre una solución a base de la aislación sísmica. En 1969, en la localidad Skopje, Yugoslavia, se cuenta finalmente con un edificio aislado a través de un sistema con bloques de caucho. Se trata de la escuela Pestalozzi, una edificación de tres niveles de concreto. Vale mencionar que ante la ausencia de un reforzamiento en el material del caucho en este sistema, este tiende a abultarse lateralmente debido al peso de la estructura. Dicho propuesta tecnológica fue llamada *Swiss Full Base Isolation-3D* (FBI-3D).

Es factible sostener que hasta este punto las primeras propuestas de solución fundamentados en la aislación de base pretendían controlar y disminuir las cargas horizontales brindando flexibilidad lateral, pero hallándose con un percance adicional: la necesidad de aportar la rigidez requerida en la dirección vertical para responder ante el desplazamiento de las unidades de aislación y la propiedad de que, tras sucedido el evento sísmico, el sistema pueda restituir su ubicación original. Los aisladores de la escuela Pestalozzi fueron finalmente reemplazados en el año 2007.

Japón, tratándose de una de unas de las zonas mayormente afectadas por la sucesión de terremotos y tsunamis en el Cinturón de fuego del Pacífico, demuestra también encontrarse en una posición vanguardista con respecto al diseño sismorresistente. Es así que en los años 70 empezaron a construirse edificaciones con aisladores basados en unidades compuestas de caucho reforzadas con capas laminares de acero que, vulcanizadas e intercaladas, conformaban una unidad de aislación de material compuesto, el cual proveía de la propiedad de ser flexible lateralmente, debido al caucho, y aumentar proporcionalmente su rigidez, debido al trabajo del acero. Aparecen de esta forma los llamados SREI (*Steel reinforced elastomer isolator*).

Vale tener en cuenta que hasta 1985, solo se contaban con tres proyectos de aisladores en el país, cifra que fue en aumento en consonancia con el crecimiento económico de Japón, hasta 1994. Con el terremoto de Kobe en 1995, el buen comportamiento demostrado por parte de los proyectos de edificaciones con aisladores conllevó a una nueva aceleración, y esta vez de manera abrupta, en la concepción de construcciones con esta tecnología, llegando a contar con 600 edificios para el año 1998.

Nueva Zelanda representa a su vez un importante foco de aportación a la tecnología de la aislación sísmica. En 1978 se construyó aquí el viaducto Toe-Toe, el cual incorporaba la unidad de aislación ya mencionada de caucho y acero intercalados, añadiendo a estas un corazón de plomo en su centro, lo que agregaba todavía más rigidez vertical y más capacidad de carga a la unidad de aislación, así como la propiedad de disipar energía. Se convierte entonces esta estructura en la primera en implementar el sistema LRB (*Lead Rubber Bearing*), el cual continúa vigente y de uso bastante extendido. De esta forma en Nueva Zelanda para 1981 llegaría a construirse la primera edificación con el sistema LRB, el cual sería conocido como *William Clayton* en Wellington. Seguido de este fue construido un edificio de doce pisos con el mismo sistema, *The Union House*.

Estados Unidos estableció su primer proyecto con mecanismos que aislaban la base con el edificio *Foothill Communities Law and Justice Center* (FCLJC), el cual está ubicado en Los Angeles, California, iniciando su construcción en 1984 y culminándolo en 1985. Esta edificación implementó un sistema con unidades de aislación de caucho con alto amortiguamiento natural. Este mismo mecanismo fue utilizado en el proyecto de *The Fire Command and Control Facility* (FCCF). A partir del sismo ocurrido en Northridge, California en 1994, se registró en el país que cinco

edificaciones aisladas habían presentado adecuado comportamiento, por lo que, de manera semejante que en Japón, un número creciente de edificios aislados empezaron a ejecutarse, de manera que para el año 1998 ya se contaban con cuarenta edificios con aislamiento.

En cuanto a la publicación de códigos que regulen el desarrollo de mecanismos de aislación, en EE UU se publicó en 1986 “*Tentative Seismic Isolation Design Requirements*” por parte de la Asociación de Ingenieros Estructurales del Norte de California (SEAOC), que se apoyaba en métodos estáticos para el análisis. La misma SEAOC añade en forma de apéndice en 1990 para su Blue Book “*General Requirements for the Design and Construction of Seismic Isolated Structures*”, el cual luego es modificado y adaptado como apéndice no obligatorio para ser incluido en la edición de 1991 del UBC (*Uniforming Building Code*), este último bajo el título de “Earthquake Regulations for Seismic Isolated Structures”.

La edición de ambos códigos fue actualizándose, incorporándose luego de un tiempo metodologías de análisis dinámicos, hasta que en 1995 el Consejo de Seguridad Sísmica para Edificios adiciona los lineamientos para el desarrollo de proyectos con dispositivos aislantes y disipadores en las solicitudes del NEHRP (*National Earthquake Hazard Reduction Program*). Para 1997 se cuenta con versiones compatibilizadas de los códigos del SEAOC, UBC y NEHRP.

En Sudamérica un pionero en la implementación de aisladores sísmicos es Chile, el cual cuenta con un código propio, la Nch 2745, actualmente en su última edición la del año 2013. En principio de los años noventa los académicos de la Universidad de Chile, María Moroni y Mauricio Sarrazin, incursionaron en la utilización de aisladores con apoyo de Ministerio de Vivienda, logrando así la ejecución de dos

edificios gemelos, uno aislado y el otro construido de forma convencional en la comunidad Andalucía, Santiago. Los efectos del movimiento sísmico ocurrido en Chile en el año 2010 llevaron a un ensayo involuntario de escala natural a las edificaciones con aislamiento sísmico, otorgando buenos resultados y, tal cual como en Japón y en EE UU, alentó una creciente demanda de edificios construidos con esta tecnología, siendo reportados en el 2017 más de cien edificios con dispositivos de aislación antisísmicos en todo el territorio chileno, además de un constante interés de llevar su aplicación a la vivienda social.

Tal como menciona P. Ruiz (2017), son Chile, Colombia y Ecuador los países que acumulan más proyectos con mecanismos de aislación en el subcontinente americano. En Perú el primer proyecto con aisladores presentó su ingeniería en el año 2012, y se trató de una construcción ubicada en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Para el año 2017 se cuentan con alrededor de treinta edificaciones aisladas. Hasta el año 2019 no se contaba con un código de ingeniería propio, solo con un acápite de la norma E. 030 la cual indicaba que el modelo estructural debe seguir en medida de lo posible los lineamientos del código ASCE/SEI 7, norma americana, además de que conforme a la actualización del 2016 de la normativa E. 030 es obligatorio la incorporación de un mecanismo que aisle la base para edificios categorizados como esenciales, específicamente edificaciones del sector salud de segundo y tercer nivel. En la actualidad se dispone de un código adaptado al contexto del país, pues se tiene ya aprobado el proyecto de norma técnica de aislamiento sísmico, cuyos lineamientos tienen su base en el código americano ASCE/SEI, la norma chilena, y la E. 030.

## 2.2. Antecedentes

En cuanto a los antecedentes, no se han encontrado en el medio local tesis ni artículos de investigación sobre modelos de MDL que hayan adicionado un mecanismo de aislamiento basal. Por lo general se han producido estudios que analizan los comportamientos de sistemas comúnmente conocidos como “convencionales”, es decir, modelos de edificios con sistema de pórticos o duales, a los cuales se les analiza con y sin aisladores sísmicos. Cabe mencionar que el hecho de comparar una estructura compuesta exclusivamente por muros de concreto armado, implica un análisis adicional sobre el piso técnico a utilizarse para los aisladores. En los edificios convencionales, los aisladores sísmicos se ubican debajo de los elementos columna, sobre las cuales recaen las cargas gravitacionales del edificio. No sucede así en los proyectos con MDL, cuyos muros trabajan tanto en soporte de las fuerzas gravitacionales y la cortante basal sísmica.

Nos encontramos entonces frente a una propuesta no muy estudiada, pero del cual se poseen importantes antecedentes que sirven al desarrollo del mismo, referido al sistema de MDL en sí, y a parte a los estudios sobre la utilización de aisladores sísmicos.

En cuanto a los sistemas con muros de ductilidad limitada, Delgado Ehni Raúl y Rodríguez Larraín Catalina (2006), en su tesis “Edificios peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada” presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, realizaron la consulta a expertos con el propósito de estimar la vulnerabilidad de este sistema de entonces reciente introducción en el mercado peruano, obteniendo conclusiones importantes, tales como que ante sismos frecuentes edificios con esta

propuesta estructural presentarían el 15% del costo de la ejecución en daños, y ante sismos severos un 50% del costo de reparación. Además, acorde a su investigación, edificios con MDL entre 5 y 7 pisos quedarían irreparables ante los efectos de sismos de intensidades de IX MM o más.

Rodríguez Núñez Miguel Ernesto (2011), en su tesis “Comportamiento a fuerza cortante de muros de concreto de ductilidad limitada con 8 cm de espesor” presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú analizó y sometió a ensayos dos modelos de muros delgados de hormigón reforzado, demostrando de manera experimental su validez acorde con el código E.060 del RNE.

Sobre aisladores sísmicos, Korswagen Eguren Paul, Arias Ricse Julio y Huaranga Huamaní Pamela (2012), en su tesis “Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos” presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, sostienen que la incorporación de dispositivos de aislamiento basal favorece más a ciertas estructuras que otras. Dado que la aislación significa un crecimiento en el periodo natural de la superestructura, estructuras sin aislación que cuentan con periodos muy bajos se verán mucho mejor beneficiados con respecto a proyectos con periodo natural alto. El periodo dependerá de la esbeltez y la cantidad de niveles, y con ello pueden establecerse las limitaciones para un uso eficiente de los aisladores: Esbeltez no mayor a 1.5, altura de edificación menor a 30 o 40 metros u 8 pisos y periodo de la estructura menor al 10% de la cantidad de niveles. Con respecto al presupuesto del proyecto, se infiere en esta investigación que la adición de dispositivos de aislación basal no determina un decremento importante del costo, al contrario, resulta un mayor presupuesto en la construcción, pero a su vez se obtiene un ahorro sobre los costos probables debido a los daños sobre el mobiliario en la eventual sucesión de un

movimiento telúrico de intensidad severa. Resulta pues factible concluir que la incorporación de mecanismos de aislamiento es justificable a nivel económico si los costos del mobiliario son superiores al presupuesto de estructuras, como pasa en hospitales.

Soriano Cacho José Luis (2014), con su investigación titulada “Comparación de la respuesta estructural del pabellón A de la Universidad Privada del Norte con aisladores sísmicos elastoméricos y sin aisladores sísmicos” presentada en la Universidad Privada del Norte emprendió un trabajo de comparación entre los esquemas estructurales de un proyecto categorizado en el uso como importante cuando presenta base fija y aislada. A través del análisis determinó que la implementación de aisladores con un incremento del periodo natural de 0.29 a 2.0 segundos significó una reducción del 71% de las cortantes, y del 50% de las distorsiones de entrepiso máximas. Se empleó el código de la ASCE-17 para el desarrollo y análisis de los dispositivos de protección antisísmica del proyecto aislado.

Romero Urrunaga Yazmín Isabel (2014) en su trabajo investigativo titulado “Análisis Dinámico de Aisladores de Base Elastoméricos como Alternativa de Solución para Edificaciones con Fallas por Piso Blando” presentado ante la Universidad Nacional de Cajamarca, estudia como alternativa de solución a la falla por irregularidad de piso blando en edificaciones, el uso de aisladores sísmicos del tipo elastoméricos. Para esto, toma como muestra una edificación destinada a viviendas multifamiliares, cuya característica principal es que la altura de su primer nivel es mayor comparada con los demás niveles, así mismo presenta escasez de muros, ya que este nivel es destinado para estacionamientos, la cual modela y analiza con la ayuda del programa ETABS. El procedimiento partió en evaluar la irregularidad de piso blando con los resultados

recabados del programa y luego modelarlo nuevamente, pero con los dispositivos ubicados en un primer modelo separando la cimentación de la estructura y, en un segundo modelo ubicándolos encima de los pilares del nivel uno, donde ocurre la falla; y mediante esta forma se comparó los resultados obtenidos. El autor determina que los mecanismos de aislamiento mitigan la falla por piso blando ya que los resultados arrojaron que las derivas ubicados en el nivel uno de la edificación, donde ocurre la falla por piso blando, se reducen tanto como cuando se posicionan estos dispositivos separando la superestructura de la cimentación así como en el caso donde se instalan sobre los pilares del primer nivel. La influencia de los dispositivos aislantes elastoméricos es favorable tanto para el control de la falla por piso blando como para controlar la energía telúrica entrante, que genera a su vez una relevante disminución de las tensiones en los elementos de la edificación.

Meza Palacios Zutner Merliht (2015) en su tesis “Análisis y Diseño de un hospital con aisladores elastoméricos en el Perú” presentada en la Universidad Nacional de Piura, investiga la implementación de mecanismos de aislación principalmente del tipo elastómero y deslizantes por fricción. El trabajo de investigación resalta la importancia de incrementar la seguridad y operatividad de estructuras esenciales como son los hospitales. Para esto, la autora diseñó un hospital utilizando aisladores sísmicos. Comparó el desempeño de una edificación aislada y otra sin aislar bajo los criterios establecidos en la norma ASCE 7-10, concluyendo debido a los valores recabados en la investigación que, al implementar aisladores a una edificación convencional las aceleraciones, las cuales son directamente proporcionales a las fuerzas cortantes, disminuyen en un 73.9%, mientras que las derivas máximas se reducen en 86.9%. De igual manera la autora también concluye que las deformaciones relativas que



caracterizan a la edificación dispositivos de aislamiento son mínimos porque el modelo estructural se desempeña de forma similar a un sólido rígido y quien absorbe buena fracción de la aceleración del suelo es el mecanismo aislante.

Huanca Chambilla Jhessenia y Meléndez Limache Marienela (2016) en su tesis titulada: “Análisis Dinámico Modal Espectral de una Edificación Convencional y otra con Aisladores Sísmicos A nivel Intermedio de la Estructura en la Ciudad de Tacna” presentada en la Universidad Privada de Tacna, Perú, elabora el análisis sismorresistente de un proyecto de hormigón reforzado de 5 niveles con 2 sótanos y otra incluyendo un mecanismo de aislación a nivel intermedio de la edificación para comparar su comportamiento. Las autoras emplean el programa computacional Matlab y como referencia utilizan la norma ASCE 7-10. Realizan el comparativo de los valores obtenidos para el comportamiento sísmico de cada estructura, en donde se observa que la máxima fuerza cortante sin aislamiento es mucho mayor que la obtenida en la estructura con aisladores, habiéndose obtenido una reducción de 54.86%. Para los desplazamientos se obtuvieron resultados similares, existen grandes desplazamientos en la edificación con base fija, a su vez que en la edificación con aisladores solamente se registró un desplazamiento considerable en el nivel en el que se ubica el aislador, siendo mínimos estos valores para el resto de pisos. Respecto a las derivas, el modelo fijo tiene su máxima deriva en la planta uno al igual como sucede en la edificación aislada, donde la más alta distorsión de entrepiso se encuentra también en la planta uno pero con una considerable reducción en su valor equivalente al 80.42%. Las autoras concluyen que la estructura de 5 pisos con dos sótanos que presenta aislamiento a nivel intermedio, tiene un mejor comportamiento estructural ante un sismo, que una estructura convencional. Así mismo, con la implementación de

aisladores se logra establecer mecanismos que mejoran las propiedades sismorresistentes cuyo fin es proteger a las edificaciones ante movimientos sísmicos.

Leyton Bradley Marcos (2017) en su trabajo investigativo titulado “Implementación de aisladores sísmicos en un edificio de viviendas en Lima, Perú” presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú describe la técnica de los dispositivos de aislamiento basal desde los postulados más básicos y aspectos de la filosofía del diseño, hasta la dinámica de las propiedades y los mecanismos de protección que los caracterizan. El autor también realiza una comparación entre el modelo estructural existente y una propuesta con dispositivos de aislación en un proyecto de vivienda de varios pisos. Para esto, seleccionó un proyecto de vivienda de 2 sótanos y 7 pisos de una residencia ubicada en San Isidro - Lima. La aplicación de aisladores sísmicos significó una reducción del 78.8% de las cortantes, y un decremento del 69.5% en las derivas máximas. El autor concluyó que el aislamiento determina la forma de vibración casi independientemente de la superestructura.

Reyna Flores Alisson Kimberly (2017) en su tesis “Análisis comparativo de la respuesta sísmica de estructuras de concreto armado con y sin aisladores sísmicos en la base según su variación en la altura” presentada en la Universidad César Vallejo en Perú realiza una comparación en el comportamiento de un proyecto con elementos de hormigón reforzado cuando posee base fija y cuando posee base aislada en medida que va cambiando su altura. La autora obtuvo el desempeño sísmico de los modelos estructurales utilizando un análisis no lineal tiempo-historia para la versión fija y aislada. De los resultados, la tendencia en las respuestas del proyecto en estudio es reducirse conforme esta es más alta, pues el periodo aumenta y la aceleración se reduce. Por otro lado, concluyó que al emplear los dispositivos aislantes de tipo

elastoméricos, se obtuvieron mayores periodos naturales, lo cual redujo la demanda sísmica. La disminución de desplazamientos no fue el óptimo para un modelo con mecanismo aislante de 40 y 50 niveles ya que iba aumentando un 22% conforme a los modelos analizados.

Herrera Mena, Marco Tulio (2018), en su tesis titulada “Desempeño Sísmico en Edificaciones con Aisladores Elastoméricos y Amortiguadores de Fluido Viscoso” presentada en la Universidad de Piura evalúa y compara el desempeño sísmico en estructuras aporticadas de hormigón armado, diseñadas con aisladores elastoméricos y con amortiguadores de fluido viscoso. Para la concepción de estos aisladores se empleó metodologías de ingeniería de normas internacionales y trabajó con estructuras de diferentes esbelteces, rigideces y frecuencias. Concluye a través de los resultados del desempeño de cada estructura que, para edificaciones aporticadas con poca esbeltez y bajo periodo de vibración, los aisladores funcionaron mejor; mientras que, para edificaciones muy esbeltas y alto periodo de vibración, los amortiguadores tuvieron un mejor desempeño.

Sobre antecedentes internacionales, Arriagada Rosas Jaime Andrés, (2005) en su tesis “Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional)” presentada en la Universidad Austral de Chile, realizó un estudio comparativo en tres diseños sobre el diseño convencional del edificio Vanguardia, en Chile, utilizando diversas clases de mecanismos de aislación. El modelo aislado alcanzó una disminución de la cortante del orden del 84-90% y un decremento en el rango del 82-95% en los desplazamientos laterales del último piso. Para el desarrollo de los dispositivos que desacoplan la base y la evaluación del proyecto aislado se utilizó la NCh 2745.

Lema Toapanta Edith Pamela (2013), en su proyecto de sustentación titulado “Análisis y Diseño de un Edificio con Aisladores Sísmicos Modelamiento en el ETABS” presentada en la Universidad Central del Ecuador evalúa el comportamiento sísmico que tiene una estructura utilizando aisladores sísmicos. Para esta evaluación, el autor seleccionó la estructura del bloque “E” del Hospital de Ambato ubicado en Ecuador y utilizó herramientas de cálculo computarizado para revisar tres clases de dispositivos aislantes empleando el código de la norma UBC-97, seleccionándose la alternativa de aislación que aseguró el desempeño más adecuado de la estructura. Se alcanzó una disminución en el rango del 64% en las fuerzas cortantes y una reducción del orden del 64-67% en las derivas máximas. El autor concluye que la adición de un mecanismo antisísmico aislante en el Hospital de Ambato garantiza una mejora en el desempeño estructural con un grado elevado de seguridad y resguardo sísmico para el inmueble y además para los contenidos.

Pérez Zamora Naxalia y Vásquez Ortega María (2016) en su trabajo investigativo titulado “Diseño de aisladores sísmicos de base para edificio de oficinas de 10 niveles con sistema estructural de pórticos rígidos de concreto reforzado” presentado en la Universidad Centroamericana de Nicaragua evalúan el comportamiento sismorresistente de un inmueble de hormigón reforzado de 10 niveles y la misma incluyendo aisladores sísmicos. Los autores utilizaron el software ETABS. Se emprendió una comparación de la edificación sin aislación contra su versión con sistema de aislación. Los aisladores permitieron una reducción del 90% en las cortantes sísmicas, y una reducción del orden del 59-82% en las derivas máximas para la versión con aisladores de núcleo de plomo (LRB). Con esta mejora en el desempeño se obtuvo una disminución que llegó hasta 15% en los volúmenes de concreto,

sirviendo a la optimización estructural. Se concluyó que los aisladores le proporcionan al proyecto un adecuado resguardo contra movimientos telúricos, porque se sobresalen en su comportamiento comparándolo con el inmueble no aislado en todas las dimensiones analizadas.

## **2.3. Bases Teóricas**

### **2.3.1. Sistema de Muros de Ductilidad Limitada**

#### **2.3.1.1. Características**

Dentro de las principales características del sistema de EMDL, se encuentra el estar completamente compuesto por muros delgados de concreto armado, así como losas macizas apoyadas sobre estos muros. Los elementos muro son los encargados de recibir las fuerzas gravitacionales y de resistir las fuerzas horizontales generadas por la eventualidad de un sismo.

A adelante se lleva al detalle las cualidades más relevantes del sistema estructural propiamente dicho, las características constructivas asociadas y una enumeración de ventajas y desventajas del mismo.

##### **2.3.1.1.1. Sistema Estructural**

Los EMDL son, conforme su nombre lo indica, estructuras que se caracterizan por su limitada ductilidad, lo cual quiere decir que sus componentes principales, es decir sus muros, que suelen ser de 10 a 15 cm, no exponen desplazamientos relevantes en el estado plástico, su fluencia es limitada, por lo que alcanza rápidamente la condición de rotura una vez superado el estado elástico. Es entonces, por definición, una estructura muy rígida. Esta es la principal

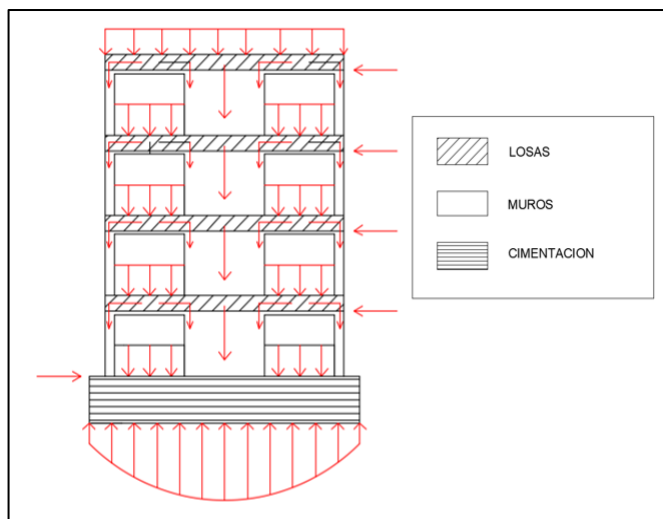
diferencia entre este sistema y el de Muros Estructurales, el cual consiste en muros de hormigón reforzado con confinamiento lateral, de espesores mayores a 20 cm, los cuales absorben la carga lateral del sismo presentando un adecuado comportamiento dúctil.

Los principales materiales que componen a los muros son justamente el concreto, y el acero. El concreto es el material encargado de contribuir a la capacidad de resistir esfuerzos axiales de compresión cuando es sometido a fuerzas gravitacionales, así como proporcionar resistencia al cortante basal. Dada la cualidad de este modelo estructural, de estar provisto de una acumulación de muros de hormigón reforzado en toda su planta, la contribución para resistir la cortante basal correspondiente al concreto es relevante, tal es así que se hallan muros con resistencias ( $f'_c$ ) desde 175 kg/cm<sup>2</sup> hasta 210 kg/cm<sup>2</sup>, dependiente de las cualidades de altura, cantidad de niveles y magnitud asociada a la zona sísmica.

Como está asociado a una forma de construcción que adquiere carácter industrial, por estar compuesta de unidades de vivienda típica y repetitiva en planta, se encuentra prácticamente generalizado el uso del concreto premezclado, lo cual permite asegurar en cierta medida la calidad de este material en cuanto a su suministro.

El acero es un refuerzo de acompañamiento muy adecuado para el concreto, otorgándole, ya como material compuesto, la propiedad de resistir tensiones de tracción, brindando al elemento estructural la capacidad de resistir efectos de flexión, flexocompresión y torsión, resistiendo los momentos asociados al efecto de fuerzas gravitacionales y sísmicas.

El sistema de EMDL presenta, como modelo estructural, 03 partes bien definidas: losas, muros, y cimentación.



*Figura 1.* Distribución de cargas en un sistema MDL dividido en sus 3 componentes principales

#### 2.3.1.1.1.1. Losas

Las losas son elementos horizontales encargadas de transmitir las cargas de cada nivel del edificio a los elementos verticales, en este caso los muros. Para el sistema EMDL el tipo de losa mayormente empleado es de losa maciza que oscila entre 10 a 12 cm en la mayoría de áreas en planta, con ensanches en zonas de servicios, tales como baños y cocinas, cuyas losas llegan a medir entre 17 a 20 cm, las cuales permiten otorgarles recubrimiento adecuado a las instalaciones sanitarias. Las losas macizas se desempeñan en las dos direcciones, lo cual es conveniente dado que todos los ambientes presentan un perímetro de muros portantes. Las losas suelen ser reforzadas con acero convencional o malla electrosoldada, el principio de las losas se basa en que los esfuerzos de flexión son generados por momentos positivos que afectan a

los centros de luz y momentos negativos concentrados en el primer y último tercio de cada elemento, disponiendo así un refuerzo de acero positivo (refuerzo inferior o primera malla), y un refuerzo negativo (refuerzo superior o segunda malla). Para el caso del acero convencional, el acero presenta usualmente una doblez en el encuentro muro-losa de 20 cm, lo cual no sucede con el acero de malla electrosoldada, esto debido a la baja ductilidad del mismo. El acero de refuerzo oscila entre 8 mm a 3/8", con cuantías ( $\rho$ ) que van desde 0.094% hasta 0.251% para losas de 12 cm.

Si bien no se han realizado muchos estudios con respecto al desempeño de losas en el sistema EMDL, M. Cubas (2017) realizó una investigación analítica para revisar la respuesta estructural de las losas en las zonas de acoplamiento con los muros, basándose en estudios previos realizados a proyectos con elementos de muros de corte de gran altura.

El estudio concluye que si bien los EMDL son de menor altura, sí se presentan importantes momentos flectores y cargas cortantes en las zonas de acoplamiento durante la sucesión de un movimiento sísmico de gran relevancia, debiendo prestarse atención durante su diseño. Así mismo, se demuestra mediante un modelamiento de las losas como vigas equivalentes de acoplamiento, que los mencionados añaden rigidez lateral al modelo del proyecto en el rango del 2% al 15%.

Por lo general las losas transmitirán las cargas desde cada nivel a los elementos verticales de muros continuos desde el último nivel hasta su cimentación. Sin embargo, para el particular caso en el que existen zonas de estacionamiento en



sótanos, se implementan losas de transferencia con vigas de gran peralte que transmiten la carga de muros discontinuos hasta muros de núcleo y perimetrales encargados de llevar la carga a la cimentación. En principio el uso de losas de transferencias generó incertidumbre por la cualidad de tratarse de una irregularidad en altura por piso blando, la cual es una irregularidad de rigidez que provoca concentración de esfuerzos y fallas consecuentes del efecto sísmico. Es así que frente a esto la norma técnica E 0.30 en sus disposiciones sobre sistemas de transferencias indica que para las zonas 2,3 y 4 los elementos discontinuos no pueden soportar más allá de un cuarto de las cargas gravitacionales o sísmicas. Esta medida ha reducido en gran parte la implementación de losas de transferencia en EMDL, de manera que los proyectos empiezan a implementar sus estacionamientos en los exteriores de los edificios.

#### **2.3.1.1.1.2. Muros**

Los muros, como ya se ha mencionado, son elementos delgados de concreto reforzados con mallas de acero, es decir presentan un reforzamiento con distribución vertical y horizontal en el área de muro, con varillas cuyo diámetro se encuentre entre 8 mm a 1/2”, colocándose ocasionalmente una varilla de acero vertical en los extremos de mayor diámetro, entre 12 mm a 5/8”.

Existen, básicamente, 02 formas de reforzar estos muros, el primero consiste en muros con mallas electrosoldadas, la cual presenta un esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) del orden de 5000 kg/cm<sup>2</sup>, y la otra consiste en el uso de acero convencional, con un  $f_y$  de 4200 kg/cm<sup>2</sup>. Sobre las características del

comportamiento de estos muros con una forma de refuerzo o la otra, se han realizado estudios para corroborar su desempeño frente al efecto de cargas laterales y carga axial, simulando el comportamiento de un muro central en un edificio de 04 pisos.

Este estudio, realizado por A. San Bartolomé, A. Muñoz, M. Villagarcía y C. Acuña (2007) presentó 03 modelos de placas, las cuales fueron construidas simulando las condiciones reales de una obra, todas de 2 metros de longitud, 2.4 metros de alto y 10 cm de espesor, sobre una viga de cimentación de sección 35x44, y amarrado a una viga solera de sección 25x20. La placa P-1 estuvo compuesta por una malla electrosoldada centrada, la placa P-2 por refuerzo convencional, y la placa P-3 por una doble malla electrosoldada con confinamiento lateral. Fueron sometidos a cargas cíclicas en 10 fases, llegando a obtener valores de distorsión de entrepiso máximo en el orden de 0.005 y coeficiente reductor (R) de 3, lo que difiere de la E.030-2018 que considera un factor R de 4 para edificaciones regulares y una distorsión de entrepiso máxima de 0.007 en hormigón reforzado. Si bien las conclusiones del estudio eran limitadas debido a que solo utilizó un espécimen para cada caso de ensayo, brinda un ejemplo experimental de las condiciones propias de un muro real, construido en obra, y sus limitaciones frente a esfuerzos de flexocompresión, además de la vulnerabilidad de estos muros frente a fallas de deslizamiento. Adicional a ello se han realizado diferentes estudios que buscaron comprobar y predecir el comportamiento de estos muros de ductilidad limitada. Así mismo, C. Reyes (2017) elaboró una investigación analítica para calcular la vulnerabilidad frente a sismos de los EMDL alrededor de la zona costa central

del Perú, ubicación geográfica donde se concentra la mayor población de edificios con este sistema estructural. El estudio determinó resultados teóricos positivos, en medida que considera viable el costo de reparaciones por daños ocasionados ante la sucesión de un movimiento sísmico muy raro, que alcanza el 50% del costo de reconstrucción del proyecto. Sin embargo, también abre la puerta a nuevas líneas de investigación experimental como es el caso del comportamiento de los muros frente a fallas por pandeo, los cuales se presentan antes que las fallas por flexión y corte en medida que se incrementa la intensidad sísmica.

#### **2.3.1.1.1.3. Cimentación**

Es la encargada de sostener las fuerzas de la superestructura y derivarlas al suelo. En el caso de los EMDL consiste regularmente en una platea de cimentación, la cual es un tipo de cimentación superficial, que puede oscilar entre los 15 a 25 cm, con vigas perimetrales y, ocasionalmente, vigas interiores a manera de dientes que aportan capacidad de resistir el volteo de la edificación. En la situación en la que se empleaban losas de transferencia para sótanos, era usual que la fundación finalmente consistiese en zapatas y cimentaciones corridas.

La platea de cimentación posee una disposición de acero similar al de una losa de techos, con refuerzo positivo y negativo, colocándose además las espigas o “dowells”, que son bastones de acero vertical ubicados en el trazo de muros para ser luego traslapados con el acero del primer nivel. La disposición de las

espigas, que bien pueden ser de malla electrosoldada o acero convencional, tienen relación con la resistencia al deslizamiento de los muros.

### **2.3.1.1.2. Sistema Constructivo**

Uno de los factores más trascendentes en los EMDL es su sistema constructivo, el cual permite obtener altos rendimientos y velocidad de construcción, reduciendo los costos en el valor de la vivienda y sirviendo como gran alternativa a la demanda creciente de vivienda.

La clave para un eficiente avance de obra en este sistema, es la debida sectorización de la planta del edificio, la cual permita vaciados diarios de elementos verticales y horizontales. Usualmente la planta es dividida en 4 sectores de producción similar, permitiendo acabar un nivel completo cada 4 días. Esto puede realizarse tanto si se emplea un vaciado monolítico (muro-losa) o si se coloca concreto en elementos horizontales y verticales en diferentes sectores, lo importante es dimensionar las cuadrillas de trabajo para asegurar una producción diaria equivalente a 1 sector.

A continuación se detallan aspectos del sistema constructivo según partidas de construcción: acero, encofrado, concreto e instalaciones.

#### **2.3.1.1.2.1. Acero**

La partida de acero consiste en la habilitación de las varillas de acero, conforme lo indicado en los planos estructurales, para su posterior colocación. El proceso inicia desde platea, donde las vigas perimetrales e interiores suelen armarse in situ. El resto del acero se habilita en un teatro de operaciones denominado “*banco*”. El operario encargado de la habilitación posee un detalle de corte y

despiece para el acero, que sigue con el objetivo de generar la menor cantidad de desperdicio posible. Hoy en día los cortes óptimos del acero se calculan de manera computarizada. Para el caso de mallas electrosoldadas, estas son enviadas por el proveedor al lugar de la obra, reduciendo la tarea del operario habilitador. En el caso de mallas electrosoldadas, estas son acompañadas de un plano de colocación, indicando la ubicación de las piezas codificadas. Una vez ganado altura en el edificio, el acero es izado con el apoyo de la torre grúa, para ser recibido por los operarios colocadores. Estos se encargan de disponer todo el acero de techo en el sector de vaciado, en horas de la mañana hasta pasado el mediodía, para posteriormente amarrar el acero de elementos verticales del siguiente sector, el cual será encofrado un día siguiente.

Un adecuado control de calidad en esta partida se encarga de verificar que el acero cumpla con las condiciones de longitud de desarrollo, doblez, diámetro según plano, amarres adecuados, recubrimiento conforme a especificaciones, y distribución conforme a cuantía. Para el caso del recubrimiento, estos se aseguran con accesorios que bien pueden ser de plástico, concreto o ambos, los cuales deben ser adecuadamente ubicados para evitar traslaciones en las mallas fuera de sus ejes, o pérdidas en el recubrimiento de acero en losas, quedando este junto al encofrado durante el vaciado.



*Figura 2.* Colocación de acero para muros en obra Ciudad Sol de Retablo - Comas

Uno de los principales percances en esta partida, en cuanto a mano de obra se refiere, es la posibilidad de encontrar errores en la ubicación final del acero vertical, el cual será traslapado con otra varilla de acero respetando la continuidad del elemento. Cuando es hallado este inconveniente, el operario procede con grifar el acero fuera de trazo, esforzando el acero y sometiéndolo a fluencia. Los errores por grifado no son considerados durante el modelamiento y cálculo de los muros, desconociendo con exactitud su comportamiento frente a los efectos sísmicos, lo cual genera una incertidumbre y abre una línea de investigación experimental para corroborar estos casos de grifados con modelos de muros ensayados en laboratorio.

Además, el acero es vulnerable en el medio ambiente a sufrir de los efectos de corrosión. La corrosión es una reacción electro-química que provoca la reducción de la sección en el acero, comprometiendo sus propiedades mecánicas. De no tratarse, la corrosión puede llegar a un estado avanzado que,

aún embebido en el concreto, afecta de manera directa el tiempo de vida de la estructura al desintegrar lentamente la armadura, acabando con las propiedades de ductilidad y ocasionando fallas frágiles. Esto desde la perspectiva estructural y social, es un caso de peligro que puede conllevar a un costo de vidas humanas, así que debe considerarse las precauciones correspondientes. La corrosión superficial puede tratarse en el acero por medios mecánicos, no representando un problema mayor. Cuando una unidad de acero presenta un estado avanzado de oxidación, es recomendable descartarla.

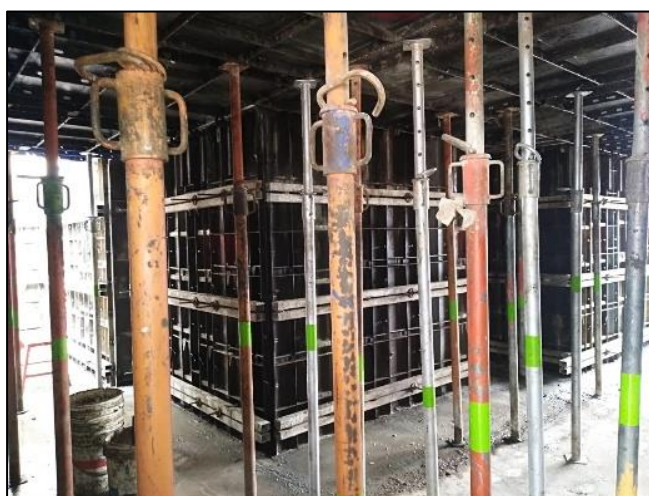
El acero trabaja como material compuesto con el concreto, gracias a su propiedad de adherencia, esta adherencia se ve comprometida si el acero no cuenta con recubrimiento o si, como resultado de un vaciado previo, ha sido manchado con lechada (mezcla acuosa de agua y cemento). Es necesario realizar la limpieza del acero antes de la colocación de concreto, la cual puede realizarse en obra con escobillas metálicas.

#### **2.3.1.1.2.2. Encofrado**

El encofrado es el conjunto de molduras que, habilitadas de acuerdo a un planteamiento de modulación, conforman el recipiente que recibe el concreto en estado plástico, permitiendo a este alcanzar su estado endurecido en la forma deseada por el constructor. El encofrado representa una partida crítica en el avance de toda obra de EMDL, pues es el que finalmente asegura el vaciado diario de las estructuras. Dado el carácter industrial ya mencionado de este sistema estructural, el encofrado metálico surge como una adecuada alternativa para mejorar el rendimiento promedio del carpintero encofrador, llegando

incluso a duplicarlo. Es así que la labor diaria consiste en entregar un techo y un conjunto de muros correspondiente a un sector de vaciado diario. Si se trata de un vaciado monolítico, se cuenta con una cuadrilla única de encofradores, pero para la situación de vaciados de muros y losas independientes, puede disponerse de dos cuadrillas diferentes, cada una dedicada a su frente.

Una de las condiciones esenciales en la dirección del encofrado metálico es el inventario. Se recomienda que los moldes y accesorios sean debidamente cuantificados, de manera que su uso sea repetitivo en cada sector, y no existan excedentes que puedan perderse en el camino. Las pérdidas por accesorios de encofrado metálico alquilado pueden representar pérdidas importantes en los costos de la partida, que no son previstos en el presupuesto de obra.



*Figura 3.* Encofrado de sistema muro-losa en obra Ciudad Sol de Retablo

Existe una variedad en la oferta del encofrado metálico, cada una de ellas con ventajas y desventajas frente a cada caso particular de obra. W. Meléndez (2011) elaboró una investigación basada en el método Delphi para la definición del encofrado más óptimo del proyecto que seleccionó, el cual consistía en un



EMDL, concluyendo que el encofrado con sistema FORSA era el más apropiado para las condiciones de costo y tiempo demandados. Este mismo es un modelo de encofrado con moldes de aluminio que conforman estructuras monolíticas (muro-losa) que permite altos rendimientos de la mano obrera.

En lo referido al control de la calidad del producto terminado, este debe verificar que vaya conforme con los parámetros de cobertura con aditivo desmoldante, alineamiento, verticalidad, escuadra y aseguramiento de los elementos.

El aditivo desmoldante es una solución acuosa con la cual debe recubrirse la cara de contacto del encofrado con el concreto, de manera que conforme una capa resistente a los álcalis del cemento, otorgando un acabado caravista al concreto endurecido.

El alineamiento de los elementos de encofrado se asegura a través del trazo y replanteo, donde el topógrafo coloca una línea de referencia paralela al muro trazado, permitiendo verificar al carpintero y el control de calidad que el encofrado de hecho se encuentra en el alineamiento del trazo designado.

La verticalidad se comprueba a través de la plomada, la cual toma medidas desde su eje hasta la cara de muro en al menos tres alturas distintas, corroborando que exista una mínima variación en estas medidas. Es así que se acepta, según el cuadro de tolerancias de la obra, hasta 2 mm de desfase. La verticalidad es comprobada antes e inmediatamente después del elemento vaciado.

El encofrado de losa requiere un adecuado sistema de apuntalamiento. M. Dávila y C. Fabián (2013) realizaron un estudio que consistió en visitar diferentes proyectos de EMDL en la capital peruana para verificar las consideraciones tomadas en el apuntalamiento y reapuntalamiento de losas tras el desencofrado, determinando que un adecuado coeficiente de seguridad, específicamente 1.3 sobre las cargas, se alcanzaba un desempeño satisfactorio en el apuntalamiento y reapuntalamiento de losas.

Dado que prácticamente todos los muros en un sistema de EMDL son de concreto caravista y por tanto requieren de un proceso de encofrado, la calidad del material de encofrado determina el trabajo posterior de solaqueo y su magnitud en los costos de la obra.

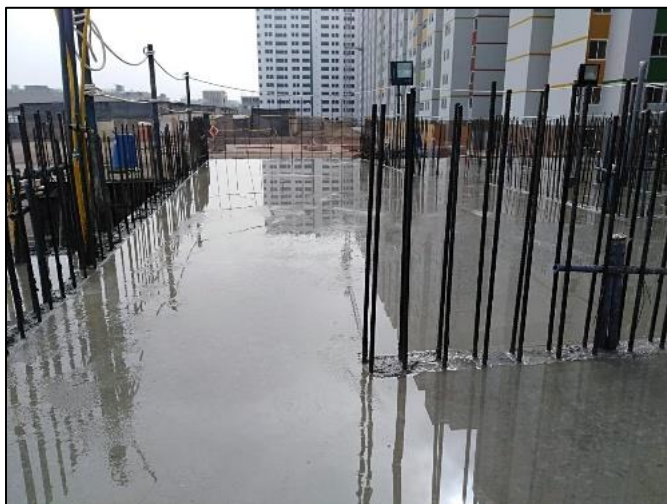
#### **2.3.1.1.2.3. Concreto**

También conocido como hormigón, se trata de un conglomerado de cemento, arena, piedra, agua y aditivos, la cual adquiere una primera composición plástica que pasa a un estado endurecido conforme sucede el fenómeno de fraguado. El concreto, durante su estado plástico, posee características que van en función al tipo de cemento, cualidad de los agregados, relación de agua-cemento, y aditivos adicionados. En el caso de los EMDL, existen varios factores de calidad asociados a la colocación de concreto, que deben revisarse con cuidado.

El primero de estos factores es el de segregación y cangrejeras. Una cangrejera es un vacío dentro del elemento estructural, el cual expone al acero de refuerzo

y compromete de forma importante la resistencia mecánica, mientras que una segregación es la separación del agregado y la lechada en el concreto, generando una superficie rugosa cuya sección tampoco aporta propiedades mecánicas. Ambos fenómenos tienen su principal relación causal con el sistema de colocación, es decir un inadecuado proceso de vibrado y una altura de lanzamiento del concreto excesiva (situación recurrente en los EMDL con muros que alcanzan alturas de 2.40 m), además intervienen otros aspectos tales como la consistencia (slump) de la mezcla, confinamiento del acero, tamaño máximo de agregado y espesor del muro. Cuando se presenta una cangrejera o segregación, se recomienda limpiar el área afectada y aplicar epóxico y morteros de alta resistencia.

Otro factor a considerar son las juntas frías. Una junta fría es un plano o superficie que delimita un volumen de concreto endurecido con otro volumen de concreto vaciado en un segundo tiempo, diferente al anterior. Para la situación de los muros, esta junta se muestra justo al contactar con la losa, sea porque se vació de forma monolítica y la junta surge en medio del techo anterior y el nuevo vaciado de muros, o para la situación de un vaciado en dos tiempos, que expone dos juntas frías, una entre el muro y la superficie inferior la losa, y otro en medio del área superior del techo y el muro del nivel de arriba. Estas caras que contactan tendrían que manejarse como superficies rugosas, por lo que debe evitarse frotachar o alisar esta área donde se elevan los muros, cuando se le brinda un acabado a las losas.



*Figura 4.* Vaciado en sistema muro-losa de obra Ciudad Sol de Retablo

Al respecto estudios previos demuestran que las combinaciones de segregación ubicados en la parte inferior de muros y paredes de contacto no rugosas traen como consecuencia mayor probabilidad de deslizamiento o cizalla. En cuanto al vaciado de losas, si bien todo el nivel de un edificio trabaja como un diafragma rígido, las losas son vaciadas conforme a los cortes de cada sector, por lo que se genera una zona de corte del concreto. Este corte debe generarse en las zonas de menor momento flector, por lo general en el primer tercio de tramo de luz de cada losa, y luego ser tratadas para que presente un área libre de polvo y debidamente rugoso, además de ser aplicado un epóxico que trabaje como puente de adherencia entre el concreto antiguo y nuevo.

La aparición de fisuras y grietas en losas es un problema también frecuente, y tienen su principal origen en la falta de curado. El fraguado del concreto genera calor de hidratación, lo cual conlleva al decremento de la humedad y por tanto la pérdida de relación agua-cemento, que compromete en el elemento estructural su capacidad para alcanzar la resistencia deseada. Debido a ello el

elemento de concreto debe conservar en su estado inicial adecuadas condiciones de humedad y temperatura para completar la reacción química de endurecimiento. Otra causa de fisuras en el hormigón se debe a la ausencia de recubrimiento en tuberías, para la situación de tuberías de 4” de desagüe en muros o tuberías eléctricas adheridas al encofrado de losa. Es común en este sistema visualizar el desarrollo de fisuras por concentración de esfuerzos en los primeros y últimos niveles de los edificios. Los asentamientos diferenciales en la cimentación también son causas de estas fisuras.

#### **2.3.1.1.2.4. Instalaciones**

Las instalaciones eléctricas y sanitarias representan la red de tuberías y puntos de salida que recorren internamente toda la estructura. Una de las principales ventajas para las instalaciones en el sistema de EMDL es que estas también son empotradas junto con el concreto, acelerando el tiempo de esta actividad, teniendo en cuenta que en estructuras convencionales, se trate de pórticos, sistemas duales o albañilería confinada, las instalaciones deben colocarse antes del asentado de ladrillo, para luego fijar sus puntos y forjar sus recorridos, es decir, dos tiempos de trabajo por ambiente.



*Figura 5.* Instalaciones de agua, desagüe, luz y gas en obra Ciudad Sol de Retablo

El trabajo en EMDL es reducido a una sola instalación con trabajos menores de fijación y limpieza de cajas posterior. Sin embargo, los trabajos de control de calidad no pueden omitirse. C. Alva (2010) identificó en su investigación en base a la inspección de un proyecto inmobiliario de ductilidad limitada en la ciudad de Lima, que después de la carpintería de madera, con 51% de incidencia, las instalaciones sanitarias resultó ser la partida con mayor índice de reclamo en la post-venta, presentando una mayor frecuencia de reclamos y requiriendo mayores actividades de reparación. Esto significa la necesidad de controles más rigurosos.

Para instalaciones sanitarias de agua, se recomienda supervisar la correcta unión de accesorio-tubería, en la cual se encuentra ampliamente difundido en el mercado el uso de tuberías de polipropileno, material que utiliza la termofusión como método de unión, resultando, siempre y cuando se realice correctamente, en una unión más segura que la proporcionada por el pegamento en tuberías de policloruro de vinilo. Además, una prueba de presión hidrostática es necesaria previo a la colocación de la mezcla, durante las jornadas de solaqueo en muros, y antes de iniciar actividades de acabados secos, seguidos de una prueba de griferías y accesorios que corroboren su correcto funcionamiento.

Para instalaciones sanitarias de desagüe, además de la correcta unión, es necesario verificar el cumplimiento de las pendientes en los recorridos. Usualmente, las instalaciones de desagüe son las que exigen los ensanches en ambientes de baños y cocinas, sin embargo, si no se define correctamente el peralte en el área de ensanche, pueden persistir problemas de falta de

recubrimiento en la capa superior de la losa, originando fisuras en el post-vaciado. Una forma de controlar estas fisuras se alcanza también aplicando acero de temperatura.

Para verificar la hermeticidad en los recorridos de tuberías de desagüe, se realiza una prueba de estanqueidad, verificando su variación a las 24 horas. Esta prueba se realiza antes del vaciado de concreto y tras los trabajos de acabados grises. Posteriormente, una prueba de escorrentía para corroborar el buen funcionamiento de los montantes permite asegurar el resultado.

Las instalaciones eléctricas y de comunicaciones son canalizadas desde los departamentos hasta las áreas comunes. Usualmente, las tuberías de alimentadores eléctricos son acumulados en las áreas comunes y descendidos a través de ductos que luego son cerrados con material de drywall o melamine. El control de las buenas operaciones de estas tuberías se basa en una limpieza en la cual un alambre es recorrido por todos los ductos entre caja y caja, corroborando que no existan obstrucciones provocadas por roturas de tuberías. Finalmente, cuando ya se han instalado los cables de conducción, se realiza una prueba de continuidad y aislamiento, además de comprobar la resistividad de los pozos a tierra indicados en las especificaciones del proyecto.

#### **2.3.1.1.3. Ventajas y Desventajas de los EMDL**

Indicadas las cualidades del modelo estructural y constructivo de los EMDL, es posible señalar algunos indicadores que representan ventajas y desventajas frente a otros sistemas y procesos constructivos:

### 2.3.1.1.3.1. Ventajas

- Presenta un sistema constructivo de gran velocidad que permite altos rendimientos y costos comparativos menores a los sistemas convencionales. Esto es corroborado por J. Santoyo (2015), quien elaboró una comparación de desempeño estructural y costos de construcción para una edificación multifamiliar de 5 pisos propuesta con albañilería confinada y otro con MDL. El resultado indicó que el presupuesto de muros de ductilidad limitada representaba el 68.20% del presupuesto de albañilería confinada para las mismas características arquitectónicas y demanda sísmica.
- Es una alternativa viable para hacer frente el déficit de demanda de vivienda en los sectores C, D y E.
- Su aplicación se encuentra ampliamente generalizada, y, de la mano con una normativa que ha buscado en los últimos años regularizar el diseño de estas estructuras para comprometerlo con la filosofía de diseño sismorresistente, brinda un grado de seguridad al ingeniero proyectista para continuar implementándolo en proyectos de vivienda social, siempre y cuando respete sus parámetros.
- Aunque todavía incipiente, el número de investigaciones que buscan resolver cuestiones relacionados al desempeño estructural en este sistema en el ámbito local viene en aumento, garantizando mayor certidumbre en los cálculos y nuevos proyectos.

-



### 2.3.1.1.3.2. Desventajas

- Alineado con su velocidad de construcción, exige un personal obrero calificado que alcance los rendimientos teóricos planteados, como en la situación de los encofradores o la disposición de las cabillas de refuerzo. Esto significa que si no se cuenta con una cuadrilla de operarios idónea, el proyecto puede llegar a encarecerse, incluso al grado de comprometer los plazos de entrega.
- Además de encontrarse comprometido la producción por falta de mano de obra calificada, también lo está la calidad del producto terminado. Problemas de calidad, sobre todo los asociados al acero y concreto mencionados, son muy frecuentes, y no forman parte de problemas relacionados con la post-venta, que son aquellos identificados por el cliente y usuario final de la unidad inmobiliaria de manera casi inmediata o en el corto plazo. Esto conlleva nuevas incertidumbres sobre la verdadera respuesta del inmueble ante la ocurrencia de un movimiento telúrico de gran intensidad.
- Si bien se cuenta con nuevas investigaciones y cada vez mayores alcances sobre el comportamiento estructural de este sistema, continúa vigente un grado de incertidumbre frente a la realidad, al no contar con un registro de sismos de gran magnitud que pongan a prueba el verdadero desempeño de estas edificaciones, y en la cual puedan corroborarse todos los postulados de investigaciones previas.

### **2.3.1.2. Proyecto Techo Propio “Ciudad Sol de Retablo”**

Se ha mencionado con anterioridad que Comas, ubicado en Lima, es un distrito representativo para la demanda de vivienda, y en donde existe a su vez una importante oferta. Esta es ofrecida en gran parte en lo que algún tiempo fue el aeródromo de Collique, ahora convertido en terreno de urbanización en la cual tres importantes empresas del medio de la construcción se asientan y modifican día a día el casco urbano del joven distrito. La empresa DH MONT & CG & M S.A.C., una de las tres mencionadas y la primera en iniciar la ejecución de su proyecto, presentó al mercado local una oferta de edificios auspiciados por el programa “Techo Propio” y “Mi Vivienda”, promovidos por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Se trata de edificaciones con sistemas mixtos de muros estructurales y MDL, siendo el segundo el predominante, los cuales descansan sobre losas de fundación con vigas perimetrales.

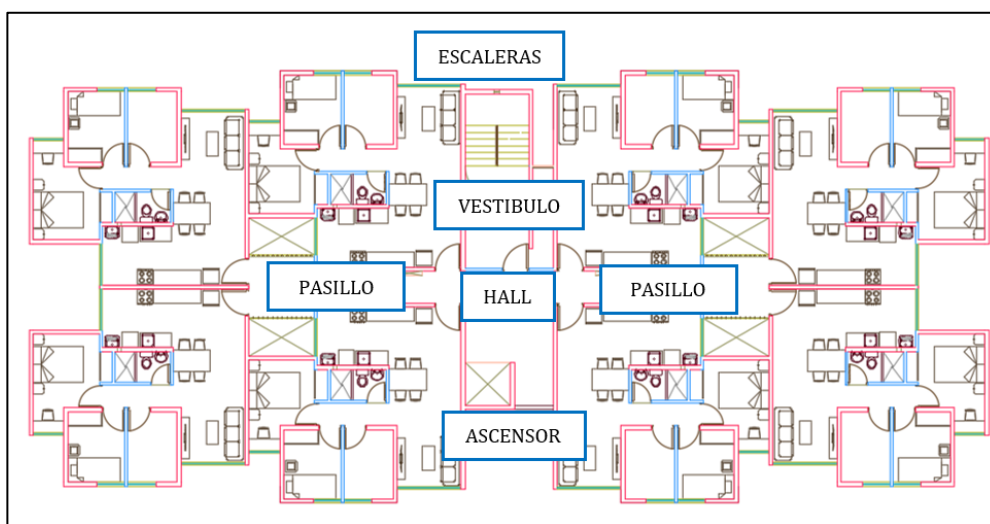
Para esta investigación se tomará como edificio modelo el diseño para el proyecto “Techo Propio”, correspondiente a la Manzana F de la I y II Etapa de desarrollo del proyecto general, cuyas características se detallan a continuación.

#### **2.3.1.2.1 Características técnicas**

El modelo Techo Propio, perteneciente al proyecto Ciudad Sol de Retablo, forma parte de un emprendimiento para construir 20 000 viviendas sociales en la localización del ex-aeródromo de Collique, en el corazón del distrito de Comas. A DH Mont & CG & M S.A.C. le corresponde un total alrededor de 12 000 viviendas.

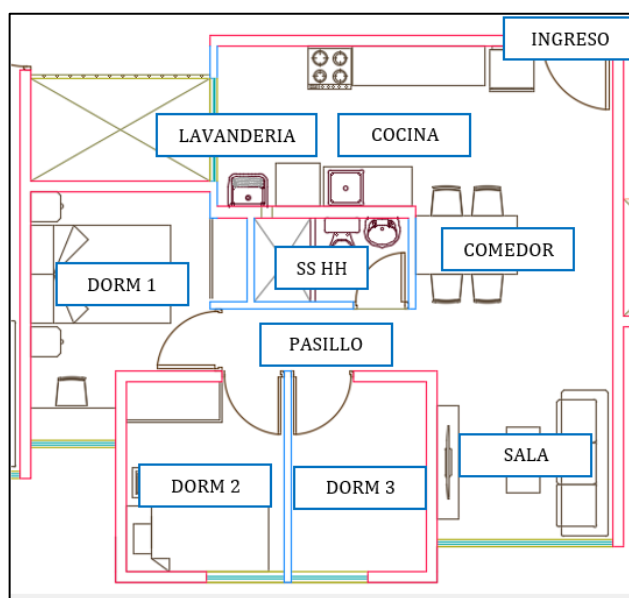
Actualmente el proyecto se encuentra en su segunda etapa de construcción, alcanzando alrededor de 4000 viviendas entregadas desde el año 2014.

Esta propuesta de trata de una unidad inmobiliaria de 8 pisos con 8 departamentos por piso, alcanzando un total de 64 departamentos. Cada nivel posee un hall central que comunica a través de dos pasillos un bloque de cuatro departamentos a cada lado. Este mismo hall comunica directamente con el ascensor, y un vestíbulo que conduce a las escaleras, ambos trabajando como núcleos de circulación vertical. En el primer piso se ubica el ingreso principal por la parte frontal del edificio, ingreso que colecta también el banco de medidores de electricidad y las válvulas principales de agua. Posee además una salida por la parte posterior del edificio a través de un pasillo. A continuación se detalla un esquema indicando los espacios mencionados en una planta típica de la edificación:



*Figura 6.* Distribución de departamentos y áreas comunes en planta típica – Proyecto Ciudad Sol de Retablo (CSDR) en Comas

Los departamentos son de distribución típica: Un ingreso principal hacia la sala-comedor, una cocina tipo kitchenette con área de lavandería, un pasillo que conecta con el baño común y los tres dormitorios. La cocina tipo kitchenette viene equipada con un tablero postformado, y un intercomunicador de conexión con la garita principal del condominio. El área de lavandería posee un punto para lavadora y un lavadero de fibra de vidrio, siendo aquí donde se ubica el tablero de distribución del departamento. El área de sala comedor contiene puntos de conexión de cable TV y telefonía. El baño común viene equipado con un lavatorio de manos, un inodoro top piece y una rapiducha con salida de fuerza para interruptor termomagnético. Los dormitorios poseen dos salidas de tomacorriente, y una salida de cable TV. El dormitorio principal cuenta además con un área para equipamiento de closet. A continuación se detalla un esquema de distribución interna del departamento:



*Figura 7.* Distribución interna en departamento típico - CSDR

La edificación cuenta con un área techada total de 3843.62 m<sup>2</sup>. En promedio cada departamento posee 52.4 metros cuadrados de área techada. En la siguiente tabla se expone un cuadro de la disposición de área techada por piso:

Tabla 1. *Distribución de área techada por nivel – proyecto Techo Propio CSDR*

<b>PISOS/NIVELES</b>	<b>AREA</b>
PRIMER PISO	480.11
SEGUNDO PISO	480.11
TERCER PISO	480.11
CUARTO PISO	480.11
QUINTO PISO	480.11
SEXTO PISO	480.11
SEPTIMO PISO	480.11
OCTAVO PISO	482.83
<b>AREA TECHADA TOTAL</b>	<b>3,843.62</b>
<b>AREA DEL TERRENO</b>	<b>570.07</b>
<b>AREA LIBRE (15%)</b>	<b>87.24</b>

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a su sistema estructural, la edificación es íntegramente de hormigón reforzado, contando con un modelo de muros estructurales en los dos primeros niveles, y MDL en los seis niveles restantes.

Las losas son macizas, de 12 cm de espesor, con excepción de las losas deprimidas ubicadas en los baños, de 19 cm de espesor, y la losa deprimida ubicada en la conexión con la escalera, que posee 3 cm más de peralte con respecto a las losas normales. El acero predominante en losa es de 8 mm de diámetro, contando además con bastones y balancines de 6 mm, y acero de refuerzo positivo de 3/8” en losas deprimidas.

Los muros corresponden a un espesor de 15 cm y 10 cm. El acero predominante en muros es de 8 mm de diámetro, contando además con refuerzos de 12 mm y núcleos de confinamiento de 1/2".

El sistema de muros descansa sobre una platea de cimentación con vigas perimetrales. La platea posee un espesor de 50 cm, mientras que las vigas perimetrales cuentan con un peralte de 1.10 m y 40 cm de ancho. El acero predominante en platea es el de 1/2" de diámetro, para refuerzo positivo y negativo, contando con acero de 3/8" en la base del ascensor y 3/4" en vigas perimetrales.

Las instalaciones de agua son de polipropileno (PPR), con uniones de tubería y accesorios con termofusión, mientras que las instalaciones de desagüe son de policloruro de vinilo (PVC), con uniones de tuberías y accesorios con pegamento. El sistema cuenta con una tubería de impulsión proveniente de una cisterna exterior que asciende con una tubería montante repartiendo a cada departamento en cada nivel a través de válvulas telescópicas ubicadas en los pasillos. Las tuberías de desagüe montante de 4" de diámetro recolectan los servicios de cada departamento hallándose empotrada en el muro, descendiendo hasta las cajas de registro ubicadas en los pasillos del primer nivel y conduciendo las aguas negras y grises al exterior. El primer nivel cuenta con su propia tubería colectora para cada departamento.

Las instalaciones eléctricas cuentan con un banco de concentradores en el ingreso del edificio, que recibe la acometida proveniente del suministro subterráneo externo. Desde el banco, las tuberías eléctricas de cada alimentador son conducidas por debajo de la platea de cimentación hasta emerger por los ductos

ubicados en los pasillos, que conducen los alimentadores a través de tuberías verticales hasta cada piso y departamento correspondiente. El tablero de distribución cuenta con 4 circuitos: un circuito de alumbrado, dos circuitos de tomacorrientes (separando el ambiente de cocina donde se concentra una demanda importante de equipos eléctricos), y un circuito de calentador eléctrico.

Las instalaciones de comunicaciones son conducidas desde el exterior para el servicio de telefonía y cable, así como el circuito de intercomunicador que conecta con las casetas de ingreso del condominio residencial. La red de alarma contra incendio es conducida desde una central de alarma contra incendio (CACI), ubicado en el hall del primer nivel, para repartir detectores de humo a cada hall de cada piso y a su vez, a cada departamento.

### **2.3.2. Sistema de aisladores sísmicos**

#### **2.3.2.1. Desarrollo, comportamiento y clasificación de aisladores sísmicos**

Los aisladores sísmicos son un conjunto de dispositivos que operan de forma sistemática y cuya utilización en el mundo viene siendo expandida cada vez con mayor amplitud y frecuencia. Se trata de una tecnología que desacopla la base de una estructura, sea pues una edificación o un puente, separando la superestructura y su cimentación, e interviniendo de manera pasiva frente a los efectos de una aceleración sísmica, asimilando su energía y disipándola a través de un movimiento en la propia base de la estructura, evitando así que los elementos estructurales sufran de mayores esfuerzos o derivas.

J. Soriano (2014) comparó en la capital de la región Cajamarca la respuesta de un pabellón de la UPN con sus parámetros reales, los cuales obedecían a los de una edificación con base fija, remodelándolo con una propuesta que implementaba

aisladores sísmicos, obteniendo que la reducción en la fuerza sísmica resultante equivalía al 71% de la fuerza con el diseño original, además determinando que las distorsiones de entrepiso resultaban en una reducción del 50%, lo cual brinda una idea de los resultados y diferencias notables que ejerce la introducción de este sistema.

El diseño de aisladores es, por lo tanto, un factor que se agrega a los factores de diseño convencionales de rigidez y resistencia, introduciendo nuevos conceptos pero con resultados favorables que resuelven en buena medida el riesgo e incertidumbre que representa la ocasión de un suceso telúrico de gran magnitud, que a priori significa siempre un compromiso con la vida y propiedades de gran valor de los usuarios de una edificación.

#### **2.3.2.1.1 Comportamiento y tipología de aisladores sísmicos**

P. Quintana (2011) tomó la experiencia en la aplicación de dispositivos aislantes en Chile como un caso de estudio, explicando los fundamentos de su comportamiento como unidad añadida en la ecuación del movimiento de un esquema estructural.

Para obtener una idea del aporte de los mecanismos de aislación en una estructura, podemos idealizar un modelo aislado semeándolo a un sistema de dos grados de libertad. Para un primer entendimiento, mostramos una figura con un sistema consistente en masas  $m_1$ , y  $m_2$ , asociadas las rigideces  $k_1$  y  $k_2$ , afectados por un movimiento aleatorio del terreno expresado como un desplazamiento  $u_g$ . Es importante que, ante esta idealización general, tomemos en cuenta los desplazamientos relativos en cada entrepiso, los cuales serán  $v_1 = u_1 - u_g$ , y  $v_2 = u_2 - u_g$ .



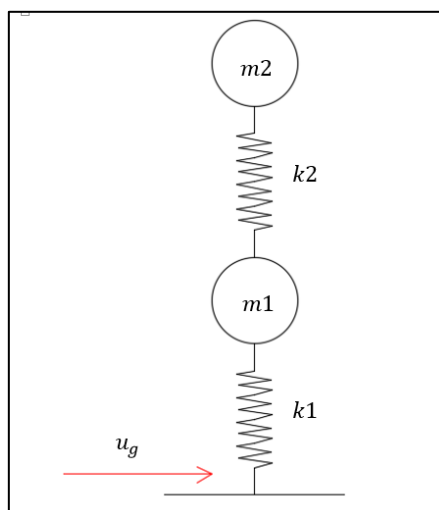


Figura 8. Sistema de dos grados de libertad

De esta forma es factible expresar las ecuaciones de movimiento para cada grado de libertad en estos términos previos:

$$m_1 \cdot \ddot{v}_1 + (k_1 + k_2) \cdot v_1 - k_2 \cdot v_2 = -m_1 \ddot{u}_g$$

Ecuación 1. Ecuación del movimiento  $m_1$

$$m_2 \cdot \ddot{v}_2 - k_2 \cdot v_1 + k_2 \cdot v_2 = -m_2 \ddot{u}_g$$

Ecuación 2. Ecuación del movimiento  $m_2$

Ahora, procedemos a identificar las masas  $m_1$  y  $m_2$  como  $m_b$  y  $m_s$  respectivamente. La masa  $m_b$  representa la correspondiente al compuesto de aisladores, es decir la conjunción del piso técnico, el cual descansa sobre los aisladores, y las unidades de aislación propiamente dichas. La masa  $m_s$  representa la conjunción conformada por los niveles de un modelo de estructura aislada, es decir la superestructura. A estas mismas se les asigna las rigideces  $k_b$  y  $k_s$  correspondientes, obteniendo las mismas ecuaciones mencionadas anteriormente, pero en estos nuevos términos.

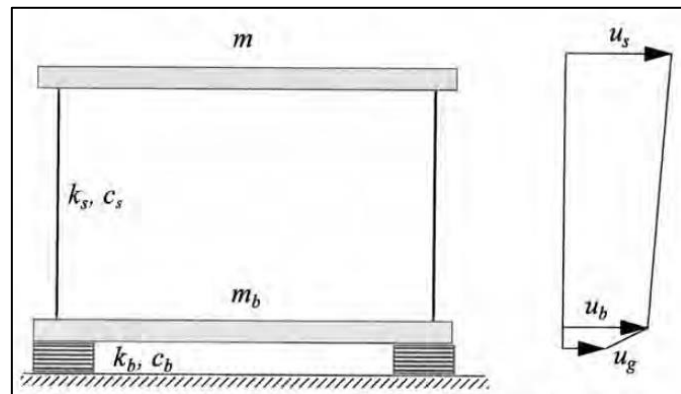


Figura 9. Sistema con aislación idealizado como sistema con dos grados de libertad

La masa  $m_b$  puede ser despreciada dado que en el sistema esta es significativamente menor a la masa representada por la estructura completa, llevándonos a la siguiente ecuación en base a la ecuación 1.

$$m_b \cdot \ddot{v}_b + (k_b + k_s) \cdot v_b - k_s \cdot v_s = -m_b \ddot{u}_g$$

Con  $m_b = 0$

$$(k_b + k_s) \cdot v_b = k_s \cdot v_s$$

Entonces:

$$v_b = \frac{k_s \cdot v_s}{(k_b + k_s)}$$

Dividiendo la segunda igualdad entre  $k_s$ :

$$v_b = v_s \cdot \left( \frac{1}{\left(\frac{k_b}{k_s} + 1\right)} \right)$$

Esta última expresión puede reemplazarse en la ecuación 2.

$$m_s \cdot \ddot{v}_s - k_s \cdot v_b + k_s \cdot v_s = -m_s \ddot{u}_g$$

*Reemplazando:*

$$m_s \cdot \ddot{v}_s - k_s \cdot v_s \cdot \left( \frac{1}{\left( \frac{k_b}{k_s} + 1 \right)} \right) + k_s \cdot v_s = -m_s \ddot{u}_g$$

*Factorizando:*

$$m_s \cdot \ddot{v}_s + k_s \cdot v_s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{\left( \frac{k_b}{k_s} + 1 \right)} \right) \right] = -m_s \ddot{u}_g$$

*Ecuación 3.* Ecuación del movimiento de un sistema aislado con 2 gdl

Puede entonces definirse  $C_1$  como el factor que modifica la rigidez del modelo de estructura aislada, siendo:

$$C_1 = \sqrt{1 - \left( \frac{1}{\left( \frac{k_b}{k_s} + 1 \right)} \right)}$$

*Ecuación 4.* Factor de rigidez del modelo aislado

Por consecuencia, este coeficiente afecta a la frecuencia natural de la estructura aislada, que puede denotarse en expresiones de  $C_1$ .

$$w_{nb} = \sqrt{\frac{k_s}{m_s} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{\left( \frac{k_b}{k_s} + 1 \right)} \right) \right]} = C_1 w_n$$

*Ecuación 5.* Frecuencia natural del sistema de aislamiento

Sobre esto, es posible expresar el periodo natural se la siguiente forma:

$$T_{nb} = \frac{2\pi}{w_{nb}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_s}{m_s} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{\left( \frac{k_b}{k_s} \right) + 1} \right) \right]}} = C_2 T_n$$

*Ecuación 6.* Periodo natural del sistema de aislamiento

Siendo  $C_2$ :

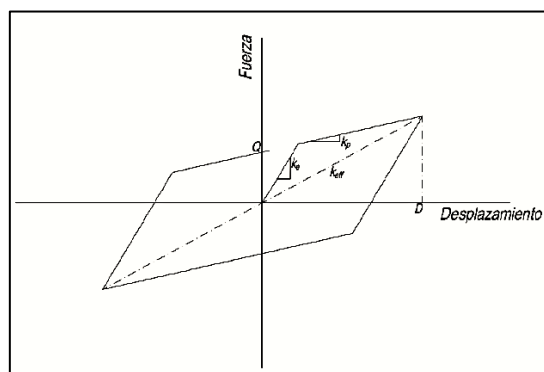
$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{1}{\left( \frac{k_b}{k_s} \right) + 1} \right)}} = \frac{1}{C_1}$$

*Ecuación 7.* Factor que modifica el periodo natural de la estructura aislada

Analizando el coeficiente  $C_2$  que modifica el periodo natural de la estructura, es posible concluir que conforme la rigidez del sistema de aislamiento se incrementa por sobre el valor de la rigidez de la superestructura, este tiende a equipararse al periodo natural de la estructura sin aislamiento, mientras que en medida que este se halle por debajo de la rigidez de la estructura superior, el periodo natural irá en incremento. Si la rigidez del sistema de aislamiento es 0, el periodo natural de la estructura superior tiende al infinito, lo cual simula la situación de un modelo estructural completamente aislado.

El desempeño de los mecanismos aislantes se explica por medio de un modelamiento bilineal de sus fases de histéresis basándonos en sus parámetros de rigidez elástica  $k_e$ , rigidez plástica  $k_p$  y carga  $Q$  resistente. La carga resistente del aislador, para la situación de aisladores LRB, está basado en la fluencia del plomo. La curva histerética de un material muestra el comportamiento de este cuando es

afectado por ciclos de carga y descarga (en contraste con la curva de esfuerzo-deformación para una carga monótonica que suele representarse para un material poco dúctil como el concreto), alcanzando un desplazamiento máximo en el rango inelástico en una dirección para ser luego descargado y sometido a carga en la otra dirección del desplazamiento, habiendo sufrido una deformación permanente debido a su incursión en el rango plástico. Si intentásemos representar un ciclo continuo de carga y descarga, notaríamos que la curva de histéresis se va reduciendo en tamaño alrededor de la curva principal o curva envolvente. Es entonces la curva envolvente, producido por un primer ciclo de carga y descarga, la que nos interesa representar dado que nos indica la capacidad de energía disipada en función de los parámetros anteriormente mencionados.



*Figura 10.* Parámetros de ciclo de histéresis para modelo bilineal de aislador sísmico

Tal como podemos observar, el material sufre una primera traslación regido por la rigidez elástica  $k_e$ , que se describe como un cociente entre la carga de cedencia  $F_y$  y la traslación máxima durante el comportamiento elástico  $D_y$ . Una vez alcanzado el rango plástico, el desplazamiento es regido por la rigidez plástica  $k_p$ , hasta un punto de desplazamiento máximo  $D$ . El cociente entre la carga máxima

$F_m$  y el desplazamiento máximo  $D$  es definido como rigidez efectiva  $k_{eff}$ , que gráficamente se identifica como la recta secante que intersecta el punto de estado inicial y el punto de valores de pico de la curva.

A partir de aquí es posible encontrar relaciones geométricas para denotar la rigidez plástica en expresiones de la rigidez elástica, la carga resistente y el desplazamiento máximo en el rango elástico:

$$k_p = \frac{F_y - Q}{D_y} = \frac{F_y}{D_y} - \frac{Q}{D_y} = k_e - \frac{Q}{D_y}$$

$$\frac{Q}{D_y} = k_p - k_e$$

Entonces:

$$D_y = \frac{Q}{k_p - k_e}$$

*Ecuación 8.* Desplazamiento máximo en el rango elástico

Así mismo, puede denotarse la rigidez efectiva en expresiones de la rigidez plástica, la carga resistente y el desplazamiento máximo:

$$k_p = \frac{F_m - Q}{D} = \frac{F_m}{D} - \frac{Q}{D} = k_{eff} - \frac{Q}{D}$$

*Ecuación 9.* Rigidez plástica

Entonces:

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q}{D}; \text{ donde } D \geq D_y$$

*Ecuación 10.* Rigidez efectiva

La energía disipada en cada fase de histéresis está expresada por la superficie asociada a la curva envolvente en el diagrama de histéresis, que puede ser definida en expresiones de la carga resistente, la traslación máxima y la traslación máxima en el rango elástico:

$$W_D = 4Q \cdot (D - D_y)$$

*Ecuación 11.* Energía disipada

Conociendo la energía disipada, es posible obtener un cociente de amortiguamiento efectivo para el modelo del mecanismo aislante, tal que debido a su amortiguamiento disipe la misma energía disipada en el ciclo de histéresis:

$$\zeta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi k_{eff} \cdot D^2} = \frac{4Q \cdot (D - D_y)}{2\pi k_{eff} \cdot D^2}$$

*Ecuación 12.* Amortiguamiento efectivo

Con el objetivo de simplificar esta expresión, es posible expresarle en términos adimensionales definiendo el desplazamiento y resistencia característica adimensionales. Se tiene entonces:

$$y = \frac{D}{D_y}$$

$$a = \frac{Q}{k_p \cdot D_y}$$

*Reemplazando:*

$$\zeta_{eff} = \frac{2a}{\pi} \cdot \frac{y - 1}{(y + a) \cdot y} ; y \geq 1$$

*Ecuación 13.* Amortiguamiento efectivo en términos adimensionales

Analizando la expresión, damos cuenta que el cociente de amortiguamiento efectivo, para una cantidad definida de  $a$ , es nulo en la situación en la que la traslación máxima es equivalente al desplazamiento máximo en la fase elástica, es decir cuando  $y$  es 1. Asimismo, el valor tiende a 0 en la situación en la que  $y$  tiende al infinito, así que la expresión máxima se obtiene para:

$$y = 1 + \sqrt{1 + a}$$

*Reemplazando:*

$$\zeta_{\text{máx}} = \frac{2a}{\pi} \cdot \frac{1}{2(1 + a)^{1/2} + (2 + a)}$$

Dado que el cociente de amortiguamiento efectivo máximo se obtiene en términos de  $a$ , y pudiendo expresar la resistencia característica adimensional de la siguiente manera:

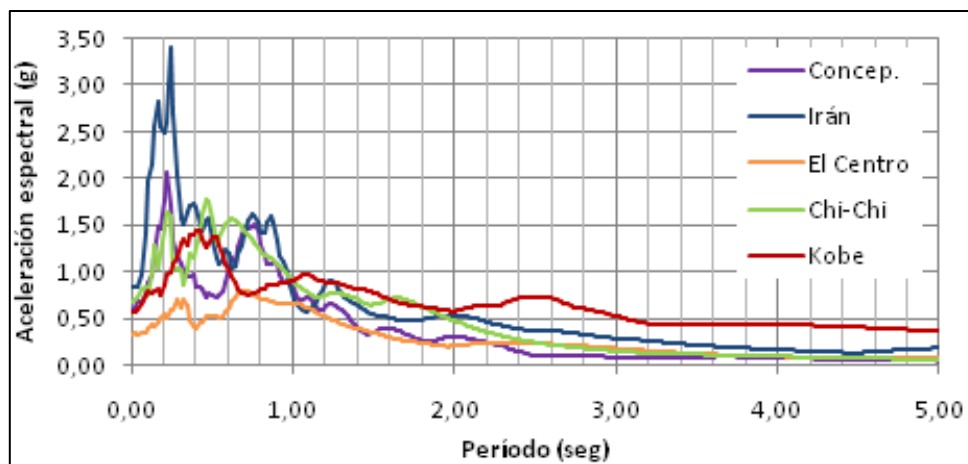
$$a = \frac{k_e - k_p}{k_p}$$

Concluimos que el valor del cociente de amortiguamiento efectivo depende exclusivamente de la rigidez elástica y la rigidez plástica.

Al respecto de los aisladores sísmicos y su relación con los tipos de estructuras sobre la cual son aplicados, presentamos una gráfica con distintos espectros de respuesta. El denominador común que podemos hallar en las curvas de los espectros es que las aceleraciones de respuesta del sismo sobre estructuras con periodos fundamentales en el rango de 0.1-1.0s son relativamente altos en



comparación con rangos de periodos mayores, en la cual la aceleración de respuesta no tiende a grandes variaciones.



*Figura 11.* Espectros de respuesta para un 5% de amortiguamiento

Teniendo en cuenta esto y la propiedad principal de los dispositivos aislantes para hacer efectivo una modificación en el periodo fundamental, puede inferirse que el modelo con unidades de aislación resulta más efectivo en estructuras muy rígidas y en aquellas que no presentan grandes alturas, dado que es este conjunto el que presenta una relación de periodos fundamentales bajos.

En la figura siguiente, expuesta por Kelly, Robinson & Skinner (2008), puede apreciarse como un incremento de la flexibilidad en la estructura aislada se relaciona con una aceleración de respuesta cada vez menor. En contraparte, este incremento del periodo conlleva a un incremento en los desplazamientos, los cuales pueden ser controlados con un incremento del amortiguamiento.

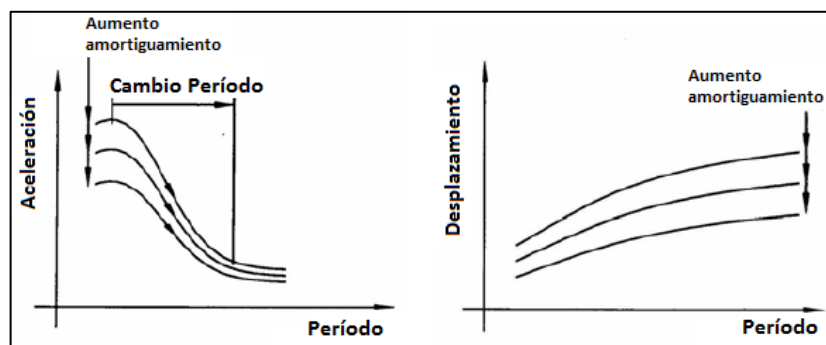


Figura 12. Aceleración en función al periodo/Desplazamiento en función al periodo

A continuación se presenta la tipología de aisladores sísmicos que se encuentran en uso en la actualidad. F. Naeim y J.M. Kelly (1999) expusieron una clasificación en detalle sobre los diferentes sistemas de aislación. En esta ocasión, se hará mención de las unidades de aislación del tipo elastoméricos LRB y las unidades de aislación basadas en deslizamiento, para este último específicamente los de péndulo de fricción.

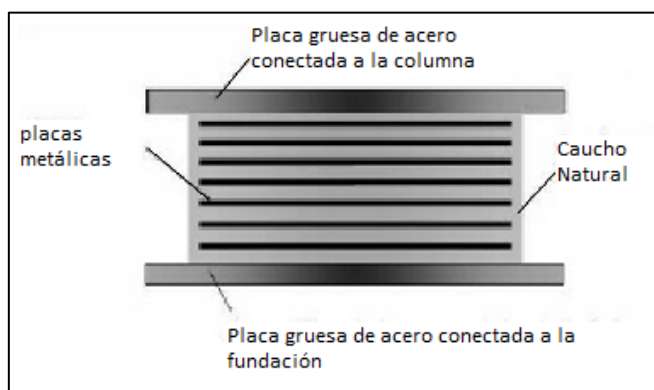
### 2.3.2.1.1.1 Aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos son aquellos basados en unidades de aislamiento compuestos por capas de caucho (elastómero) intercalados con láminas de acero vulcanizados.

#### 2.3.2.1.1.1.1 Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LRD)

Estos aisladores fueron utilizados por primera ocasión en Yugoslavia, en la escuela Pestalozzi, y desde 1970 han tenido amplio desarrollo en su mayor caso en Japón. Se trata de un modelo de aislador con capas de caucho natural, los cuales son vulcanizados con capas de acero a presión por aproximadamente seis horas a una temperatura de 140°C. Países como

Francia han intercambiado el uso del caucho natural por el del neopreno. En la siguiente figura se expone una representación esquemática de la unidad de aislación y las partes que la conforman:



*Figura 13.* Aislador de bajo amortiguamiento LRD

Las láminas de acero intercaladas brindan rigidez vertical al aislador, además de prevenir el abultamiento lateral, sin embargo, la aplicación de estas no controla la rigidez horizontal, la cual es dependiente del módulo de corte del elastómero. El comportamiento frente a corte del material es lineal hasta esfuerzos que superan el 100% del esfuerzo cortante, para un amortiguamiento entre el 2-3% del amortiguamiento crítico, valiendo la pena mencionar la ventaja del caucho como material al no estar sujeto a fluencia y presentar una buena estabilidad de su módulo en el largo plazo.

En cuanto a las ventajas del aislador de bajo amortiguamiento se encuentran su fácil manufacturación y modelado, al poseer una metodología conocida a nivel general. En países de Latinoamérica como México se está iniciando la fabricación de aisladores de bajo amortiguamiento destinados a viviendas de hasta cuatro niveles. Además, es posible mencionar sus características de

durabilidad al poseer un comportamiento mecánico que no es afectado en el tiempo por condiciones de temperatura o ciclos de carga.

La principal desventaja con este sistema es su bajo amortiguamiento, el cual hace necesario en varios casos la adición de componentes complementarios encargados de brindar mayor amortiguamiento al sistema. Dentro de estas unidades complementarias se hallan resortes en espiral, barras de plomo y elementos friccionantes.

La capacidad de carga del aislador, denominado  $W_{máx}$ , puede determinarse relacionando el área de superposición de la base fija y la placa superior desplazada  $A'$ , el módulo de corte para el caucho  $G_r$  que oscila entre 0.5 a 1 MPa, el factor de forma  $S$  para la situación de soportes cilíndricos equivalente al cociente entre el área sometida a carga y el área de libre sin carga del aislador, y la deformación por corte admisible debido a fuerzas gravitacionales  $\gamma_w$ , la cual es una fracción de la deformación unitaria debido a ensayo de carga axial para el caucho.

$$W_{máx} = A' \cdot G_r \cdot S \cdot \gamma_w$$

*Ecuación 14.* Capacidad de carga del aislador

La rigidez lateral  $k_b$  está determinado por el módulo de corte  $G_r$ , el área de la capa de caucho  $A_r$ , y la altura total correspondiente a las capas de caucho  $h_r$ .

$$k_b = \frac{A_r \cdot G_r}{h_r}$$

*Ecuación 15.* Rigidez lateral

La rigidez vertical  $k_v$ , la cual es varias veces la rigidez horizontal, es función de la rigidez vertical sin modificación de volumen por causa de la deformación por corte  $k_{vy}$  y a la rigidez vertical con cambio de volumen debido a la deformación por corte  $k_{vV}$ . La rigidez  $k_{vy}$  puede estimarse relacionando el módulo de corte del caucho, el factor de forma, el área y la altura del caucho, mientras que la rigidez  $k_{vV}$  como un cociente entre el área y la altura del caucho multiplicado por su módulo de compresión, estimado en 2000 MPa para un caucho típico.

$$k_v = \frac{k_{vy} \cdot k_{vV}}{(k_{vy} + k_{vV})}$$

*Ecuación 16.* Rigidez vertical

El desplazamiento lateral admisible  $x_{b.adm}$  es directamente proporcional a la deformación unitaria por cortante debido a carga sísmica  $\gamma_s$  y a la altura total del caucho  $h_r$ .

$$x_{b.adm} = h_r \cdot \gamma_s$$

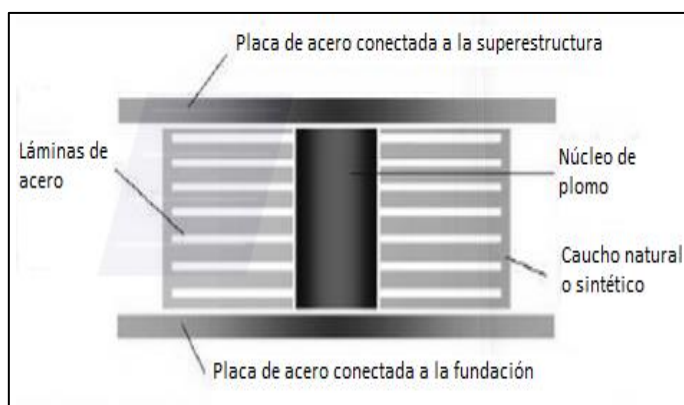
*Ecuación 17.* Desplazamiento lateral admisible

#### **2.3.2.1.1.1.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)**

El LRB es un aislador con caucho de bajo amortiguamiento al cual se le añade uno o varios núcleos de plomo con el propósito de proporcionar mayor amortiguamiento al mecanismo de los aisladores. El aislador LRB fue inventado en Nueva Zelanda en 1975 y en la actualidad es la clase de aislador más difundido y aplicado en el mundo, teniendo amplio desarrollo en Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos. El núcleo de plomo tiene que encajar

herméticamente en el agujero del aislador, así que se diseña con un diámetro ligeramente mayor que luego es sometido a presión. Este núcleo posee la capacidad de alcanzar el estado de fluencia, llegando antes a esfuerzos del orden de 10 MPa, para luego recristalizarse configurando un comportamiento posible de modelar en una curva bilineal con alta rigidez inicial. Es debido a esto que el núcleo de plomo, gracias a su capacidad resistiva a la fatiga ante sucesivos ciclos de carga, es capaz de brindar un amortiguamiento efectivo del 10%.

A continuación, se presenta un esquema del aislador y las partes que lo componen:



*Figura 14.* Aislador con núcleo de plomo LRB

La capacidad de carga  $Q$  para un estado sin deformación lateral será función del área de la sección transversal del plomo  $A_p$  y el esfuerzo de fluencia del plomo  $\tau_p$ .

$$Q = A_p \cdot \tau_p$$

*Ecuación 18.* Capacidad de carga aislador LRB

La rigidez elástica puede estimarse como una función de los módulos de corte del caucho  $G_r$  y del plomo  $G_p$ , en conjunto con las áreas del caucho  $A_r$  y del plomo  $A_p$ , además de la altura total de las capas de caucho  $h_r$ .

$$k_e \approx \frac{1}{h_r} \cdot (G_p \cdot A_p + G_r \cdot A_r)$$

*Ecuación 19.* Rigidez elástica aislador LRB

La rigidez plástica o post-fluencia es directamente proporcional al módulo de corte  $G_r$ , el área del caucho  $A_r$  y la altura total de las capas de caucho  $h_r$ , lo cual es equivalente a la rigidez lateral en el aislador de bajo amortiguamiento. Algunas normas consideran que esta rigidez es mayor a dicha estimación al contar con el núcleo de plomo central, así que es amplificado por un factor del orden de 1.15.

$$k_p = \frac{A_r \cdot G_r}{h_r}$$

*Ecuación 20.* Rigidez plástica aislador LRB

Conforme a lo determinado en la sección anterior, la carga de cedencia en el mecanismo de los aisladores es función de la rigidez plástica, la carga  $Q$  resistente la traslación máxima en la fase elástica  $D_y$ , que es posible estimarse como el cociente entre la carga  $Q$  resistente sobre un valor de rigidez equivalente a un rango entre 5.5 a 9 veces la rigidez plástica.

$$F_y = Q + k_p \cdot D_y$$

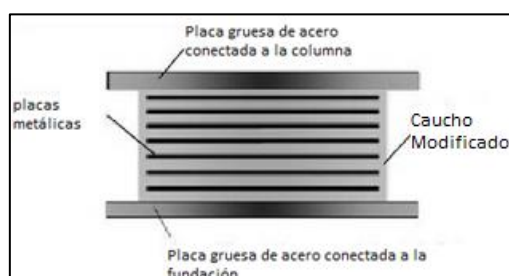
*Ecuación 21.* Carga de cedencia aislador LRB

### 2.3.2.1.1.1.3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HRD)

Teniendo en cuenta la necesidad de las unidades de aislación de bajo amortiguamiento LRD de ser apoyados por componentes que contribuyan al amortiguamiento del mecanismo de aislación, en 1982 y por parte de la *Malaysian Rubber Producers' Research Association* (MRPRA) se buscó mejorar las propiedades del caucho natural añadiendo bloques de carbono ultrafinos, aceites o resinas, logrando rangos de amortiguación del orden del 10% al 20% para tensiones de corte del 100%.

Si bien el sistema alcanza niveles de amortiguamiento mayores al del LRD, la capacidad de energía disipada sigue siendo comparativamente menor al modelo del aislador LRB, además de deteriorarse en el tiempo con mayor velocidad, lo que genera costos comparativos adicionales para su mantenimiento.

En la figura siguiente se expone un esquema con las partes del aislador HDR:



*Figura 15.* Aislador de alto amortiguamiento HDR

La capacidad de carga  $Q$  de este aislador se encuentra expresado con el cociente de amortiguamiento efectivo  $\beta_{ef}$ , la rigidez plástica  $k_p$ , la rigidez efectiva  $k_{eff}$ , el desplazamiento total  $D$  y el desplazamiento máximo en el



rango elástico  $D_y$ , que se estima entre un 0.005 a 0.1 veces la altura total de las capas de caucho.

$$Q = \frac{\pi \cdot \beta_{ef} \cdot k_p \cdot D^2}{(2 - \pi \cdot \beta_{ef}) \cdot D - 2D_y}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot \beta_{ef} \cdot k_{eff} \cdot D^2}{2(D - D_y)}$$

*Ecuación 22.* Capacidad de carga aislador HRD

En cuanto a la rigidez lateral, la rigidez elástica y plástica son posibles de determinar en base a las ecuaciones propuestas para el aislador de bajo amortiguamiento.

#### **2.3.2.1.1.2. Aisladores basados en deslizamiento**

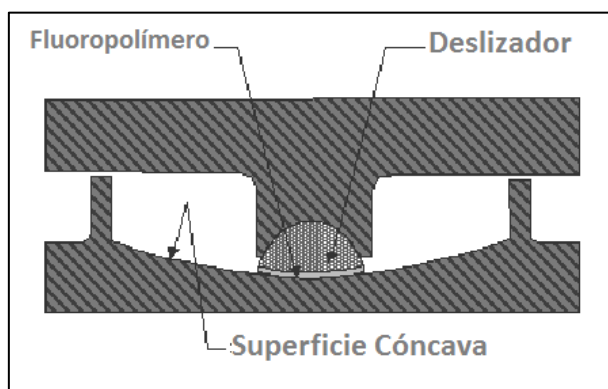
Los aisladores basados en deslizamiento corresponden a la concepción de que un bajo coeficiente de fricción en un sistema aislado proporciona la combinación de flexibilidad lateral y amortiguamiento buscado para una adecuada desconexión entre el modelo estructural y el suelo en la que reposa. A continuación, se mencionan dos casos para estos tipos de aisladores: el sistema de péndulo friccional (FPS) y el sistema de péndulo de fricción de doble curvatura.

##### **2.3.2.1.1.2.1. Sistema de péndulo friccional (FPS)**

Es un mecanismo que combina el deslizamiento por fricción de un deslizador a través del rozamiento en una superficie cóncava que al mismo tiempo, por causa de su geometría, otorga una fuerza de restitución al sistema. El

deslizador posee asimismo una superficie de roce con la superficie cóncava dada su forma lenticular esférica.

Se presenta un esquema con los componentes del sistema:



*Figura 16.* Aislador con sistema de péndulo friccional (FPS)

A través de un esquema de cuerpo libre analizando las fuerzas asociadas al deslizador desplazado una longitud  $\Delta$ , las cuales serían el peso  $W$  correspondiente al área tributaria en la estructura, la fuerza horizontal  $F$  asociada a la cortante sísmica y la carga normal  $N$  desarrollada en la cara cóncava con un radio de curvatura  $R$ , es posible determinar que la fuerza  $F$  es equivalente al peso  $W$  multiplicado por el cociente entre el desplazamiento y el radio de curvatura  $R$ .

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

*Ecuación 23.* Fuerza horizontal aislador FPS

La rigidez lateral  $k$  entonces, la cual representaría el cociente entre la carga lateral  $F$  y el desplazamiento  $\Delta$ , termina siendo un término del peso  $W$  y el radio de curvatura de la unidad de aislación.

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

*Ecuación 24.* Rigidez horizontal aislador FPS

Así mismo el periodo natural de la estructura, que en principio es función de la masa y la rigidez lateral, depende únicamente del radio de curvatura para la estructura aislada, lo cual representa una ventaja importante frente a aisladores elastoméricos si se lidia con estructuras muy pesadas.

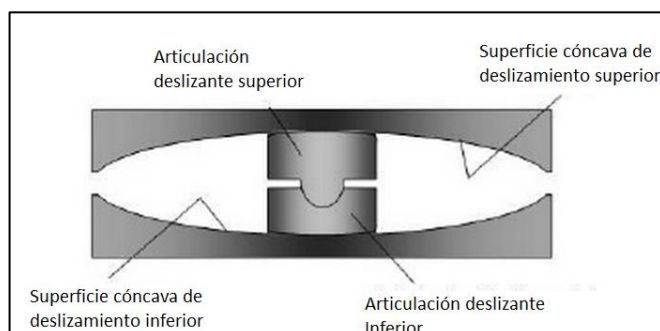
$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{W}{g \cdot k}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}}$$

*Ecuación 25.* Periodo natural aislador FPS

### 2.3.2.1.1.2.2. Sistema de péndulo de fricción de doble curvatura

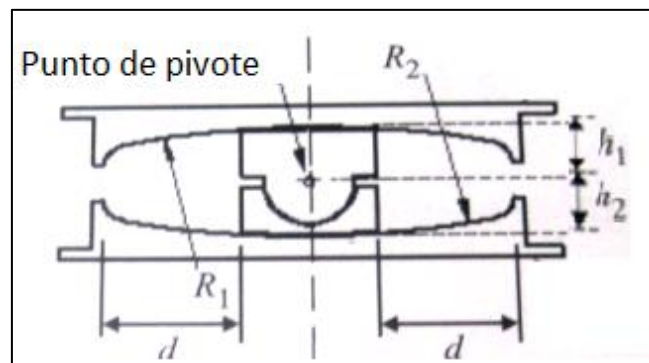
Se trata de un sistema de péndulo de fricción al que se le añade una segunda superficie curva en la parte superior del aislador, mejorando así su propiedad de desplazamiento máximo.

En la siguiente figura se expone un esquema con las partes del aislador:



*Figura 17.* Aislador con sistema de péndulo de fricción de doble curvatura

Similar al FPS, la fuerza lateral de este sistema será una función del peso  $W$  asociado al aislador, el desplazamiento  $D$  y los radios de curvatura superior  $R_1$  e inferior  $R_2$ , a los cuales le son restadas las distancias del punto de pivote a cada extremo de superficie cóncava  $h_1$  y  $h_2$ , conforme a la figura siguiente:



*Figura 18.* Dimensiones de análisis para aislador con péndulo de fricción de doble curvatura

Entonces:

$$F = \frac{W}{(R_1 + R_2 - h_1 - h_2)} \cdot D$$

La fuerza de fricción dependerá del coeficiente de rozamiento entre el deslizador y las superficies.

$$F = \frac{\mu \cdot (R_1 - h_1) \cdot W + \mu \cdot (R_2 - h_2) \cdot W}{(R_1 + R_2 - h_1 - h_2)}$$

*Ecuación 26.* Fuerza de fricción aislador FPS

### **2.3.2.2. Proyectos con aisladores sísmicos en el Perú**

#### **2.3.2.2.1. Situación general actual**

Si tenemos en cuenta a las naciones de Sudamérica mayormente afectadas por eventos sísmicos de elevada intensidad, Perú es de hecho uno de los últimos de estos países en sumarse a la aplicación de dispositivos antisísmicos que desacoplan la base, lo que explica que en la actualidad no alcance todavía al menos una década de construcción de proyectos con mecanismos de aislación, si no apenas unos cinco años desde su incorporación en el Centro de Investigación de Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). El año 2014 apareció un proyecto de actualización de la norma E.030, la cual entre diversas modificaciones y adiciones consideraba la obligatoriedad en la utilización de mecanismos de aislación para proyectos estructurales de hospitales de nivel II y III. Este proyecto de actualización de norma se hizo oficial desde el año 2016 y desde entonces ha tenido una última actualización el año 2018. En el proceso, al menos 39 proyectos con aisladores han sido concebidos, algunos en ejecución, otros en construcción, y otros aún en desarrollo. A. Talavera (2017) presentó al corte del año 2017 una fotografía de la situación actual del avance de la tecnología de aisladores sísmicos en el país, presentando la siguiente gráfica:

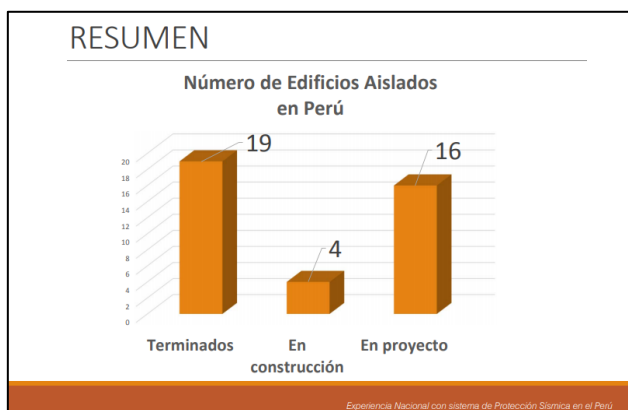


Figura 19. Gráfica distribución de edificios aislados en el Perú (2017)

Como puede apreciarse, en el país para el año 2017 existían diecinueve edificios culminados con aisladores sísmicos, el cual representa una razón de casi cinco edificios al año desde el 2014, y casi el 50% de los edificios proyectados. Este mismo año cuatro edificios se identificaron en proceso constructivo, lo que en cierta medida coincide con la ratio de edificios construidos por año. Por último, de forma alentadora, se visualizan dieciséis proyectos en proceso de desarrollo. En lo referente a la altura de edificios con aisladores, a continuación, se aprecia un gráfico que identifica el número de niveles con los que cuenta cada proyecto:

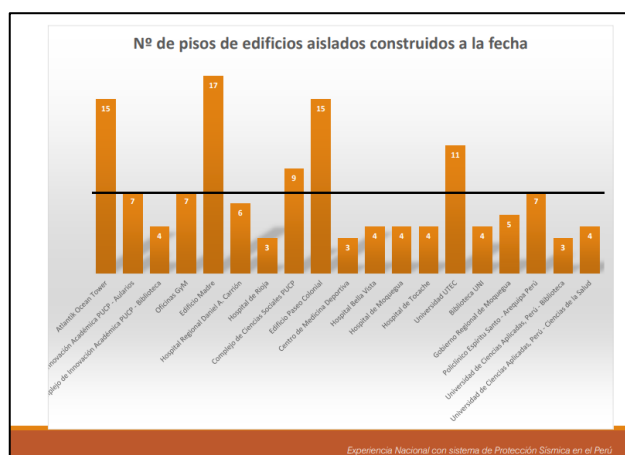


Figura 20. Edificios aislados en el Perú según nº de pisos (2017)

De los diecinueve edificios construidos, catorce edificios cuentan entre tres a siete niveles, mientras que dos cuentan con quince niveles y solo uno con diecisiete.

Además, del total de edificios construidos, siete corresponden a edificaciones de salud, siete a edificaciones de educación, tres a residenciales, uno a oficinas y uno a edificios del Estado.

Al respecto de los edificios en construcción, se trata de dos edificaciones de salud, uno residencial y uno de educación.

De los dieciséis proyectos en desarrollo, catorce, es decir casi el 90% corresponden a edificaciones de salud, lo que es evidencia del notable impulso que la adición de la norma E.030 ha significado para la incorporación de mecanismos de aislación en la nación. No obstante, se aprecia también que, pese a que no es requisito indispensable para la norma, ya existen iniciativas de extender esta tecnología al sector de vivienda. Si bien todavía no puede hablarse de una política de vivienda social con aisladores sísmicos, el proyecto más parecido a este se encuentra en el distrito de Cercado, Lima. El edificio Paseo Colonial es una edificación residencial de 15 niveles con 262 departamentos que cuenta con el beneficio del bono Mi Vivienda, un acercamiento de facilidades de acceso a créditos para los estratos medios.

A continuación, se exponen los datos técnicos de algunas edificaciones representativas de esta lista.

### 2.3.2.2.2. Datos técnicos: proyectos construidos con aisladores sísmicos en el Perú

El primer proyecto que inició la incorporación de dispositivos aislantes es el del Centro de Información e Investigación de la FIC-UNI. Si bien no es la primera cuya construcción fue terminada, sí posee el mérito de ser el primer proyecto que planteó esta alternativa de solución frente a los daños por terremotos en el país. Es una unidad inmobiliaria de 4 niveles con futura ampliación a 8 niveles que emplea una conjunción de 20 aisladores LRB y deslizadores. Se halla en la jurisdicción distrital del Rímac y la ingeniería corresponde al año 2011. Inició su construcción a fines del 2013 y principio del 2014, culminando su etapa de obra gruesa en 2015 y siendo entregada la obra en setiembre de 2018.



*Figura 21.* Centro de información e investigación de FIC-UNI

El primer proyecto residencial en el Perú es el Atlantik Ocean Tower, ubicado en San Miguel. Con 15 de niveles, 165 departamentos entre 48 a 88 m<sup>2</sup> y 4 sótanos, es a su vez uno de los edificios con aisladores más alto del país. El proyecto inmobiliario corresponde a la empresa LABOK, la cual es la primera empresa en implementar esta tecnología para el sector vivienda. Atlantik Ocean Tower utiliza 41 dispositivos de aisladores de alto amortiguamiento (HDR) en

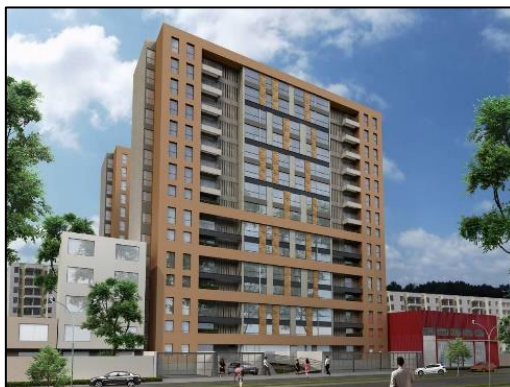


conjunto con deslizadores. El proyecto fue puesto a la venta en el año 2013 y entregado en el 2014. Con éxito alcanzado por este edificio, la empresa LABOK ejecutaría un segundo proyecto, el Pacifik Ocean Tower, a dos cuadras del Atlantik, teniendo características similares a su predecesor, pero con 17 niveles.



*Figura 22.* Atlantik Ocean Tower

La empresa inmobiliaria y constructora CISSAC fue la primera en desarrollar y proponer en el mercado un edificio residencial con acceso al bono Mi Vivienda, enfocado a la clase media de la ciudad de Lima. El edificio Paseo Colonial cuenta con 72 dispositivos de aisladores con núcleo de plomo y deslizadores dobles. Su construcción culminó en el año 2015.



*Figura 23.* Edificio Paseo Colonial

El hospital Santa Gema, ubicado en Yurimaguas, Loreto, es el primer centro de salud en la región selva del Perú en ser concebido con aisladores sísmicos. El complejo demandó una inversión de 121 millones de soles y constituyó un área construida de 19 573 m<sup>2</sup>. En total corresponde a 7 bloques de 4 y 2 pisos separados, compartiendo cimentación en algunos casos. Demandó una implementación de 172 aisladores de alto amortiguamiento con deslizadores. Inició la construcción en 2014 e inició operaciones a inicios del 2019. Su ubicación estuvo cerca del epicentro de un sismo de magnitud 7.5 registrado la madrugada del domingo 26 de mayo de 2019, solo algunas fisuras fueron reportadas.



*Figura 24.* Hospital Santa Gema, Yurimaguas

La Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTECH) es un ejemplo de entre varios, como los de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) o la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), de que la iniciativa privada ha tomado consciencia de la realidad sísmica del país y busca proteger su patrimonio y a sus ocupantes implementando la tecnología de mecanismos de aislación telúrica, específicamente correspondiente al sector privado de la educación. La UTECH fue fundada en el año 2011 y la construcción de su sede,

ubicado en Barranco, culminó el año 2013. Vale decir que el diseño del proyecto de la universidad, además de poseer un mecanismo aislante, también posee el mérito de haber obtenido el premio León de Plata en la decimotercera edición de Bienal de Venecia, gran reconocimiento arquitectónico. El inmueble posee 11 niveles y cuenta con 145 aisladores LRB y deslizadores.



*Figura 25.* Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)

### **2.3.2.3. Diseño de aisladores elastoméricos LRB**

En el 2018 surgió una iniciativa para regular el diseño de aisladores bajo una normativa peruana, en algunos casos conocido como norma “E.031” y publicado bajo el título de “Proyecto de Norma Técnica Aislamiento Sísmico”, el cual fue finalmente aprobado por decreto en el 2019. Esta norma, por tratarse de un reglamento en vigencia y estar ajustada a nuestra realidad, será tomada como estándar para el diseño en esta investigación. Para ello, cabe mencionarse que la misma tiene su base en los lineamientos referenciales de la norma estadounidense del ASCE/SEI 7 “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, Capítulo 17 “Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures” y la norma chilena NCh2745-2003 vigentes, razón por la cual han estudiado los parámetros de cada documento y se ha establecido un cuadro comparativo resumen.

### **2.3.2.3.1. Normas de diseño**

#### **2.3.2.3.1.1. ASCE/SEI 7**

Establece dos métodos de análisis para la estructura aislada, la primera basada en un método estático y el segundo en métodos dinámicos.

#### **2.3.2.3.1.2. NCh2745-2003**

Esta norma fue declarada oficial en Chile el 20 de noviembre de 2003, y, según como indica, está basada en la norma del *Uniforming Building Code* (UBC), la norma NCh432.Of1971 *Calculo de la acción del viento sobre las construcciones* y la norma NCh433.Of1996 *Diseño Sísmico de Edificios*.

Al igual que ASCE/SEI 7, la norma NCh2745 considera los métodos de análisis estático y dinámico.

#### **2.3.2.3.1.3. Norma Técnica Aislamiento Sísmico (Perú-2019)**

La actual norma para aislamiento sísmico cuenta de 08 capítulos y 02 anexos.

El código nacional también dispone de los métodos estáticos y dinámicos.

Para este caso, todos los términos relacionados con los tipos de sitio, de suelo, así como otras notaciones, serán congruentes con las de la norma E.030 de Diseño sismorresistente.

En la tabla siguiente, se compara resumidamente todas las dimensiones y requisitos para cada norma:

Tabla 2. Cuadro comparativo de normas de aislamiento sísmico

CRITERIO	ASCE/SEI 7 (EE UU)	NCh2745-2003 (Chile)	E.031-2019 (Perú)
<b>Análisis por Fuerzas Equivalentes</b>	Requisito, fija límites, no es para el diseño final en mayoría de casos	Requisito, fija límites, no es para el diseño final en mayoría de casos	Requisito, fija límites, no es para el diseño final en mayoría de casos
<b>Análisis Modal-espectral</b>	Se puede utilizar para el diseño final con 100% y 30%.	Se puede utilizar para el diseño final con 100% y 30%.	Solo estructuras regulares. En zona 4 solo suelo S1 y altura menor. 100% y 30%
<b>Análisis Tiempo-Historia</b>	Para todas las estructuras que no cumplan requisito del ME. Mínimo 3 pares de registro.	Para todas las estructuras que no cumplan requisito del ME. Mínimo 3 pares de registro.	Para todas las estructuras que no cumplan requisito del ME. Mínimo 7 pares de registro.
<b>Mínima fuerza cortante basal</b>	- 1.5 la fuerza de activación del SA - Viento - Espectro con $T_A$	- 1.5 la fuerza de activación del SA - Viento - Espectro con $T_A$	- $V_{st}$ , en función a $V_b$ , $P_s$ , $P$ y $\beta_m$ . - Viento - Espectro con $T_A$
<b>Factor de reducción en la superestructura</b>	$3/8 R$ , máximo 2	Entre 1.4 a 2 según tabla de $R_1$	$3/8 R_o$ , máximo 2
<b>Control de deriva</b>	- $0.015/R_1$ EST - $0.015/R_1$ ME - $0.020/R_1$ TH	- 0.0020 EST - 0.0025 ME - 0.0030 TH	- 0.0035 EST - 0.0035 ME - 0.0050 TH
<b>Evento Máximo Creíble</b>	Para comprobar desplazamientos y el SA	Para comprobar el SA y realizar el ensayo de los aisladores.	Para comprobar desplazamientos, el SA y realizar el ensayo de los aisladores.
<b>Rango sugerido para el <math>T_A</math></b>	- Entre 2 y 3 s	- Entre 2 y 3 s	- Entre 2 y 5 s
<b>Consideraciones enfatizadas</b>	P- $\Delta$	P- $\Delta$	P- $\Delta$
<b>Legalidad</b>	(No especifica)	Todos los aisladores deben estar certificados y haber sido ensayados en el país.	Todos los aisladores deben estar certificados y haber sido ensayados en laboratorio certificado.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

### **2.3.2.3.2. Procedimiento de diseño con aisladores LRB**

A continuación, serán enumerados una serie de pasos a manera de procedimiento a seguir para el desarrollo de un proyecto con sistema de aislamiento y las unidades de aislación, específicamente LRB. Este procedimiento estará regido por la terminología, indicaciones y restricciones de la norma E.031-2019.

#### **2.3.2.3.2.1. Diseño del sistema de aislación con LRB**

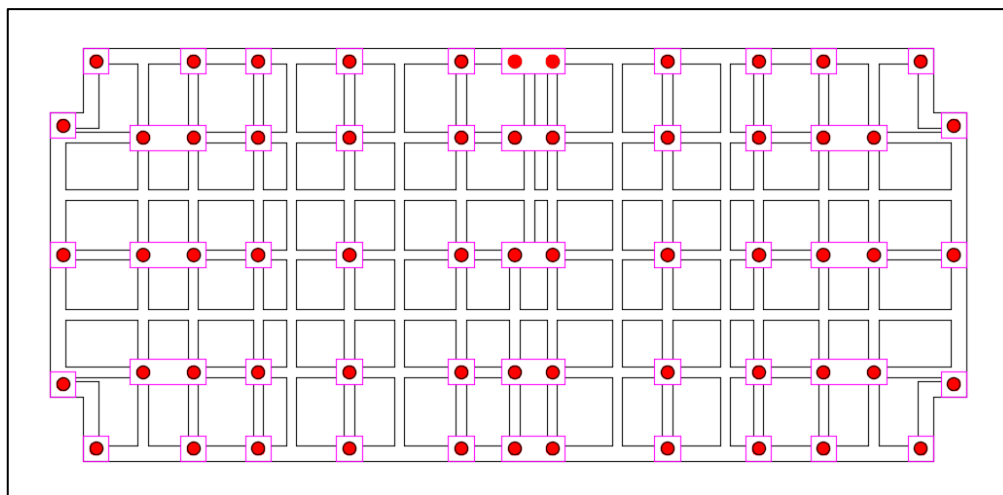
1) La primera etapa en la ingeniería de dispositivos de aislación consiste en desarrollar el modelo sin aislación. En el contexto peruano, implica que este debe estar conforme con lo propuesto en la E.030. Una vez que el modelo estructural con base fija está conforme con los indicadores de cortante mínima y derivas máximas, una de las dimensiones más relevantes a considerar es el periodo  $T$  para el modelo con base no aislada. Debe estar definido el espectro de diseño de la estructura. Así mismo, un espectro de aceleraciones promedio resultado de siete registros sísmicos históricos, que tiene que presentar valores por encima del espectro de diseño de la norma, que para la norma E. 031 es el SMC (Sismo máximo considerado).

Vale la pena mencionar que, conforme a lo estudiado acerca de los dispositivos de aislamiento y sus consecuencias en un modelo estructural con base fija, las situaciones en las que el sistema tendrá un efecto más eficiente y óptimo serán aquellas para modelo estructurales con periodos fundamentales por debajo de 1s y sobre suelos rígidos tipo S1, así que son recomendables particularmente para estos casos y debe ser tenido en cuenta antes del diseño.

A la estructura con diseño convencional le será añadido un sistema de aislamiento, el cual debería formar parte de un pre-dimensionamiento para estimar el número de aisladores con el que contará la estructura, compuesto por un nivel de base y una interfaz de aislamiento.

Para la situación del modelamiento en ETABS, será menester disponer de un archivo para cada modelo (base fija y aislada).

Sobre las partes del mecanismo de aislación, en el nivel de base se encuentran las losas, vigas y capiteles que transmiten debidamente las cargas de la superestructura y la transmiten a la interfaz de aislamiento, donde se ubican las unidades de aislamiento propiamente dichas, así como los dispositivos de restricción contra viento, dispositivos de disipación de energía y restricciones de desplazamiento:



*Figura 26.* Estructuración de interfaz de aislamiento en planta

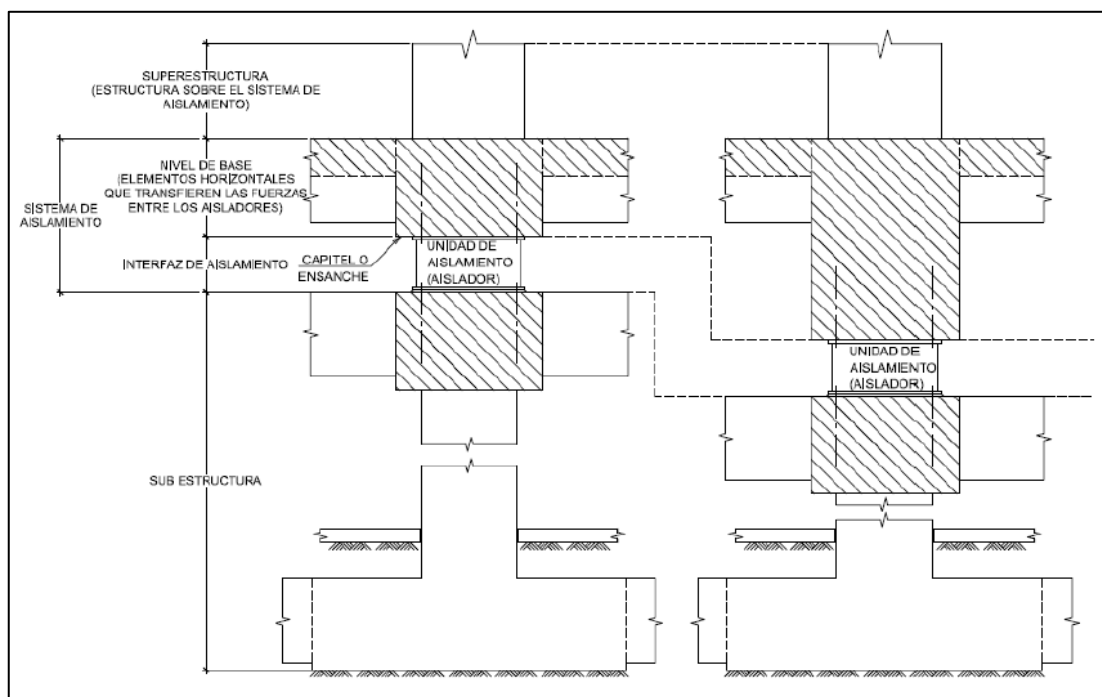


Figura 27. Partes del sistema de aislamiento

2) Debe definirse el valor de un periodo objetivo de la estructura aislada  $T_M$ , en el orden de 1.5 a 2.5 segundos, y un factor de amortiguamiento  $B_M$ , para un porcentaje de amortiguamiento  $\beta_M$  del orden del 15%. Así mismo, obtener el valor de la ordenada del espectro de aceleraciones concernientes al sismo máximo considerado (SMC).

$$S_{aM} = 1.5 ZCSg$$

Ecuación 27. Aceleración debido al SMC

Amortiguamiento Efectivo, $\beta_M$ (En porcentaje del amortiguamiento crítico) a,b	Factor $B_M$
$\leq 2$	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
$\geq 40$	1,9

Figura 28. Factor de amortiguamiento  $B_M$



3) En función a ello es posible calcular los valores de desplazamiento máximo  $D_M$  en expresiones de la ordenada del espectro de aceleraciones  $S_{aM}$ , el periodo objetivo  $T_M$ , y el factor de amortiguamiento  $B_M$ .

$$D_M = \frac{S_{aM} \cdot T_M^2}{4\pi^2 \cdot B_M}$$

*Ecuación 28.* Desplazamiento máximo

Así mismo se puede hallar el desplazamiento máximo total en función a la distancia perpendicular entre el centro de rigidez y el aislador más alejado,  $y$ , la excentricidad calculada como la sumatoria de la separación entre el centro de masa y centro de rigidez más la excentricidad accidental en la dirección ortogonal, la dimensión mayor de la proyección en planta,  $d$ , la dimensión menor,  $b$ , y la razón  $P_T$  no menor a 1 entre el periodo traslacional y rotacional efectivo en el mecanismo de aislación:

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

*Ecuación 29.* Desplazamiento máximo total

4) Dado que se conoce que el periodo fundamental es equivalente a una relación con la masa y la rigidez, siendo la masa un cociente entre el peso del modelo estructural y la aceleración de la gravedad:

$$T_M = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{P}{K_M \cdot g}}$$

*Ecuación 30.* Periodo fundamental de la estructura

Es posible estimar así un valor de la rigidez efectiva del sistema de aislamiento  $K_M$ , siendo la rigidez efectiva del aislador  $k_{eff}$ , el cociente entre  $K_M$  y  $N$ , el número de aisladores.

$$K_M = 4\pi^2 \cdot \frac{P}{T_M^2 \cdot g}$$

*Ecuación 31.* Rigidez efectiva del sistema de aislamiento

$$k_{eff} = \frac{K_M}{N}$$

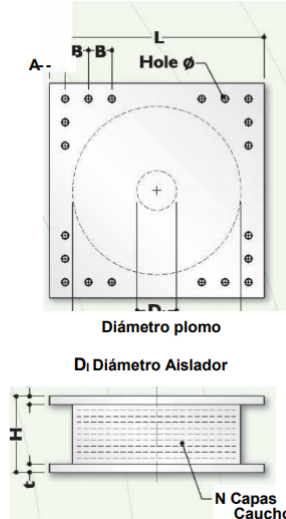
*Ecuación 32.* Rigidez efectiva de una unidad de aislamiento

De la misma forma, conociendo el valor del amortiguamiento dependiente de la masa, frecuencia circular del modelo desacoplado y coeficiente de amortiguamiento crítico, puede definirse un valor de amortiguamiento para cada unidad de aislación. Estos valores son los que se necesitan para esquematizar un aislador en el software ETABS, pudiendo estructurar el modelo aislado y comprobar su periodo y desplazamientos.

5) A partir de aquí se realizará el desarrollo del aislador, obteniendo un pre-diseño del diámetro del aislador en función de  $1.5D_{TM}$  y el cociente entre el peso de la estructura factorada y el número de aisladores para definir la capacidad de carga axial (la cual también tendrá en cuenta un esfuerzo axial permisible de 8 MPa). Para ello, se hará uso del catálogo de DIS, proporcionado por CDV Ingeniería Antisísmica.

Tabla 3. *Propiedades en función del diámetro del aislador*

Diámetro Aislador, $D_i$ (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, $D_{max}$ (mm)	Capacidad Carga Axial $P_{max}$ (kN)
	Rigidez Producida, $K_d$ (kN/mm)	Resistencia Características $Q_d$ (kN)	Rigidez a la compresión, $K_v$ (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000



Fuente: CDV Ingeniería Antisísmica, 2016

Tabla 4. *Dimensiones de la unidad de aislación en función a su diámetro*

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Diámetro Aislador, $D_i$ (mm)	Altura Aislador, $H$ (mm)	Número de capas de caucho, $N$	Diámetro del plomo, $D_c$ (mm)	$L$ (mm)	$t$ (mm)	Cantidad Orificios	Orificio $\phi$ (mm)	$A$ (mm)	$B$ (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

Fuente: CDV Ingeniería Antisísmica, 2016

En función a esto se determinará el diámetro de núcleo de plomo (teniendo en cuenta el esfuerzo de fluencia de 10 MPa) y la altura del aislador. Para este

último se tendrá en cuenta una altura del caucho sin las capas de acero en función del 150% de la deformación cortante, y se verificará en los rangos de la tabla del proveedor.

Así mismo, y conforme a lo referido en la normativa, deberá trabajarse con el límite inferior y superior del próximo cuadro de propiedades, otorgados por el proveedor fabricante:

Tabla 5. *Propiedades de los materiales para la unidad de aislación*

DESCRIPCION	limite inferior LB	limite superior LB	unidades
MODULO DE CORTE EFECTIVO DE GOMA G	5.95	8.05	Kg/cm <sup>2</sup>
MODULO VOLUMETRICO DE GOMA K	2000	2000	Mpa
MODULO DE CORTE DEL PLOMO Gp	127.5	172.5	Mpa
ESFUERZO DE CORTE DEL PLOMO Tpy	85	115	kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: CDV Ingeniería Antisísmica, 2016

Se calculará entonces el lazo histerético con el sismo máximo considerado SMC, determinando con el área del lazo las propiedades de rigidez elástica  $k_e$ , rigidez plástica  $k_p$ , fuerza para la deformación nula  $Q$  y desplazamiento máximo  $D_{TM}$ .

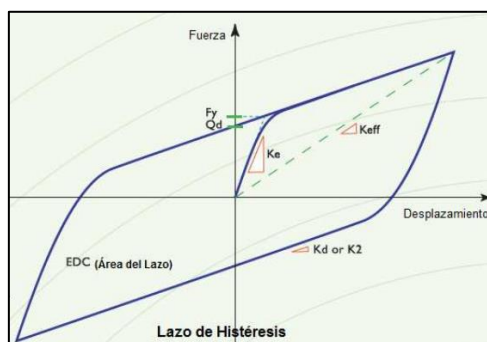


Figura 29. Lazo histerético de un aislador sísmico

Ya con ello será posible determinar un nuevo valor de  $k_{eff}$  y por lo tanto de  $K_M$ , que proporcionará al sistema un nuevo valor de  $T_M$  Y  $B_M$  y finalmente un nuevo  $D_{TM}$  que deberá compararse con el cálculo estimado con anterioridad y realizar las iteraciones necesarias hasta que los valores converjan.

6) Una vez obtenido el diseño y corroborado la unidad de aislación deberá comprobarse las cortantes mínimas y derivas frente a los requerimientos indicados en la norma, dependiendo de las cualidades del modelo estructural, tipo de zona y tipo de suelo en el que se ubique el proyecto. Cuando los parámetros obtenidos se encuentren por debajo de los parámetros máximos permisibles, el diseño habrá culminado, caso contrario, deberá replantearse el diseño de la unidad de aislación.

7) El análisis lineal solicita además de la rigidez horizontal, el valor de la rigidez vertical  $k_v$ , la que puede expresarse en términos del módulo de elasticidad del conjunto de láminas de acero y caucho  $E_c$ , el área transversal del aislador  $A$  y la altura  $H_l$  referido a la altura del caucho sin las planchas de acero.

$$k_v = \frac{E_c \cdot A}{H_l}$$

*Ecuación 33. Rigidez vertical*

El módulo de Elasticidad compuesto estará en función del módulo de corte del caucho  $G$ , cuyo rango se encuentra especificado en la tabla de propiedades, el factor de forma  $S$  obtenido del cociente entre el diámetro del aislador y cuatro veces el espesor de la lámina de caucho, y el módulo volumétrico del caucho  $K$ , determinado en 2000 MPa.

$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2K + K}$$

*Ecuación 34.* Módulo de elasticidad

Dado que se determina un valor de kv con las propiedades del aislador supuestas, estas deben corroborarse en el diseño final.

## 2.4. Definición de términos básicos

### **Aislación sísmica:**

Propuesta de desarrollo con un distanciamiento de la parte superior de una edificación del terreno sobre el que se apoya, de manera que pueda resguardarlo de las consecuencias de un acontecimiento telúrico. (Villareal y Oviedo, 2009).

### **Aisladores elastoméricos:**

Unidades que forman parte de un mecanismo de aislación y que se ubican en medio de una edificación y su fundación. (Kuroiwa, 2005)

### **Amortiguamiento Efectivo:**

Magnitud igual a la amortiguación viscosa que se refiere a la energía disipada cuando responde un ciclo en el mecanismo de aislación. (ASCE 7-10, 2010)

### **Coefficiente Sísmico:**

Coefficiente que incrementa la respuesta del modelo estructural debido a la velocidad del terreno durante la sucesión de un evento telúrico. (CAPECO, 2006)

### **Deriva de entrepiso:**

Relación entre la resta de las traslaciones laterales completos entre dos pisos adyacentes y su distancia medido de forma vertical. (Adaptado de CAPECO, 2006)

### **Desplazamiento de diseño:**

Traslación lateral cuando ocurre un movimiento sísmico no teniendo en cuenta la traslación debido a cargas de torsión. Se emplea para la ingeniería de los dispositivos aislantes. (ASCE 7-10, 2010).

### **Desplazamiento total de diseño:**

Traslación lateral cuando ocurre un movimiento telúrico dimensionado para la ingeniería llevando presente la traslación causada por torsión auténtica y accidental. Se utiliza para la ingeniería de los dispositivos aislantes o una parte de ella. (ASCE 7-10, 2010)

### **Desplazamiento total máximo:**

Traslación lateral cuando ocurre un movimiento telúrico de consideración máxima teniendo en cuenta la traslación causada por torsión auténtica y accidental. Se utiliza para revisar que un mecanismo de aislación es estable o alguna parte de ella, para el desarrollo de los intersticios del modelo estructural y los ensayos frente a tensión gravitacional en sujetos de prueba de la unidad de aislación. (ASCE 7-10, 2010).

### **Edificaciones Esenciales:**

Estructuras de carácter primordial que poseen el propósito de no quedar inoperativos durante la sucesión de un movimiento telúrico, tales como establecimientos de salud, edificios de comunicaciones, puestos policiales y de bomberos, unidades de estación eléctricas, estructuras para contener agua, colegios y estructuras que cumplan la función de resguardo tras una emergencia. (CAPECO, 2006)

### **Energía Sísmica:**

Magnitud que es emancipada tras la sucesión de un movimiento telúrico, la cual se expresa en forma calorífica y en forma de ondas. (Kuroiwa, 2005)

**ETABS v15:** Software para la ingeniería de modelos estructurales que se apoya del MEF para analizarlas y diseñarlas. Su aplicación se encuentra enfocada en las estructuras de edificaciones.

### **Interfaz de aislamiento:**

Está definido por el espacio que existe en una edificación con mecanismo de aislación, teniendo por un lado a la superestructura aislada y por otra a la subestructura rígida, que puede ser la fundación en el terreno. (ASCE 7-10, 2010).

### **Muros de ductilidad limitada:**

Edificaciones caracterizadas por contar con un espesor de muros reducidos de concreto armado que sirven en simultáneo como muros de corte y gravedad (E 030, 2018)

### **Periodo de vibración:**

En el rango de tiempo en que se vibra de forma cíclica. (FADU, 2014)

### **Rigidez efectiva:**

Magnitud del cociente entre la carga del mecanismo de aislación o una parte de este y la traslación lateral asociada. (ASCE 7-10, 2010).

### **Sistema de aislación:**

Todas las partes que componen y contribuyen al mecanismo de aislamiento. (ASCE 7-10, 2010).



**Unidad de Aislación:**

Dispositivo que posee la propiedad de poseer una gran flexibilidad en el sentido de la acción telúrica y una importante resistencia al desplazamiento en el sentido de la gravedad. (ASCE 7-10, 2010)

## CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Operacionalización de Variables

OPERACIONALIZACION DE VARIABLES									
Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Items	Medición	Unidad de medida		
INDEPENDIENTE	Edificio con muros de ductilidad limitada utilizando aisladores sísmicos	Edificación caracterizada por contar con un espesor de muros reducidos de concreto armado que sirven en simultáneo como muros de corte y gravedad (E 030, 2018), al cual se le incorpora un mecanismo que aísla la base de la estructura y lo protege contra eventos sísmicos (Villareal y Oviedo, 2009).	Modelamiento matemático de un edificio con muros de ductilidad limitada al cual se le adiciona un sistema de aislamiento en la base y se obtienen sus parámetros sísmicos a través de un software que utiliza el método de elementos finitos para el cálculo de fuerzas y desplazamientos.	Modelamiento de edificio con base fija	Periodo fundamental de la estructura con base fija	Modo de vibrar de la estructura fija	Modos de vibración de la estructura fija	Norma E 030	segundos (s)
					Peso sísmico de la estructura	Sumatoria de cargas vivas y muertas factoradas por piso	Cálculo de peso sísmico	Norma E 030	toneladas (tn)
					Resistencia del concreto	Esfuerzo resistente por unidad de área en un testigo cilíndrico	Resistencia del concreto f'c de la estructura	Planos de estructuras con base fija	kg/cm <sup>2</sup>
					Sección de muros	Dimensión transversal de muros en una vista en planta.	Secciones de muro de la estructura	Planos de estructuras con base fija	centímetros (cm)
					Fuerza cortante basal en base fija	Fuerza cortante en la base debido al sismo de diseño	Cortante sísmica en estructura fija	Software de cálculo estructural	toneladas (tn)
					Desplazamiento lateral de la estructura en base fija	Desplazamiento de ultimo nivel debido a sismo de diseño	Desplazamiento lateral en último nivel en estructura fija	Software de cálculo estructural	centímetros (cm)
					Derivas máximas en estructura con base fija	Distorsiones máximas de entrepiso debido a sismo de diseño	Distorsiones máximas de piso en estructura fija	Software de cálculo estructural	adimensional

OPERACIONALIZACION DE VARIABLES (CONTINUACION)								
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES		INDICADORES	ITEMS	MEDICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
INDEPENDIENTE				Sistema de aislación sísmica	Conjunto de elementos que aportan rigidez efectiva al sistema que desacopla la base de la estructura.	Diagramas de histéresis de aisladores	Software de cálculo estructural	tn/m
			Modelamiento de edificio con base aislada	Periodo fundamental de la estructura aislada	Modo de vibrar de la estructura aislada	Modos de vibración de la estructura aislada	Software de cálculo estructural	segundos (s)
				Desplazamiento total en el sistema de aislación	Traslación máxima de la estructura debido al sismo máximo considerado (SMC)	Desplazamientos máximos y mínimos de aisladores	Software de cálculo estructural	centímetros (cm)
DEPENDIENTE	Desempeño Sísmico	Selección de apropiados esquemas de evaluación que permiten el dimensionado y detallado de los elementos estructurales y no estructurales considerando que la estructura no debería recibir una respuesta mayor al de unos definidos estados límite frente al efecto de un movimiento sísmico (Bertero, 1995)	Respuesta de la estructura aislada cuando es sometida al sismo de diseño, de manera que pueda compararse con la respuesta sísmica de la estructura con base fija.	Reducción de la fuerza cortante basal en estructura aislada	Fuerza cortante en la base de la estructura debido al sismo de diseño reducida por el sistema de aislamiento.	Reducción de cortante sísmica	Estadística Descriptiva	toneladas (tn)
				Reducción del desplazamiento lateral en último nivel de estructura aislada	Desplazamiento de último nivel debido a sismo de diseño reducido por el sistema de aislamiento.	Reducción de desplazamiento lateral del último nivel	Estadística Descriptiva	centímetros (cm)
				Reducción de derivas máximas de estructura aislada	Distorsiones máximas de entrepiso debido a sismo de diseño reducidas por el sistema de aislamiento.	Reducción de distorsiones máximas de entrepiso	Estadística Descriptiva	adimensional

### **3.2. Tipo de Estudio**

El presente estudio corresponde a un enfoque cuantitativo de nivel explicativo y con alcance exploratorio y comparativo de carácter experimental. El estudio responde a una problemática que exige precisar el estado de una variable cuando es afectado por la condición de otra. De forma específica, sobre la base de antecedentes analizados en edificios con otros sistemas estructurales de hormigón reforzado se postula que tras implementar dispositivos de aislación en un proyecto con MDL este, dado su correlación, debería mejorar su desempeño sísmico pero se necesita precisar “cuánto” y si existe similitud en resultados, de manera que permita catalogar la mejora del desempeño como un cambio importante y satisfactorio para resolver el problema de vulnerabilidad de estas estructuras frente a sismos.

### **3.3. Diseño de investigación**

De acuerdo a Hernández Sampieri (1998, Pag.148), en los diseños cuasi-experimentales los componentes de prueba se distribuyen a los grupos no por azar, sino que ya están ordenados previamente.

El presente estudio posee un diseño cuasi-experimental, porque el modelo al cual se le incorporan las unidades de aislación corresponde a un proyecto preconcebido, y cuyas propiedades ya están dadas antes de la experimentación. Sin embargo, vale tener en cuenta que el estudio cumple con los requisitos de un diseño experimental al poseer una variable independiente manipulada, pues se implementan aisladores sísmicos al proyecto con base fija, haciendo posible establecer un grupo de propiedades con la condición de base fija y otra con la cualidad de base aislada. Además, es posible medir las consecuencias de la alteración de la variable independiente de forma confiable a través de una metodología con operaciones matemáticas.

### **3.4. Población, muestra y muestreo (Materiales, instrumentos y métodos)**

Arias, F. (2006) define Población como “un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación...”.

En esta investigación la población corresponde a todas las edificaciones con MDL construidos en el Perú al cual se le puedan incorporar unidades de aislación LRB.

Asimismo, la muestra “es un subconjunto representativo obtenido con el fin de investigar, a partir del conocimiento de sus características particulares, las propiedades de una población” (Balestrini, 1997). La muestra se categoriza en dos ramas: probabilística y dirigida.

En este caso, la muestra corresponde a una vivienda con MDL del proyecto Ciudad Sol de Retablo, teniendo como criterio el muestreo no probabilístico. Esto porque la representatividad de la muestra se ve reflejado en la relevancia que posee Comas por ser el cuarto distrito más poblado de Lima, y siendo esta ciudad la más poblada del Perú, albergando casi un tercio del total de habitantes y también la gran parte de proyectos con esta propuesta estructural en la nación. El mismo proyecto Ciudad Sol de Retablo corresponde a un emprendimiento masivo de 20,000 viviendas, por lo que desde ya alberga un grupo representativo de edificios con estas características.

Finalmente, el proyecto mencionado compone edificios de vivienda social, por lo que alberga al rubro de habitantes y la categoría de edificio dirigido en la problemática de este estudio.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

Rojas Soriano (1996, p.197) señala al referirse a las técnicas e instrumentos para recopilar datos de campo que el volumen y el tipo de información-cualitativa y cuantitativa- que se recaben deben estar plenamente justificados por los objetivos e hipótesis de la investigación, o de lo contrario se corre el riesgo de recopilar datos de poca o ninguna utilidad para efectuar un análisis adecuado del problema.

#### **3.5.1. Para recolección de datos**

Para recolectar los datos se utilizará el método de observación directa. Según Tamayo (2007, p.193) la observación directa “es la caracterizada porque el investigador puede observar y recoger datos mediante su propia observación”.

La observación directa es un método de recolección de datos que consiste en observar al objeto de estudio dentro de una situación específica, sin intervenir ni alterar el ambiente en el que el objeto se desenvuelve.

Los datos a recolectar corresponden a la documentación concerniente al proyecto Ciudad Sol de Retablo ejecutado (estructura con base fija). Esta información ha sido provista por la constructora DH MONT & CG & M S.A.C.

### **3.5.2. Para el análisis de datos**

Para el análisis de datos se utilizará como técnica la estadística descriptiva. La estadística descriptiva tiene por objeto fundamental describir y analizar las características de un conjunto de datos, obteniéndose de esa manera conclusiones sobre las características de dicho conjunto y sobre las relaciones existentes con otras poblaciones, a fin de compararlas.

En este trabajo se utilizarán cuadros y gráficas para analizar comparativamente los resultados concernientes al desempeño sísmico del proyecto aislado y con base fija para determinación de los resultados.

### **3.6. Procedimiento de análisis de datos**

En adelante se expone el procedimiento numerado para el análisis de los datos:

1) Se realizará la etapa de modelamiento del proyecto con base fija, partiendo de la recaudación de información técnica del inmueble existente. El modelamiento partirá estableciendo los componentes área de muros y losas, las características de los materiales y las fuerzas asignadas, los cuales serán extraídos de los planos de estructuras. La distribución de los componentes será conforme a lo reflejado en los planos de arquitectura. Se usará el EMS recabado para establecer los indicadores de suelo involucrados en el estudio. Para el modelado y los cálculos estructuras se utilizará como herramienta un programa de cálculo computarizado (ETABS v15).

2) Se cargará el espectro de diseño de la E 0.30 al modelo, y se obtendrán los desplazamientos, cortantes y derivas máximas a través del análisis sísmico dinámico modal-espectral para el inmueble sin aislación. En el procedimiento deberá verificarse que las distorsiones máximas y la cortante mínima cumplen con los acápites del código.

- 3) Se realizará el predimensionado del mecanismo aislante, definiendo un periodo objetivo para el modelo que garantice una mejora importante en el desempeño sísmico, modelando el piso técnico y asignando las unidades de aislación con sus respectivas características de rigidez efectiva y amortiguamiento. Durante este procedimiento debe verificarse que el mecanismo aislante está conforme con la E 0.31 al verse afectado por el sismo máximo esperado (SMC) definido en función del sismo de diseño de la E.030. La norma de aislamiento demanda la verificación de la propuesta con dispositivos aislantes mediante el método de análisis dinámico tiempo-historia, y se requiere realizar un tratamiento a las señales a utilizar, por consecuencia se usará como herramienta las aplicaciones SeismoSignal y SeismoMatch. Un procedimiento del tratamiento de señales sísmicas puede encontrarse en la sección de Anexos.
- 4) Una vez verificado que la propuesta original y la versión aislada cumplen con sus respectivas normas, pueden obtenerse los desplazamientos, fuerzas cortantes y derivas máximas de la estructura aislada ante el efecto del sismo de diseño, de manera que sus resultados sean comparables con los obtenidos por la estructura fija.
- 5) Con la obtención de ambos resultados, seguirá ejercer la comparación determinando la mejora del desempeño sísmico mediante los desplazamientos, fuerzas cortantes y derivas máximas. Para los cuadros e ilustraciones se utilizará como herramienta el software Microsoft Excel.



## **CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Modelamiento estructural**

A continuación, se detallan los parámetros a ser considerados en el modelamiento del sistema con base fija y del sistema aislado. En este sub capítulo se realiza primero el modelamiento y análisis del mecanismo con base fija, verificando que se halle conforme con las indicaciones de la E 0.30. En base a ello se realiza el modelado de la edificación con base aislada, verificando que se cumpla con los términos de la norma E 0.31. En la tercera parte se procede con obtener las dimensiones del desempeño sísmico de la edificación con base aislada cuando se haya influenciado por el sismo de diseño. El sismo de diseño no es utilizado para la revisión de los indicadores de proyecto con base aislada, sin embargo, al terminar el análisis es factible calcular las cargas cortantes, desplazamientos y derivas máximas con este sismo con motivo de la comparación del desempeño sísmico con el proyecto con base no aislada.

#### **4.1.1. Modelamiento y análisis del sistema con base fija**

Anteriormente se ha indicado que el modelo corresponde a una estructura construida, el edificio Techo Propio del proyecto Ciudad Sol de Retablo. El edificio ha sido modelado en ETABS V15 respetando sus parámetros de carga y características de los materiales. Vale mencionar que el proyecto del mismo fue concebido bajo los lineamientos de la norma E 0.30-2006. Para efectos de esta investigación, el modelo será evaluado con los parámetros sísmicos propuestos por la norma vigente E 0.30-2018.

#### 4.1.1.1 Cargas para el análisis

Las cargas consideradas para actuar sobre la estructura serán las siguientes:

##### 4.1.1.1.1 Cargas muertas

Definidas como todas aquellas cargas que actúan de forma permanente en la estructura, independientemente a la interacción o acciones de sus ocupantes.

- a) **Peso Propio (PP):** Carga muerta generada por el peso de los componentes de la estructura. Dado que se dispone con un mecanismo de MDL, todos los componentes de la estructura son de concreto armado, por lo tanto, esta carga estará definida por la densidad volumétrica del concreto, equivalente a 2400 kg/m<sup>3</sup>.
- b) **Acabado de piso:** Carga distribuida correspondiente al acabado de departamentos. Para este caso de análisis se ha dimensionado la carga en 200 kg/m<sup>2</sup>.

##### 4.1.1.1.2 Cargas vivas

Aquellas cargas definidas por el mobiliario y los ocupantes de la estructura, las cuales interactúan y no son permanentes para la estructura.

- a) **Carga viva (CV):** Carga distribuida correspondiente a todos los pisos de la vivienda, y equivalente a 200 kg/m<sup>2</sup>.
- b) **Carga viva de techo:** Carga distribuida correspondiente al último piso de la vivienda y equivalente a 100 kg/m<sup>2</sup>.

#### 4.1.1.1.3 Cargas de sismo

Es la carga provocada por la aceleración del suelo durante un movimiento telúrico.

La carga de sismo puede ser representada a través de métodos estáticos y dinámicos, según lo permitido por la norma.

- a) **Análisis Estático:** La cortante  $V$  es calculada por el producto de coeficientes definidos en E.030 con el peso sísmico. Dado que se está trabajando con el modelado de una residencial, el peso sísmico  $P$  se cuantifica como la sumatoria completa de la carga muerta y el 25% de la carga viva actuante.

$$V = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R_o} \cdot P$$

*Ecuación 35.* Fuerza cortante basal

A continuación, se expone la definición de cada coeficiente y el valor correspondiente para la estructura a analizar.

Tabla 6. *Coefficientes sísmicos para fuerza cortante en la base*

COEFICIENTE	DESCRIPCION	INDICADOR PARA EL PROYECTO	VALOR NUMERICO
Z	FACTOR DE ZONA	ZONA 4	0.45
U	FACTOR DE CATEGORIA	CATEGORIA C	1
S	FACTOR DE SUELO	SUELO S1	1
C	FACTOR DE AMPLIFICACION SISMICA	$h_n$ : 19.36 m $C_T$ : 60 Periodo T: 0.323 s	2.5
$R_o$	COEFICIENTE DE REDUCCION	SISTEMA MDL (REGULAR)	4

Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse, la magnitud del periodo fundamental para el proyecto con base fija se halla en 0.32 segundos, valor que corresponde al

de periodos cortos, lo cual es un indicador de la estructura presenta una alta rigidez.

El peso sísmico es calculado considerando las cargas muertas y vivas por nivel, según como se muestra a continuación:

Tabla 7. *Distribución de cargas por piso y peso sísmico de la estructura*

NIVEL	AREA (m <sup>2</sup> )	CARGA MUERTA (Tn)	CARGA VIVA (Tn)	CARGA SERVICIO (Tn)	PESO SISMICO (Tn)
<b>PISO 1</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 2</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 3</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 4</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 5</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 6</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 7</b>	480.11	408.10	96.02	504.12	432.10
<b>PISO 8</b>	482.83	410.41	48.28	458.69	422.48
<b>TOTAL</b>	3,843.62	3,267.07	720.44	3,987.51	<b>3,447.18</b>

Fuente: Elaboración propia

Así es factible definir que la cortante basal estática es igual a 969.52 toneladas. A través del método de fuerzas equivalentes es posible determinar la distribución de fuerzas inerciales que actúan sobre la altura del edificio. A continuación, se expone una tabla con la distribución de fuerzas inerciales según E.030-2018.

Tabla 8. *Distribución de fuerzas inerciales y cortantes por piso*

Nivel	h <sub>PISO</sub>	P (Ton)	F=%*V (Fza Inercial)	V(Corte)
8	2.42	422.48	118.82	118.82
7	2.42	432.10	121.53	240.35
6	2.42	432.10	121.53	361.88
5	2.42	432.10	121.53	483.41
4	2.42	432.10	121.53	604.94
3	2.42	432.10	121.53	726.46
2	2.42	432.10	121.53	847.99
1	2.42	432.10	121.53	969.52
<b>TOTAL</b>		<b>3,447.18</b>	<b>969.52</b>	

Fuente: Elaboración propia

Las fuerzas inerciales por piso fueron incluidas en el ETABS V15 conforme lo calculado en la tabla anterior para el análisis. En la próxima figura puede verificarse las cargas laterales para el análisis estático en la dirección X-X. Como las propiedades y coeficientes son los mismos para la dirección Y-Y, las cargas de análisis son las mismas:

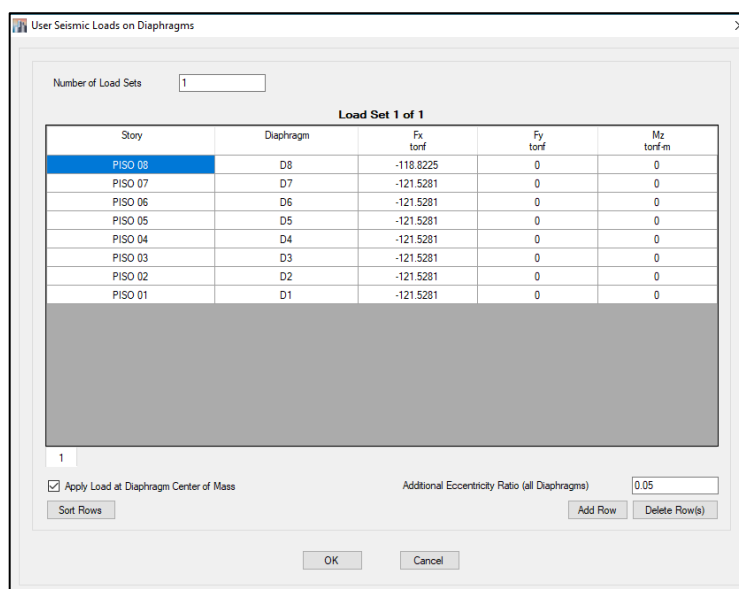


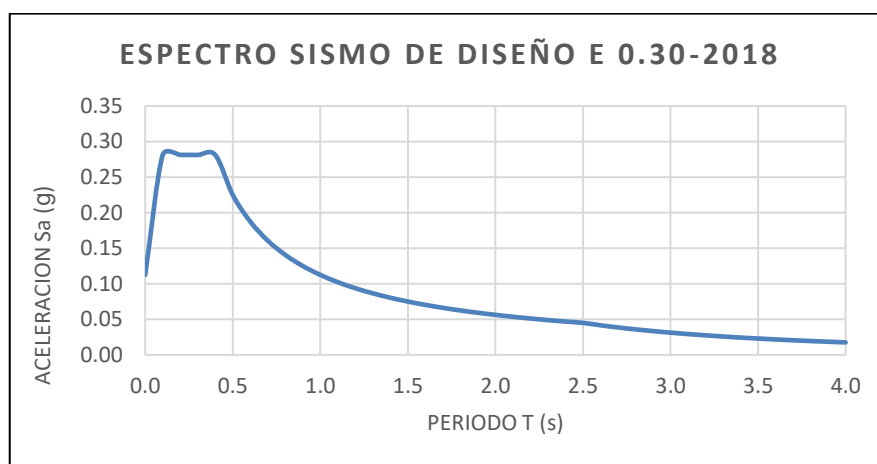
Figura 30. Fuerzas inerciales por piso

b) **Análisis Dinámico Modal-Espectral:** Para esto se requiere un espectro de la E.030, cuya función aceleración es determinado a continuación:

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R_o} \cdot g$$

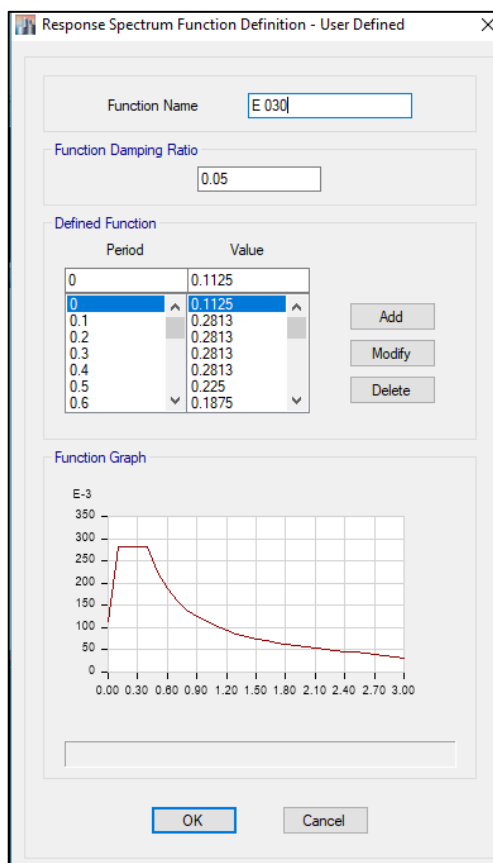
*Ecuación 36.* Espectro de aceleraciones según sismo de diseño

La ilustración que viene expone el espectro en expresión de la gravedad g:



*Figura 31.* Espectro para sismo de diseño según E 0.30-2018

Así mismo se muestra el sismo de diseño en ETABS V15. Considerando que la cortante mínima para el análisis modal espectral debe ser al menos un 80% de la cortante por análisis estático para modelos estructurales regulares, fue necesario realizar un escalamiento del espectro con un valor de 1.4. Este escalamiento al espectro se realizó en la herramienta de cálculo durante la definición de casos de sismo, conservando la función original conforme a la norma:



*Figura 32.* Definición de espectro de respuesta para sismo de diseño

La respuesta máxima elástica esperada ( $r$ ) del sismo en el análisis modal espectral se encontrará por la combinación del 25% concerniente al análisis modal por la sumatoria de valores absolutos (ABS) y 75% correspondiente al análisis modal por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS).

En la figura siguiente se muestra la combinación de cargas para obtener el sismo dinámico por análisis modal espectral en ETABS V15, vale mencionar que los sismos ABS y SRSS fueron previamente escalados por la gravedad y el factor de escalamiento 1.4 :

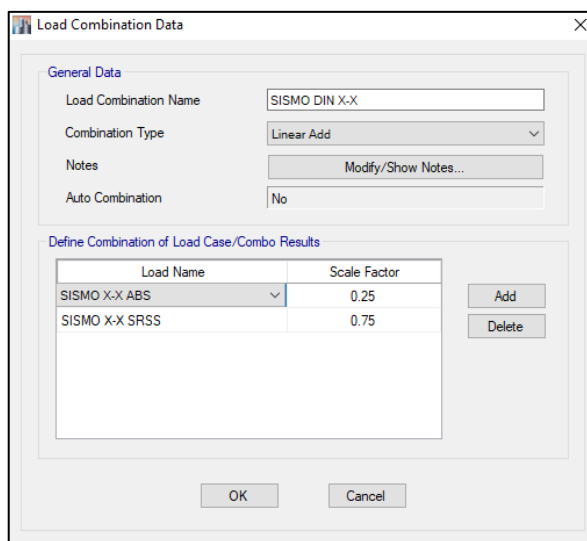


Figura 33. Combinación para análisis modal

- c) **Análisis Dinámico Tiempo-Historia:** Conforme con el código de la E 0.30 de diseño sismorresistente, no es obligatorio la realización de un análisis tiempo-historia, sin embargo estos serán necesarios y obligatorios para el análisis del modelo aislado. La E0.30 recomienda utilizar tres pares de registros de aceleraciones por lo mínimo, sin embargo en el proyecto con base aislada serán necesarios siete pares. Se usarán, por lo tanto, los siete pares de registros de aceleraciones compatibilizados con el espectro de la norma para el sismo máximo considerado (SMC), que será el punto de comparación para la respuesta de cada estructura.

Conforme especifica la norma de aislamiento, los registros de aceleraciones deben ser escalados y compatibles con el SMC, previo tratamiento de las señales sísmicas, para ello se utilizó el software SeismoSignal y SeismoMatch.

A continuación, se presentan los siete pares de registro para sismos históricos compatibles con la zona de estudio:



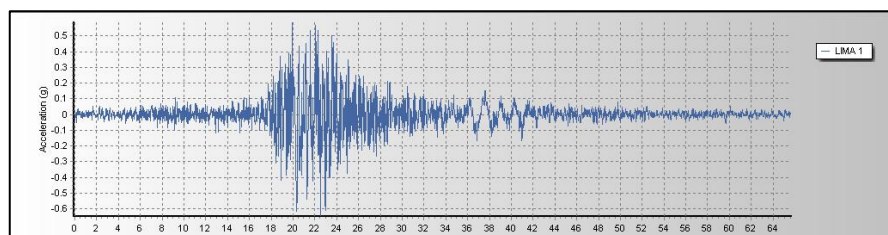
- **Lima 1966:**

Número de puntos: 3281

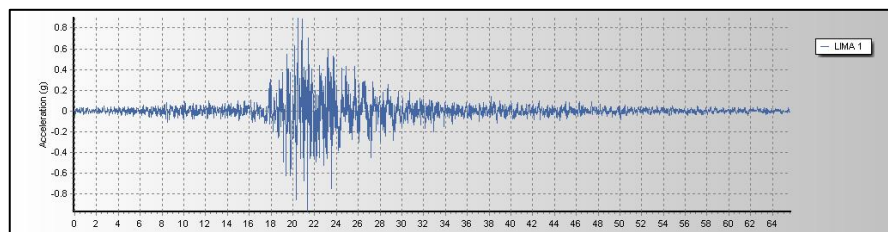
Intervalo: 0.02 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 0.64g / NS: 0.97g)



*Figura 34.* Registro de aceleración Lima 1966 E-O en Z4 y S1



*Figura 35.* Registro de aceleración Lima 1966 N-S en Z4 y S1

- **Ancash 1970:**

Número de puntos: 2253

Intervalo: 0.02 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 0.72g / NS: 0.79g)

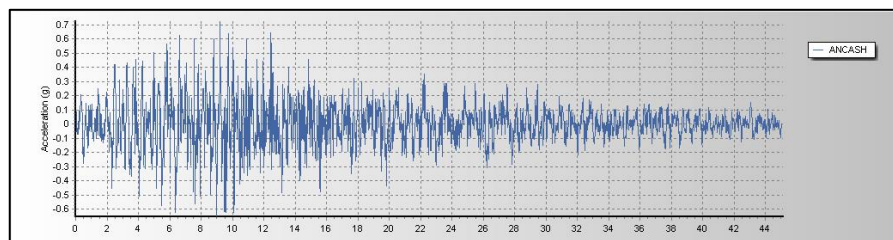


Figura 36. Registro de aceleración Ancash 1970 E-O en Z4 y S1

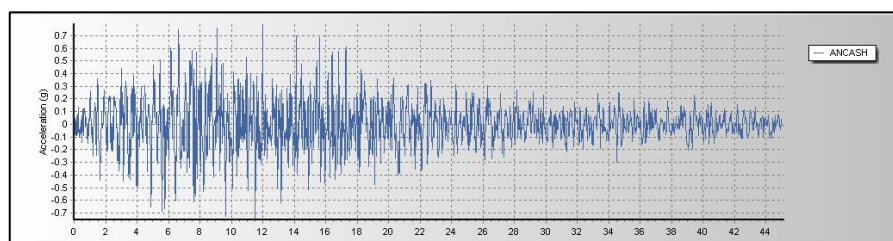


Figura 37. Registro de aceleración Ancash 1970 N-S en Z4 y S1

- **Lima 1974:**

Número de puntos: 4898

Intervalo: 0.02 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 0.82g / NS: 0.74g)

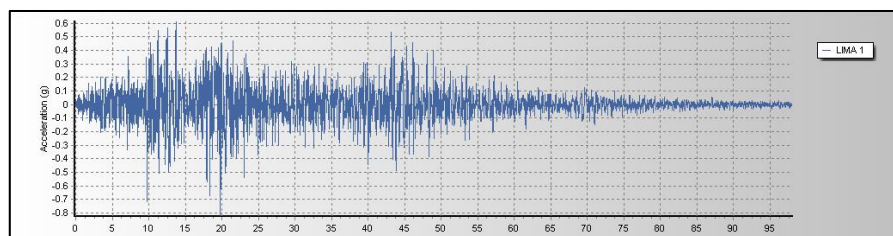


Figura 38. Registro de aceleración Lima 1974 E-O en Z4 y S1

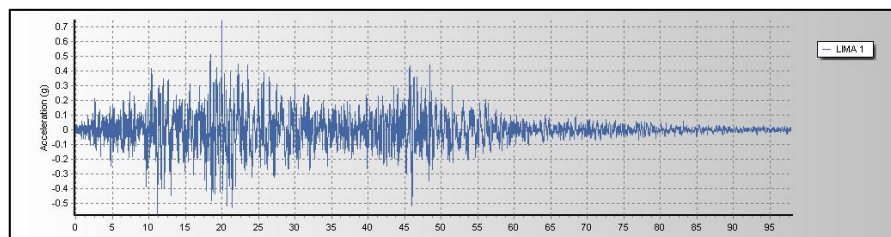


Figura 39. Registro de aceleración Lima 1974 N-S en Z4 y S1

- **Arequipa 2001:**

Número de puntos: 19891

Intervalo: 0.01 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 0.62g / NS: 0.74)

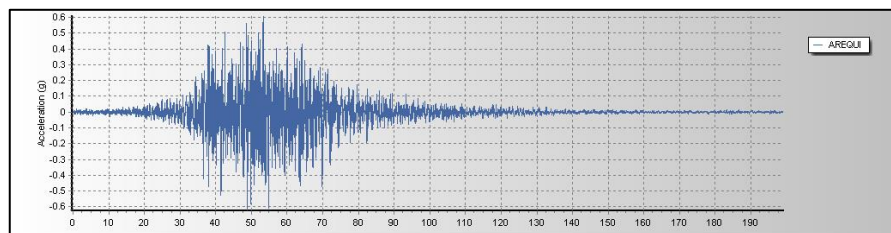


Figura 40. Registro de aceleración Arequipa 2001 E-O en Z4 y S1

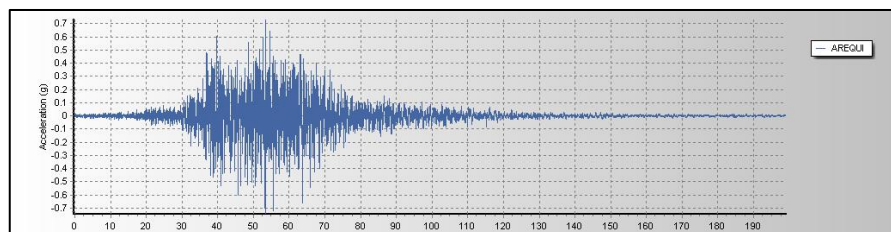


Figura 41. Registro de aceleración Arequipa 2001 N-S en Z4 y S1

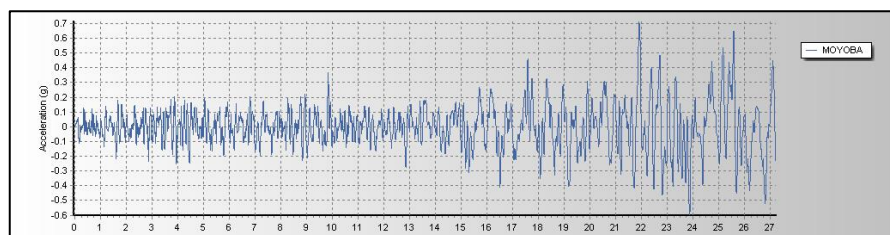
- **Moyobamba 2005:**

Número de puntos: 5439

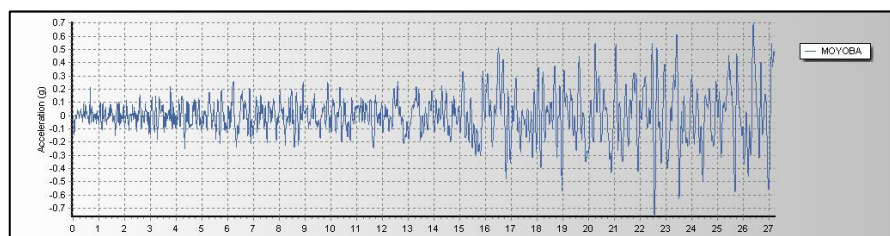
Intervalo: 0.005 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 0.71g / NS: 0.76g)



*Figura 42.* Registro de aceleración Moyobamba 2005 E-O en Z4 y S1



*Figura 43.* Registro de aceleración Moyobamba 2005 N-S en Z4 y S1

- **Pisco 2007:**

Número de puntos: 32198

Intervalo: 0.01 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 1.24g / NS: 0.92g)

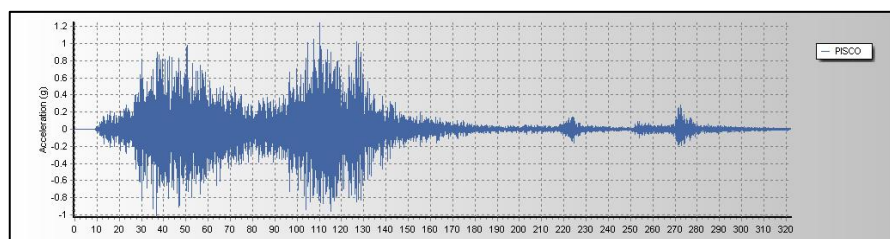


Figura 44. Registro de aceleración Pisco 2007 E-O en Z4 y S1

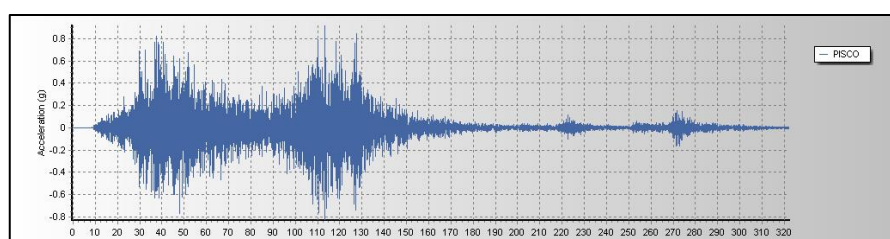


Figura 45. Registro de aceleración Pisco 2007 N-S en Z4 y S1

- **Lagunas 2019:**

Número de puntos: 21901

Intervalo: 0.02 s

Unidades: g

Aceleración pico: (EO: 0.70g / NS: 0.56g)

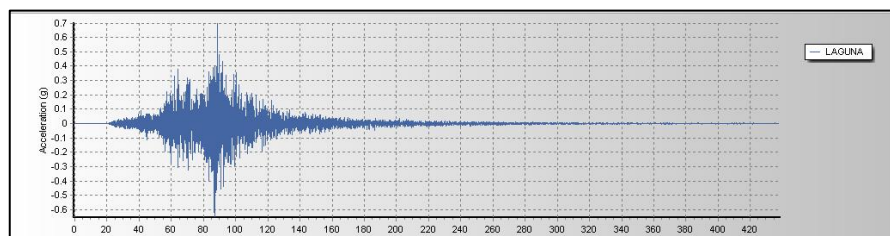


Figura 46. Registro de aceleración Lagunas 2019 E-O en Z4 y S1

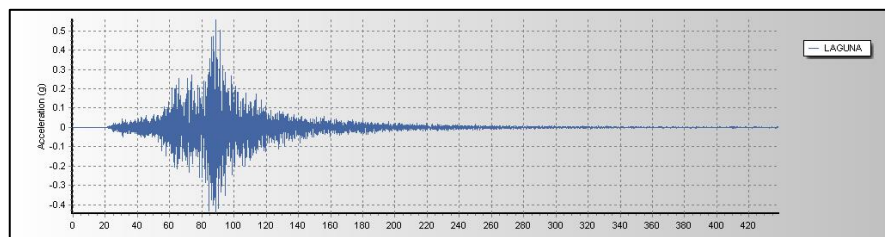


Figura 47. Registro de aceleración Lagunas 2019 N-S en Z4 y S1

#### 4.1.1.2 Materiales y propiedades

Tanto los componentes estructurales como no estructurales (alfeizares), serán de hormigón reforzado. El modelo convencional del edificio Techo Propio considera los dos primeros niveles con una resistencia  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup> en el concreto, mientras que el resto con un  $f'c$  175 kg/cm<sup>2</sup>. En la próxima ilustración se exponen las características definidas en ETABS V15:

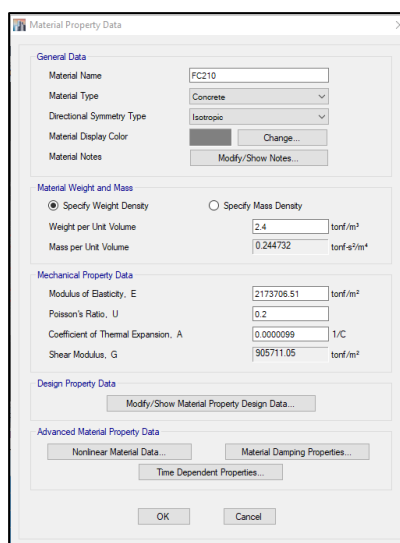
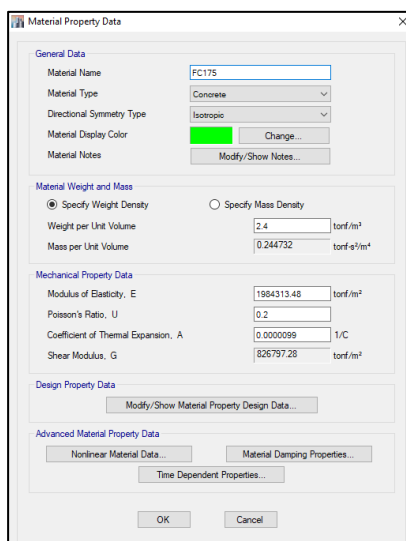


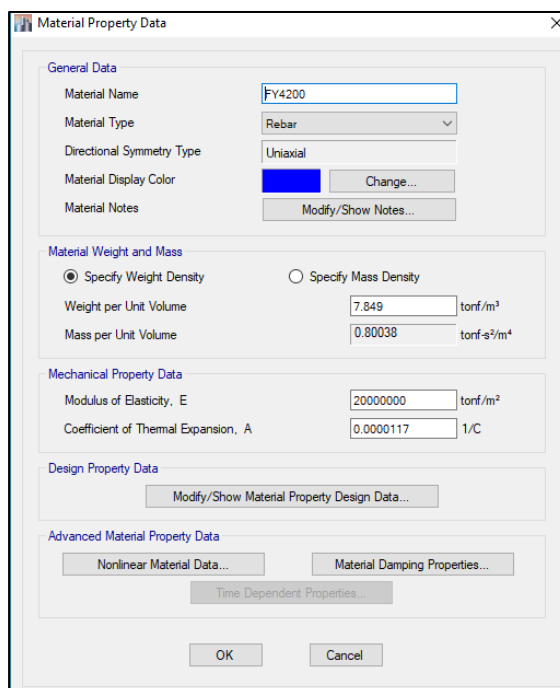
Figura 48. Definición de propiedades para concreto  $f'c$  210 kg/cm<sup>2</sup>



Section	Property	Value	Units
General Data	Material Name	FC175	
	Material Type	Concrete	
	Directional Symmetry Type	Isotropic	
	Material Display Color	Green	
Material Weight and Mass	Specify Weight Density	<input checked="" type="radio"/>	
	Weight per Unit Volume	2.4	tonf/in³
	Mass per Unit Volume	0.244732	tonf-s²/m⁴
	Specify Mass Density	<input type="radio"/>	
Mechanical Property Data	Modulus of Elasticity, E	1984313.48	tonf/in²
	Poisson's Ratio, U	0.2	
	Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000099	1/C
	Shear Modulus, G	826797.28	tonf/in²

Figura 49. Definición de propiedades para concreto  $f'c$  175 kg/cm<sup>2</sup>

Así mismo, todo el acero utilizado será con la colocación convencional, es decir no considera malla electrosoldada, por lo que se tomará un valor de  $f'y$  de 4200 kg/cm<sup>2</sup>. En la siguiente figura se exponen las características del acero asociadas para el ETABS V15:



Section	Property	Value	Units
General Data	Material Name	FY4200	
	Material Type	Rebar	
	Directional Symmetry Type	Uniaxial	
	Material Display Color	Blue	
Material Weight and Mass	Specify Weight Density	<input checked="" type="radio"/>	
	Weight per Unit Volume	7.849	tonf/m³
	Mass per Unit Volume	0.80038	tonf-s²/m⁴
	Specify Mass Density	<input type="radio"/>	
Mechanical Property Data	Modulus of Elasticity, E	20000000	tonf/m²
	Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000117	1/C

Figura 50. Definición de propiedades para acero  $f'y$  4200 kg/cm<sup>2</sup>

### 4.1.1.3 Elementos estructurales

Como bien se tiene considerado, todos los componentes del proyecto con base no aislada estarán definidos por muros y losas. El proyecto original cuenta con muros de 10 cm y 15 cm, mientras que la losa es de 12 cm salvo ensanches a 19 cm en las áreas de baños y a 15 cm en el área de vestíbulo de escalera.

A continuación, se muestran las definiciones de los elementos muro (Wall) para su incorporación en el modelo:

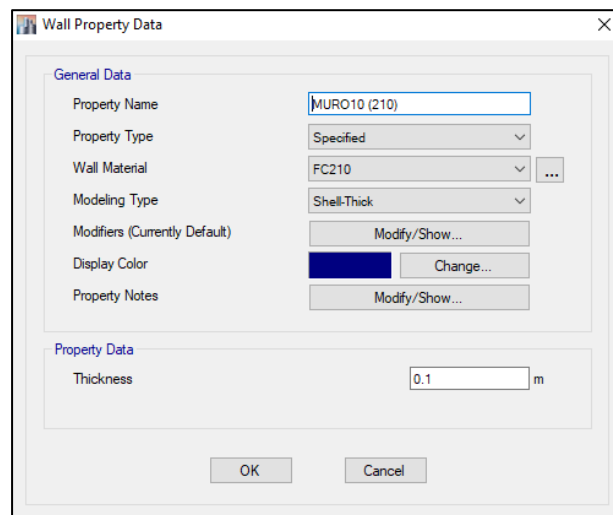


Figura 51. Definición de elementos de muro 10 cm

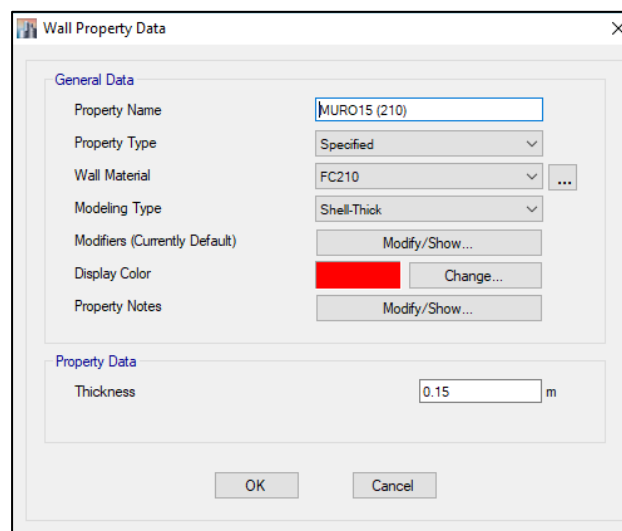
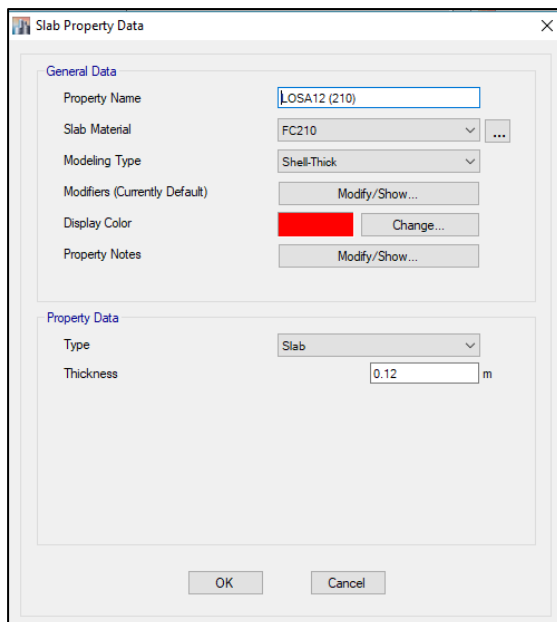


Figura 52. Definición de elementos de muro 15 cm

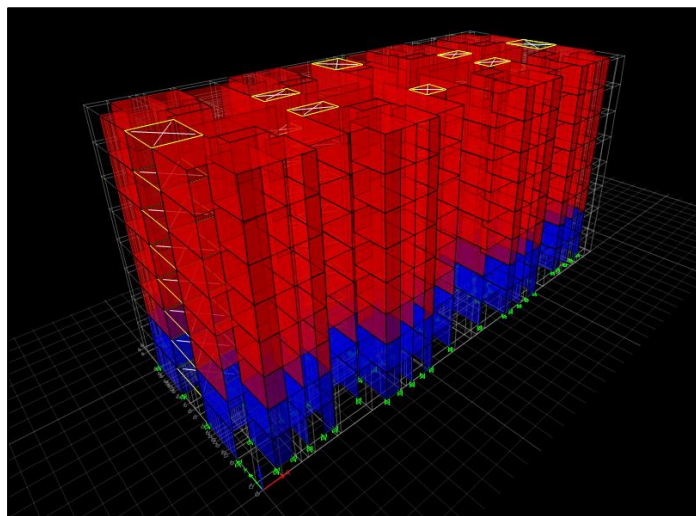


Así mismo, se cuenta con los elementos losa (slab), a continuación, se presenta su definición:



*Figura 53.* Definición de elementos de losa 12 cm

En la imagen que viene puede apreciarse, por la diferencia de colores, cómo los muros de 15 y 10 cm de espesor y losas de los primeros dos niveles, los cuales se encuentran con un concreto  $f'c$  210  $kg/cm^2$  (color azul), pasan a ser a partir del nivel 3, de concreto  $f'c$  175  $kg/cm^2$  (color rojo).



*Figura 54.* Resistencia del concreto en modelo de 8 pisos

#### 4.1.1.4 Periodo Natural

El desempeño sísmico del modelo estructural será descrito a través del periodo natural, la obtención de los modos de vibración, las cortantes basales, los desplazamientos laterales de entrepiso y las derivas máximas.

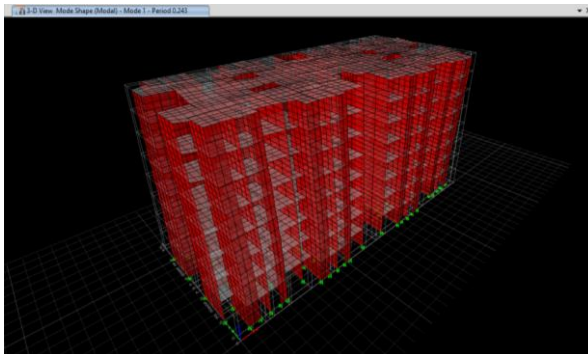
Tabla 9. *Periodos de la estructura sin aislamiento*

<b>Caso</b>	<b>Modo</b>	<b>Periodo seg</b>
Modal	1	0.243
Modal	2	0.233
Modal	3	0.223
Modal	4	0.065
Modal	5	0.061
Modal	6	0.057
Modal	7	0.037
Modal	8	0.036
Modal	9	0.032
Modal	10	0.023
Modal	11	0.022
Modal	12	0.021

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

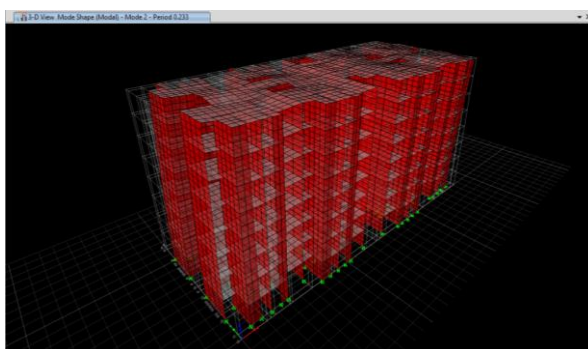
#### 4.1.1.5 Modos de vibración

**1° Modo de vibración:**  $T_1 = 0.243$  seg. , muestra rotación en el eje Z.



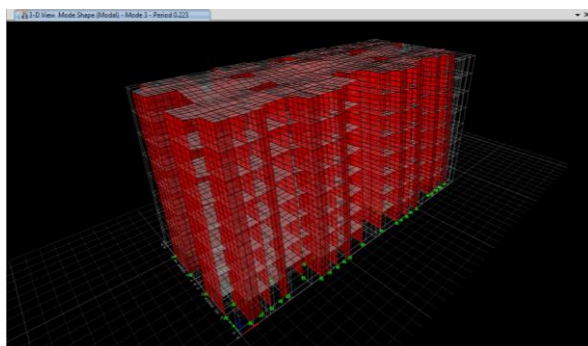
*Figura 55.* Primer modo de vibración sin aislamiento

**2° Modo de vibración:**  $T_2 = 0.233$  seg. , muestra traslación en el eje X.



*Figura 56.* Segundo modo de vibración sin aislamiento

**3° Modo de vibración:**  $T_3 = 0.223$  seg., muestra traslación en el eje Y.



*Figura 57.* Tercer modo de vibración sin aislamiento.

#### 4.1.1.6 Cortante sísmica

Conforme con los lineamientos de la norma, el modelo sin aislamiento debe cumplir con los parámetros solicitados por la norma de Diseño Sismorresistente, para ello fueron corroborados el cortante estático y el cortante dinámico para el análisis modal espectral, verificando cortante mínimo y derivas máximas.

El peso sísmico de la estructura ascendió, según metrado de cargas, a 3447.18 toneladas, y el peso estático obtenido corresponde a 969.52 toneladas, es decir, un 28.13% del peso sísmico del edificio.

El espectro de diseño fue escalado en el valor de 1.4 para estar conforme con el requerimiento de cortante mínimo, el cual estuvo determinado por el 80% de la cortante estática, es decir, 767.62 toneladas.

De esta manera, conforme al espectro de diseño escalado se obtuvo un valor de 806.84 toneladas para la carga sísmica en X-X y 843.35 toneladas para la carga sísmica en Y-Y, los cuales se hallan por encima del valor del cortante mínimo solicitado por la norma.

Tabla 10. *Fuerzas de piso en X-X con respecto a sismo de diseño.*

PISO	CASO DE CARGA/COMBO	VX (tonf)	VY (tonf)
PISO 08	SISMO DE DISEÑO X-X	206.90	71.05
PISO 07	SISMO DE DISEÑO X-X	371.76	125.88
PISO 06	SISMO DE DISEÑO X-X	495.76	168.64
PISO 05	SISMO DE DISEÑO X-X	587.94	199.64
PISO 04	SISMO DE DISEÑO X-X	670.31	227.26
PISO 03	SISMO DE DISEÑO X-X	735.67	247.58
PISO 02	SISMO DE DISEÑO X-X	779.44	260.62
PISO 01	SISMO DE DISEÑO X-X	<b>806.84</b>	267.77

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 11. *Fuerzas de piso en Y-Y con respecto a sismo de diseño.*

PISO	CASO DE CARGA/COMBO	VX (tonf)	VY (tonf)
PISO 08	SISMO DE DISEÑO Y-Y	66.65	220.95
PISO 07	SISMO DE DISEÑO Y-Y	118.88	395.53
PISO 06	SISMO DE DISEÑO Y-Y	158.29	527.21
PISO 05	SISMO DE DISEÑO Y-Y	188.73	621.41
PISO 04	SISMO DE DISEÑO Y-Y	214.93	711.27
PISO 03	SISMO DE DISEÑO Y-Y	234.44	776.76
PISO 02	SISMO DE DISEÑO Y-Y	249.86	812.27
PISO 01	SISMO DE DISEÑO Y-Y	257.84	<b>843.35</b>

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.1.7 Desplazamientos laterales

Se muestran los desplazamientos de entrepiso asociados al diafragma de cada nivel en función al sismo de diseño.

Tabla 12. *Desplazamientos en entrepiso en X-X con respecto a sismo de diseño.*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX (cm)
PISO 08	D8	SISMO DE DISEÑO X-X	0.5797
PISO 07	D7	SISMO DE DISEÑO X-X	0.4991
PISO 06	D6	SISMO DE DISEÑO X-X	0.4145
PISO 05	D5	SISMO DE DISEÑO X-X	0.3277
PISO 04	D4	SISMO DE DISEÑO X-X	0.2393
PISO 03	D3	SISMO DE DISEÑO X-X	0.1547
PISO 02	D2	SISMO DE DISEÑO X-X	0.081
PISO 01	D1	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0288

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 13. *Desplazamientos en entrepiso en Y-Y con respecto a sismo de diseño.*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UY (cm)
PISO 08	D8	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.573
PISO 07	D7	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.4856
PISO 06	D6	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.3962
PISO 05	D5	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.3064
PISO 04	D4	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.2182
PISO 03	D3	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.1369
PISO 02	D2	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0692
PISO 01	D1	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0231

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.1.8 Derivas máximas

Conforme con la norma E 0.30, las derivas máximas (drift) para una edificación de MDL corresponde a 0.005, es decir 5 ‰, como resultado de multiplicar por R la distorsión obtenida como la división entre la variación de desplazamientos por sismo de diseño entre dos pisos adyacentes y la altura de piso. El modelo debe, previo al modelamiento del mecanismo de aislación, haber cumplido con los indicadores para el análisis modal espectral, de fuerza cortante mínima y derivas máximas. En la próxima tabla se exponen las distorsiones de entrepiso máximas resultantes en el inmueble no aislado:

Tabla 14. *Derivas máximas debido a sismo de diseño en dirección X-X*

Piso	Caso de carga	Drift * R * 10 <sup>3</sup>
Piso 8	SISMO DIN X-X Max	1.90
Piso 7	SISMO DIN X-X Max	2.03
Piso 6	SISMO DIN X-X Max	<b>2.10</b>
Piso 5	SISMO DIN X-X Max	2.08
Piso 4	SISMO DIN X-X Max	1.94
Piso 3	SISMO DIN X-X Max	1.66
Piso 2	SISMO DIN X-X Max	1.15
Piso 1	SISMO DIN X-X Max	0.61

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. *Derivas máximas debido a sismo de diseño en dirección Y-Y*

Piso	Caso de carga	Drift * R * 10 <sup>3</sup>
Piso 8	SISMO DIN Y-Y Max	2.29
Piso 7	SISMO DIN Y-Y Max	2.40
Piso 6	SISMO DIN Y-Y Max	<b>2.43</b>
Piso 5	SISMO DIN Y-Y Max	2.36
Piso 4	SISMO DIN Y-Y Max	2.15
Piso 3	SISMO DIN Y-Y Max	1.79
Piso 2	SISMO DIN Y-Y Max	1.20
Piso 1	SISMO DIN Y-Y Max	0.61

Fuente: Elaboración propia

La deriva máxima en la dirección X-X corresponde a 2.10 ‰, mientras que la deriva máxima en la dirección Y-Y corresponde a 2.43 ‰, inferior al valor límite máximo, para un sismo de diseño escalado conforme con la cortante mínima por análisis modal espectral. Con estos indicadores, es posible decir que el proyecto se encuentra disponible para la ingeniería del modelamiento aislado.



#### **4.1.2. Modelamiento y análisis del sistema aislado**

Para el modelamiento del sistema aislado, se han seguido las indicaciones y parámetros de la Norma E 0.31 para aislamiento sísmico.

Para la estructura con aislamiento serán evaluados dos situaciones de sismo: con sismo máximo considerado según las consideraciones de la E. 031 y sismo de diseño de la E. 030. Para el sismo máximo considerado se mostrarán los cálculos alcanzados para el método dinámico modal-espectral y el método de análisis tiempo-historia con 7 pares de registros compatibles, con lo cual se comprueba la validez del mecanismo de aislación al cumplir con los respectivos parámetros de la E 0.31.

##### **4.1.2.1 Sismo máximo considerado**

Es definido como 1.5 veces el sismo de diseño de la E 0.30, se define numéricamente:

$$S_{aM} = 1.5 Z.C.S.g$$

*Ecuación 37.* Espectro de aceleraciones según SMC

A continuación, se muestra el espectro para un sismo máximo considerado en la zona Z4 y tipo de suelo S1. Cabe mencionar que el SMC tuvo que ser escalado con un factor de 1.16 para estar conforme con el requisito de cortante mínima indicada en la normativa.

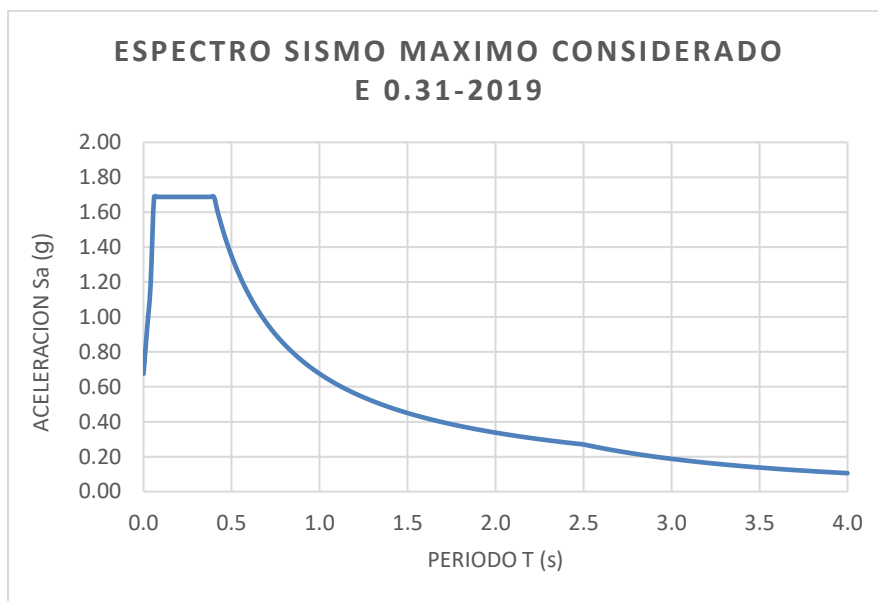


Figura 58. Espectro de respuesta para sismo máximo considerado en  $Z_4$  y  $S_1$  en términos de g

#### 4.1.2.2 Pre-dimensionado nivel de base

Previo a la revisión del modelo fue necesario un pre-dimensionamiento de las partes que se adicionan en la edificación como mecanismo aislante, que son: la losa maciza, las vigas perimetrales y exteriores, y los capiteles. Se cumplió con las dimensiones mínimas mencionadas en la norma de aislamiento (1.50 metros desde el nivel de piso hasta el fondo de losa del nivel de base).

El nivel de base fue predimensionado para estar en capacidad de resistir el peso de la estructura superior, transmitir las cargas eficientemente por las losas a las vigas, y de las vigas a los capiteles, las cuales serían las encargadas de transmitir las cargas directamente a los aisladores.

A continuación, se presenta una figura en planta con la morfología del elemento horizontal, las vigas perimetrales, vigas internas, capiteles y aisladores según tipo, identificándose hasta 3 tipos de aisladores que variaron según la carga última aplicada.

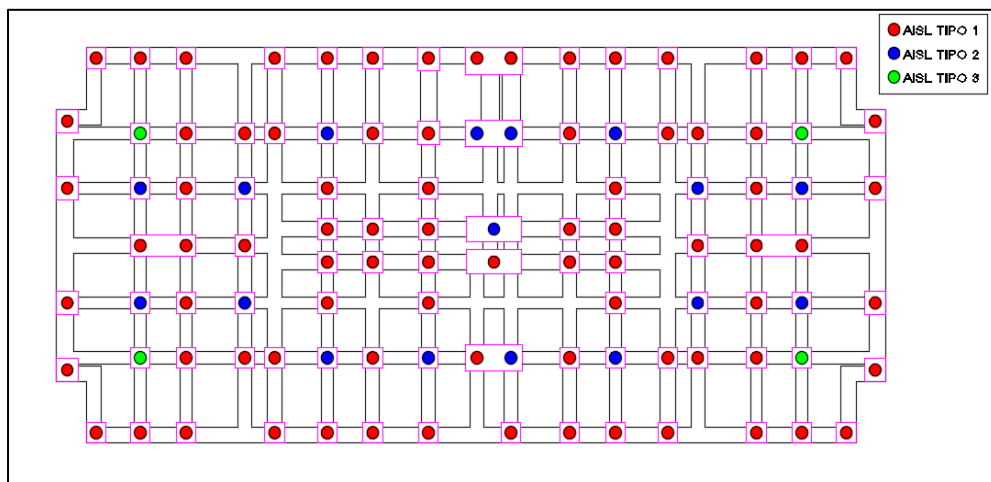


Figura 59. Predimensionado nivel de base proyecto Techo Propio

#### 4.1.2.3 Pre-diseño de aisladores con núcleo de plomo

En función a la carga actuante y los desplazamientos totales fue necesario elegir hasta 3 tipos diferentes de aisladores elastoméricos, sobre todo por la consideración de carga última axial. Vale recalcar que todas las unidades de aislación para el nivel de base son aisladores del tipo elastoméricos con núcleo de plomo. Esta clasificación si bien respeta la misma altura, cantidad de capas de caucho y número de capas de acero, se diferencia en el diámetro externo y el diámetro del núcleo de plomo. Para la corroboración de carga última sobre los aisladores se utilizó la combinación de carga 1.4 CM + 1.7 CV, considerando el peso del nivel de base.

Así mismo, se realizó un proceso constante de iteración para determinar un número de aisladores que a su vez soportaran la carga última axial que recaía sobre cada uno y cumplieran con la sollicitación del periodo objetivo que era buscado, el cual para esta investigación se definió en 1.5.

Al final del proceso se han definido 103 aisladores con núcleo de plomo, con una altura total de 18.8 cm, de los cuales 10 cm corresponden a capas de goma de 0.5 cm.

Una vez seleccionados los 3 tipos de aisladores, se procedió a calcularlas según el periodo objetivo, el amortiguamiento efectivo y el desplazamiento total deseado. Se utilizarán las ecuaciones señaladas en la sección 2.3.2. de esta investigación. A continuación se muestra el proceso de cálculo para cada una.

### Aislador tipo I ( $D_o = 40.5$ cm; $D_i = 7$ cm)

Se calculan las propiedades del sistema de aislación:

$$A_{lead} = \pi * \frac{D_i^2}{4} = \pi * \frac{7^2}{4} = 38.4845 \text{ cm}^2$$

$$A = \pi * \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{4} = \pi * \frac{(40.5^2 - 7^2)}{4} = 1249.7648 \text{ cm}^2$$

$$Q_d = A_{lead} * G_{lead} * N = 38.48 * 85 * 103 = 336931.89 \text{ kg}$$

$$k_p = \left( \frac{G * A}{T_r} \right) * N = \left( \frac{5.95 * 1249.76}{10} \right) * 103 = 76591.8375 \text{ kg/cm}$$

$$F_y = Q_d + k_p * y = 336931.89 + 76591.84 * 2.5 = 528411.4787 \text{ kg/cm}^2$$

$$k_{eff} = Q_d + k_p * q = 336931.89 + 76591.84 * 20 = 93438.4317 \text{ kg/cm}$$

$$W_D = 4 * Q_d * (q - y) = 4 * 336931.89 * (20 - 2.5) = 23585231.96 \text{ kg.cm}$$

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2 * \pi * k_{eff} * q^2} = \frac{23585231.96}{2 * \pi * 93438.43 * 20^2} = 10.04\%$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{P}{k_{eff} * g}} = 2\pi * \sqrt{\frac{4264801.13}{93438.43 * 981}} = 1.36 \text{ s}$$

$$C_{cr} = 2 * \sqrt{\frac{P * k_{eff}}{g}} = 2 * \sqrt{\frac{4264801.13 * 93438.43}{981}} = 40309.52 \text{ kg.s/cm}$$

$$C_M = C_{cr} * \beta_{eff} = 4048.39 \text{ kg.s/cm}$$

Se calcula las propiedades de una unidad de aislación:

$$k_{eff} = \frac{93438.43}{N} * 0.1 = 90.72 \text{ tn/m}$$

$$C_{eff} = \frac{C_M}{N} = \frac{4048.39}{103} = 39.30 \frac{\text{kg.s}}{\text{cm}} = 3.93 \text{ tn.s/m}$$

**Aislador tipo II (Do = 45.5 cm; Di = 8.5 cm)**

Se calculan las propiedades del sistema de aislación:

$$A_{lead} = \pi * \frac{D_i^2}{4} = \pi * \frac{8.5^2}{4} = 56.7450 \text{ cm}^2$$

$$A = \pi * \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{4} = \pi * \frac{(45.5^2 - 8.5^2)}{4} = 1569.2255 \text{ cm}^2$$

$$Q_d = A_{lead} * G_{lead} * N = 56.75 * 85 * 103 = 496802.63 \text{ kg}$$

$$k_p = \left( \frac{G * A}{T_r} \right) * N = \left( \frac{5.95 * 1569.23}{10} \right) * 103 = 96169.9866 \text{ kg/cm}$$

$$F_y = Q_d + k_p * y = 496802.63 + 96169.99 * 2.5 = 737227.5931 \text{ kg/cm}^2$$

$$k_{eff} = Q_d + k_p * q = 496802.63 + 96169.99 * 20 = 121010.1180 \text{ kg/cm}$$

$$W_D = 4 * Q_d * (q - y) = 4 * 496802.63 * (20 - 2.5) = 34776183.86 \text{ kg.cm}$$

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2 * \pi * k_{eff} * q^2} = \frac{34776183.86}{2 * \pi * 121010.12 * 20^2} = 11.43\%$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{P}{k_{eff} * g}} = 2\pi * \sqrt{\frac{4264801.13}{121010.12 * 981}} = 1.19 \text{ s}$$

$$C_{cr} = 2 * \sqrt{\frac{P * k_{eff}}{g}} = 2 * \sqrt{\frac{4264801.13 * 121010.12}{981}} = 45872.85 \text{ kg.s/cm}$$

$$C_M = C_{cr} * \beta_{eff} = 5245.37 \text{ kg.s/cm}$$

Se calcula las propiedades de una unidad de aislación:

$$k_{eff} = \frac{121010.12}{N} * 0.1 = 117.49 \text{ tn/m}$$

$$C_{eff} = \frac{C_M}{N} = \frac{5245.37}{103} = 50.93 \frac{kg.s}{cm} = 5.09 \text{ tn.s/m}$$

**Aislador tipo III (Do = 52 cm; Di = 9 cm)**

Se calculan las propiedades del sistema de aislación:

$$A_{lead} = \pi * \frac{D_i^2}{4} = \pi * \frac{9^2}{4} = 63.6173 \text{ cm}^2$$

$$A = \pi * \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{4} = \pi * \frac{(52^2 - 9^2)}{4} = 2060.0994 \text{ cm}^2$$

$$Q_d = A_{lead} * G_{lead} * N = 63.62 * 85 * 103 = 556969.03 \text{ kg}$$

$$k_p = \left( \frac{G * A}{T_r} \right) * N = \left( \frac{5.95 * 2060.10}{10} \right) * 103 = 126253.1907 \text{ kg/cm}$$

$$F_y = Q_d + k_p * y = 556969.03 + 126253.19 * 2.5 = 872602.0112 \text{ kg/cm}^2$$

$$k_{eff} = Q_d + k_p * q = 556969.03 + 126253.19 * 20 = 154101.6424 \text{ kg/cm}$$

$$W_D = 4 * Q_d * (q - y) = 4 * 556969.03 * (20 - 2.5) = 38987832.42 \text{ kg.cm}$$

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2 * \pi * k_{eff} * q^2} = \frac{38987832.42}{2 * \pi * 154101.64 * 20^2} = 10.07\%$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{P}{k_{eff} * g}} = 2\pi * \sqrt{\frac{4264801.13}{154101.64 * 981}} = 1.06 \text{ s}$$

$$C_{cr} = 2 * \sqrt{\frac{P * k_{eff}}{g}} = 2 * \sqrt{\frac{4264801.13 * 154101.64}{981}} = 51766.47 \text{ kg.s/cm}$$

$$C_M = C_{cr} * \beta_{eff} = 5211.11 \text{ kg.s/cm}$$

Se calcula las propiedades de una unidad de aislación:

$$k_{eff} = \frac{154101.64}{N} * 0.1 = 149.61 \text{ tn/m}$$

$$C_{eff} = \frac{C_M}{N} = \frac{5211.11}{103} = 50.59 \frac{kg.s}{cm} = 5.06 \text{ tn.s/m}$$

De esta definición de aisladores, es posible graficar el diagrama de histéresis para cada uno:

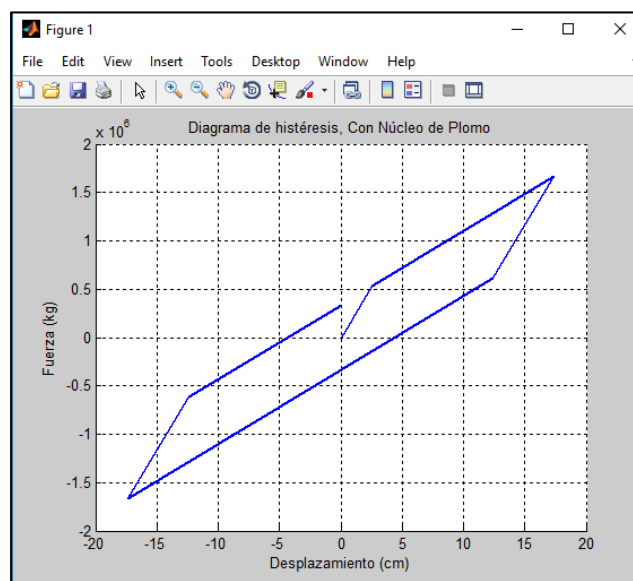


Figura 60. Diagrama de histéresis aislador tipo 1

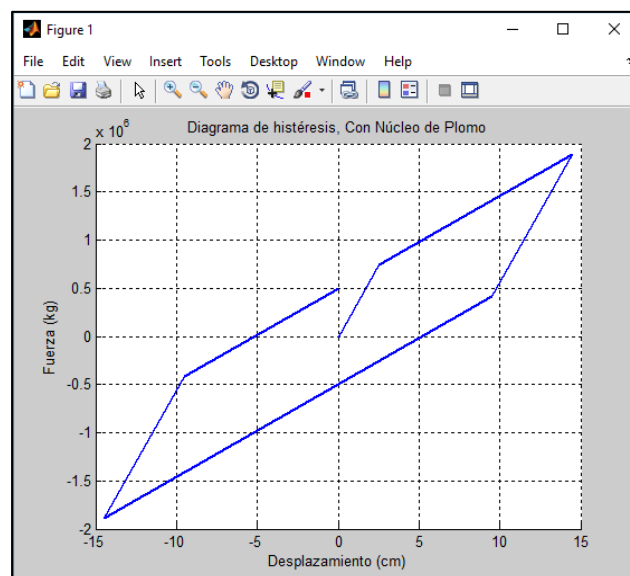


Figura 61. Diagrama de histéresis aislador tipo 2

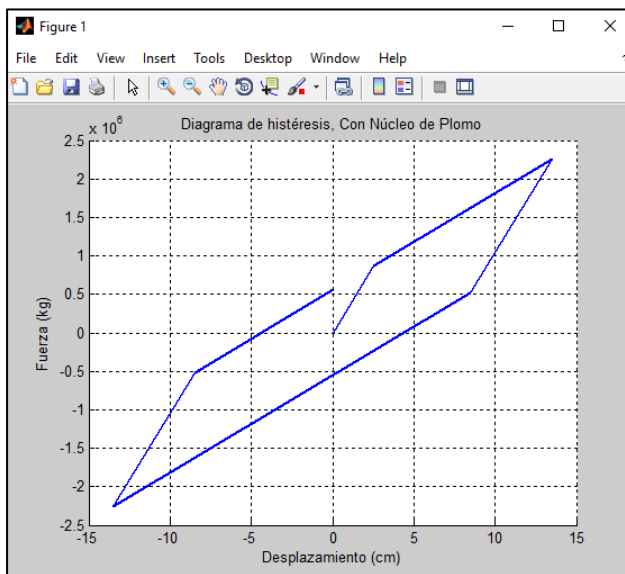


Figura 62. Diagrama de histéresis aislador tipo 3

A continuación, se expone una tabla con los tipos de aisladores logrados con el pre diseño y sus respectivas propiedades para el análisis final:

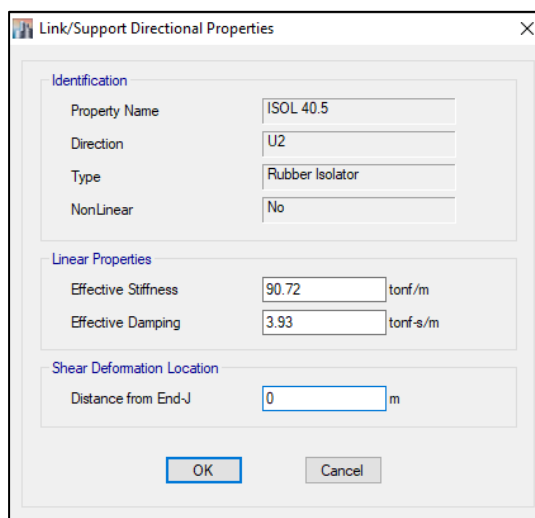
Tabla 16. Tipos de aisladores y propiedades

Aislador	Do	Di	k eff (t/m)	$\beta_{eff}$	C <sub>eff</sub>
<b>TIPO 1</b>	40.50	7.00	90.72	10.04%	3.93
<b>TIPO 2</b>	45.50	8.50	117.49	11.43%	5.09
<b>TIPO 3</b>	52.00	9.00	149.61	10.07%	5.06

Fuente: Elaboración propia

Ya con esta tabla, y modeladas las unidades de aislación en el software de cálculo, se introducen los coeficientes para cada tipo de aislador según las figuras a continuación:



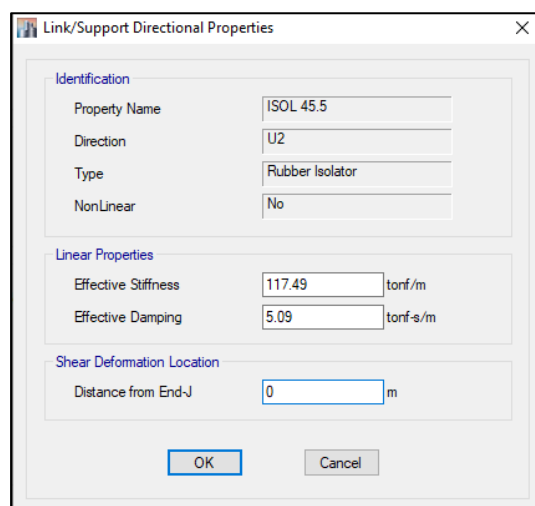


Identification	
Property Name	ISOL 40.5
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	No

Linear Properties	
Effective Stiffness	90.72 tonf/m
Effective Damping	3.93 tonf-s/m

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0 m

Figura 63. Definición de aislador Tipo I en ETABS V15

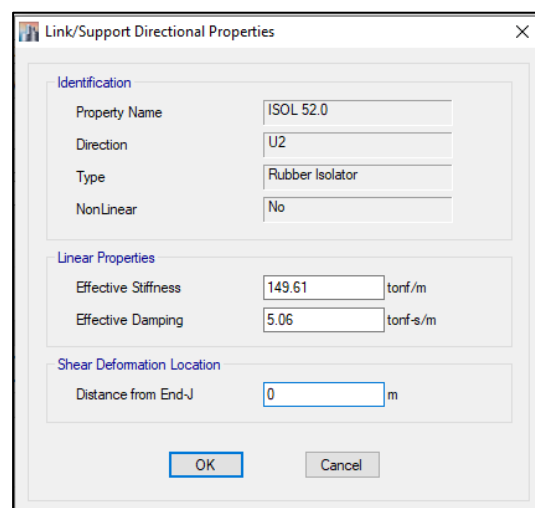


Identification	
Property Name	ISOL 45.5
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	No

Linear Properties	
Effective Stiffness	117.49 tonf/m
Effective Damping	5.09 tonf-s/m

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0 m

Figura 64. Definición de aislador Tipo II en ETABS V15



Identification	
Property Name	ISOL 52.0
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	No

Linear Properties	
Effective Stiffness	149.61 tonf/m
Effective Damping	5.06 tonf-s/m

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0 m

Figura 65. Definición de aislador Tipo III en ETABS V15

El periodo objetivo alcanzado de la estructura aislada como conjunto con los 103 aisladores será verificado en la siguiente sección trabajando con el SMC.

#### **4.1.2.4 Desempeño sísmico con respecto a SMC**

Una vez obtenido una propuesta que se adapte a las solicitaciones mencionadas, se procedió a calcular el modelo con el sismo máximo considerado. Una corroboración posterior en el diseño del hormigón reforzado con el máximo efecto sísmico debido al análisis tiempo-historia fue necesario para todo el nivel de base, permitiendo obtener las dimensiones finales de esta estructura.

Conforme con la norma de aislamiento, fue necesario que el inmueble con mecanismo aislante cumpla con los requerimientos de cortante mínima, desplazamiento máximo, desplazamientos mínimos y máximos en aisladores, y derivas máximas.

Vale tener en cuenta que, conforme con la normativa peruana de aisladores, de acuerdo a las cualidades del modelo estructural es necesario que los requerimientos en los indicadores de la estructura sean evaluados con un análisis tiempo-historia, estos análisis deben realizarse con señales sísmicas compatibles con el SMC, así que se revisó el modelo con esta carga previamente.

##### **4.1.2.4.1 Periodo Natural**

El modelo de 08 niveles sin aislamiento, el cual se demuestra que cumple con E 0.30, posee un periodo fundamental de 0.24 segundos, importante evidencia de gran rigidez como sistema estructural, para luego obtener un periodo de 1.3 segundos con el sistema de aisladores propuesto, es decir, se quintuplicó.

Si bien se recomienda que el periodo objetivo para una estructura aislada alcance los 2 segundos, se consideró 1.5 como periodo objetivo por cuestiones de economía en el diseño. Sin embargo, el periodo indicado es suficiente para considerar que la

estructura, con un  $T_P$  de 0.4 segundos, salió del rango de periodos muy cortos en el espectro de pseudoaceleraciones, lo que evidencia además resultados favorables en la reducción de fuerzas y desplazamientos.

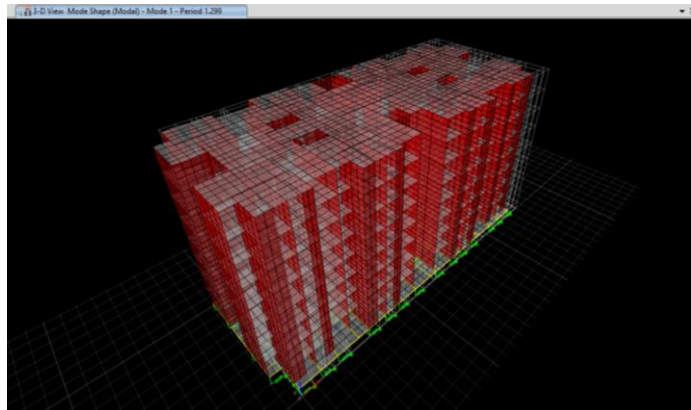
Tabla 17. *Periodo natural para estructura aislada*

<b>Caso</b>	<b>Modo</b>	<b>Periodo seg</b>
Modal	1	1.299
Modal	2	1.297
Modal	3	1.228
Modal	4	0.176
Modal	5	0.163
Modal	6	0.16
Modal	7	0.055
Modal	8	0.052
Modal	9	0.048
Modal	10	0.032
Modal	11	0.031
Modal	12	0.029

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

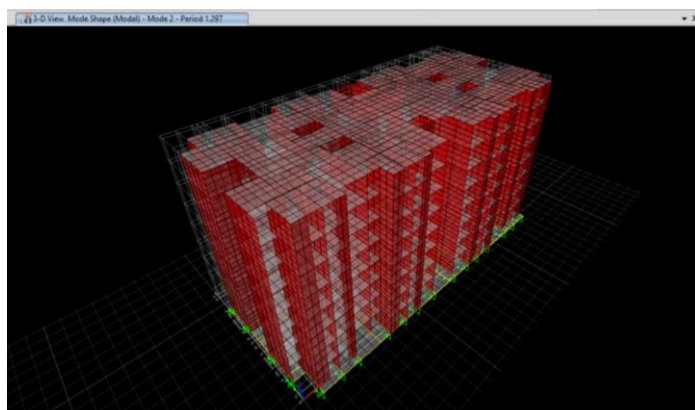
#### 4.1.2.4.2 Modos de vibración

**1° Modo de vibración:**  $T_1 = 1.299$  seg. , muestra desplazamiento en X-X.



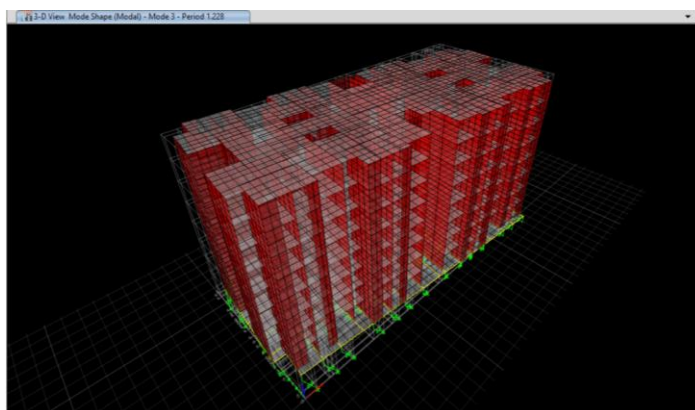
*Figura 66.* Primer modo de vibración con aislamiento

**2° Modo de vibración:**  $T_2 = 1.297$  seg. , muestra desplazamiento en Y-Y.



*Figura 67.* Segundo modo de vibración con aislamiento

**3° Modo de vibración:**  $T_3 = 1.228$  seg. , muestra rotación en Z-Z.



*Figura 68.* Tercer modo de vibración con aislamiento

#### 4.1.2.4.3 Cortante mínima

Para el requerimiento de cortante mínima, este se definió como el 90% del valor de  $V_b$ , obtenido del producto de la rigidez efectiva del sistema y el desplazamiento máximo, de 1642.02 toneladas. La señal sísmica del espectro para un SMC tuvo que ser escalado en 1.18 en ambas direcciones, para lo cual se obtuvo una fuerza cortante de 1677.49 toneladas en X-X y 1682.83 en Y-Y.

Tabla 18. *Cortante mínima de estructura aislada con respecto a SMC*

<b>Caso de carga</b>	<b>FX tonf</b>	<b>FY tonf</b>	<b><math>V_{bmin}</math></b>	<b>Resultado</b>
SMC X-X Max	1,677.49	504.91	1,642.02	OK!
SMC Y-Y Max	503.31	1,682.83	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.4.4 Desplazamientos de piso

En el caso del desplazamiento máximo de la estructura, este fue calculado en 0.2002 m, siendo el desplazamiento de piso 0.1692 m en el nivel 08 para la dirección X-X, y 0.1691 m en el nivel 08 para la dirección Y-Y

Tabla 19. *Desplazamientos en X-X para estructura aislada con respecto a SMC*

<b>PISO</b>	<b>DIAFRAGMA</b>	<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>UX m</b>	<b>U<sub>max</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
PISO 08	D8	SMC X-X Max	0.1692	0.2002	OK!
PISO 07	D7	SMC X-X Max	0.1682	0.2002	OK!
PISO 06	D6	SMC X-X Max	0.1671	0.2002	OK!
PISO 05	D5	SMC X-X Max	0.1659	0.2002	OK!
PISO 04	D4	SMC X-X Max	0.1647	0.2002	OK!
PISO 03	D3	SMC X-X Max	0.1635	0.2002	OK!
PISO 02	D2	SMC X-X Max	0.1623	0.2002	OK!
PISO 01	D1	SMC X-X Max	0.1614	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

 Tabla 20. *Desplazamientos en Y-Y para estructura aislada con respecto a SMC*

<b>PISO</b>	<b>DIAFRAGMA</b>	<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>UY m</b>	<b>U<sub>max</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
PISO 08	D8	SMC Y-Y Max	0.1691	0.2002	OK!
PISO 07	D7	SMC Y-Y Max	0.1680	0.2002	OK!
PISO 06	D6	SMC Y-Y Max	0.1669	0.2002	OK!
PISO 05	D5	SMC Y-Y Max	0.1657	0.2002	OK!
PISO 04	D4	SMC Y-Y Max	0.1646	0.2002	OK!
PISO 03	D3	SMC Y-Y Max	0.1635	0.2002	OK!
PISO 02	D2	SMC Y-Y Max	0.1625	0.2002	OK!
PISO 01	D1	SMC Y-Y Max	0.1617	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.4.5 Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores

Para el requerimiento de desplazamientos mínimos y máximos en aisladores, el límite de desplazamiento máximo fue de 0.2002 m, mientras que el límite de desplazamiento mínimo fue de 0.1602 m. De esta forma, para el SMC en dirección X-X se calculó en 0.1727 m como desplazamiento máximo y 0.1603 m como desplazamiento mínimo, y para el SMC en dirección Y-Y se alcanzó el valor de 0.1944 m como desplazamiento máximo y 0.1624 m como desplazamiento mínimo.

Tabla 21. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores para SMC en X-X*

CASO DE CARGA/COMBO	U m	U <sub>LIMITE</sub> m	RESULTADO
SMC X-X Max	0.1727	0.2002	OK!
SMC X-X Min	0.1603	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 22. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores para SMC en Y-Y*

CASO DE CARGA/COMBO	U m	U <sub>LIMITE</sub> m	RESULTADO
SMC Y-Y Max	0.1944	0.2002	OK!
SMC Y-Y Min	0.1624	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.4.6 Derivas máximas

Para el requerimiento de derivas máximas, en el caso del análisis modal-espectral se solicita una deriva máxima de 3.5%. Para el SMC en dirección X-X, la deriva máxima se encuentra en el 04 y 05 con un valor de 0.6%, mientras que en la dirección Y-Y la deriva máxima se presenta en el nivel 05 con un valor de 0.69%.

Tabla 23. *Derivas máximas en estructura aislada para SMC en X-X*

Story	Load Case/Combo	Item	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	SMC X-X Max	Max Drift X	0.51	OK!
PISO 07	SMC X-X Max	Max Drift X	0.54	OK!
PISO 06	SMC X-X Max	Max Drift X	0.58	OK!
PISO 05	SMC X-X Max	Max Drift X	0.60	OK!
PISO 04	SMC X-X Max	Max Drift X	0.60	OK!
PISO 03	SMC X-X Max	Max Drift X	0.56	OK!
PISO 02	SMC X-X Max	Max Drift X	0.44	OK!
PISO 01	SMC X-X Max	Max Drift X	0.35	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 24. *Derivas máximas en estructura aislada para SMC en Y-Y*

Story	Load Case/Combo	Item	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.63	OK!
PISO 07	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.66	OK!
PISO 06	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.68	OK!
PISO 05	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.69	OK!
PISO 04	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.66	OK!
PISO 03	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.59	OK!
PISO 02	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.45	OK!
PISO 01	SMC Y-Y Max	Max Drift Y	0.30	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15



#### **4.1.2.5 Desempeño sísmico con respecto a Análisis Tiempo-Historia**

La estructura con aislamiento, acorde a las características que posee y según la norma técnica de aislamiento sísmico, requiere ser corroborado con un análisis tiempo-historia consistente en 7 pares de señales sísmicas compatibles con el SMC. Para este objeto fueron seleccionados y procesados las señales sísmicas de Ancash 1970, Arequipa 2001, Lima 1966, Lima 1974, Moyobamba 2005, Pisco 2007 y el reciente evento sucedido en Lagunas 2019.

El requerimiento de la norma es que, para todos los pares de señales, se cumpla las condiciones de cortante mínima, desplazamiento máximo de piso, desplazamientos máximos y mínimos en aisladores y derivas máximas.

##### **4.1.2.5.1 Cortante mínima**

Para la cortante mínima, esta es la misma que para el caso del análisis modal-espectral: 1642.02 toneladas. Para la señal de Ancash 1970, la cortante mínima es de 1703.10 toneladas. Para la señal de Arequipa 2001, la cortante mínima es de 1700.76 toneladas. Para la señal de Lagunas 2019, la cortante tiene un valor de 1658.19 toneladas. Para el caso de Lima 1966, la cortante mínima es de 1690.32 toneladas. Para el caso de Lima 1974, el valor es de 1886.52 toneladas. Para el caso de Moyobamba 2005, la cortante mínima es de 1770.96 toneladas, y para la señal de Pisco 2007, el valor de la cortante mínima es de 1647.02 toneladas. Todos los valores de cortante se encuentran por encima del parámetro de cortante mínimo definido por el análisis modal espectral.

Tabla 25. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Ancash 1970

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>bmin</sub>	Resultado
ANCASH 1970 Max	1,239.74	1,167.73	1,703.10	1,642.02	OK!
ANCASH 1970 Min	- 1,217.57	- 1,246.86	1,742.73	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 26. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Arequipa 2001

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>bmin</sub>	Resultado
AREQUIPA 2001 Max	1,121.42	1,278.67	1,700.76	1,642.02	OK!
AREQUIPA 2001 Min	- 1,343.42	- 1,273.01	1,850.76	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 27. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Lagunas 2019

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>bmin</sub>	Resultado
LAGUNAS 2019 Max	1,349.84	1,326.63	1,892.62	1,642.02	OK!
LAGUNAS 2019 Min	- 1,198.82	- 1,145.60	1,658.19	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 28. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1966

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>bmin</sub>	Resultado
LIMA 1966 Max	1,058.33	1,317.99	1,690.32	1,642.02	OK!
LIMA 1966 Min	- 1,058.69	- 1,348.72	1,714.61	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 29. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1974

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>b</sub> <sub>min</sub>	Resultado
LIMA 1974 Max	1,418.89	1,243.26	1,886.52	1,642.02	OK!
LIMA 1974 Min	- 1,136.54	- 1,512.22	1,891.70	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 30. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Moyobamba 2005

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>b</sub> <sub>min</sub>	Resultado
MOYOBAMBA 2005 Max	1,254.14	1,250.38	1,770.96	1,642.02	OK!
MOYOBAMBA 2005 Min	- 1,384.22	- 1,300.31	1,899.18	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 31. Cortante en estructura aislada según Análisis TH con registro Pisco 2007

Caso de carga	FX tonf	FY tonf	F <sub>RESULTANTE</sub> tonf	V <sub>b</sub> <sub>min</sub>	Resultado
PISCO 2007 Max	1,358.02	931.91	1,647.02	1,642.02	OK!
PISCO 2007 Min	- 1,449.22	- 1,084.05	1,809.81	1,642.02	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.5.2 Desplazamientos de piso

Para el requerimiento de desplazamiento máximo de piso, este se encuentra en la señal de Moyobamba 2005 con un valor de 0.1911 m y ubicado en el nivel 08. Frente al desplazamiento máximo con un valor de 0.2002 m, puede afirmarse que este requisito esta conforma para todas las situaciones de análisis tiempo-historia.

Tabla 32. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Ancash 1970*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	U <sub>max</sub> m	RESULTADO
PISO 08	D8	ANCASH 1970 Max	0.1228	0.1253	0.1754	0.2002	OK!
PISO 07	D7	ANCASH 1970 Max	0.1220	0.1245	0.1744	0.2002	OK!
PISO 06	D6	ANCASH 1970 Max	0.1213	0.1237	0.1732	0.2002	OK!
PISO 05	D5	ANCASH 1970 Max	0.1204	0.1228	0.1720	0.2002	OK!
PISO 04	D4	ANCASH 1970 Max	0.1195	0.1220	0.1708	0.2002	OK!
PISO 03	D3	ANCASH 1970 Max	0.1186	0.1211	0.1695	0.2002	OK!
PISO 02	D2	ANCASH 1970 Max	0.1178	0.1204	0.1684	0.2002	OK!
PISO 01	D1	ANCASH 1970 Max	0.1171	0.1198	0.1675	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 33. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Ancash 1970*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	U <sub>max</sub> m	RESULTADO
PISO 08	D8	ANCASH 1970 Min	- 0.1250	- 0.1173	0.1714	0.2002	OK!
PISO 07	D7	ANCASH 1970 Min	- 0.1242	- 0.1165	0.1704	0.2002	OK!
PISO 06	D6	ANCASH 1970 Min	- 0.1234	- 0.1158	0.1692	0.2002	OK!
PISO 05	D5	ANCASH 1970 Min	- 0.1226	- 0.1150	0.1681	0.2002	OK!
PISO 04	D4	ANCASH 1970 Min	- 0.1217	- 0.1142	0.1669	0.2002	OK!
PISO 03	D3	ANCASH 1970 Min	- 0.1208	- 0.1134	0.1657	0.2002	OK!
PISO 02	D2	ANCASH 1970 Min	- 0.1199	- 0.1127	0.1646	0.2002	OK!
PISO 01	D1	ANCASH 1970 Min	- 0.1192	- 0.1122	0.1637	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 34. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Arequipa 2001*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	AREQUIPA 2001 Max	0.1354	0.1279	0.1863	0.2002	OK!
PISO 07	D7	AREQUIPA 2001 Max	0.1346	0.1271	0.1851	0.2002	OK!
PISO 06	D6	AREQUIPA 2001 Max	0.1337	0.1263	0.1839	0.2002	OK!
PISO 05	D5	AREQUIPA 2001 Max	0.1328	0.1254	0.1826	0.2002	OK!
PISO 04	D4	AREQUIPA 2001 Max	0.1318	0.1245	0.1813	0.2002	OK!
PISO 03	D3	AREQUIPA 2001 Max	0.1309	0.1237	0.1800	0.2002	OK!
PISO 02	D2	AREQUIPA 2001 Max	0.1299	0.1229	0.1788	0.2002	OK!
PISO 01	D1	AREQUIPA 2001 Max	0.1292	0.1223	0.1779	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 35. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Arequipa 2001*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1131	- 0.1284	0.1711	0.2002	OK!
PISO 07	D7	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1124	- 0.1276	0.1700	0.2002	OK!
PISO 06	D6	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1117	- 0.1268	0.1689	0.2002	OK!
PISO 05	D5	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1109	- 0.1259	0.1678	0.2002	OK!
PISO 04	D4	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1101	- 0.1250	0.1666	0.2002	OK!
PISO 03	D3	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1092	- 0.1242	0.1654	0.2002	OK!
PISO 02	D2	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1085	- 0.1234	0.1643	0.2002	OK!
PISO 01	D1	AREQUIPA 2001 Min	- 0.1079	- 0.1228	0.1635	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 36. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lagunas 2019*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	LAGUNAS 2019 Max	0.1209	0.1151	0.1669	0.2002	OK!
PISO 07	D7	LAGUNAS 2019 Max	0.1202	0.1143	0.1659	0.2002	OK!
PISO 06	D6	LAGUNAS 2019 Max	0.1194	0.1136	0.1648	0.2002	OK!
PISO 05	D5	LAGUNAS 2019 Max	0.1185	0.1128	0.1636	0.2002	OK!
PISO 04	D4	LAGUNAS 2019 Max	0.1177	0.1120	0.1625	0.2002	OK!
PISO 03	D3	LAGUNAS 2019 Max	0.1168	0.1113	0.1613	0.2002	OK!
PISO 02	D2	LAGUNAS 2019 Max	0.1160	0.1106	0.1602	0.2002	OK!
PISO 01	D1	LAGUNAS 2019 Max	0.1153	0.1100	0.1594	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 37. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lagunas 2019*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1361	- 0.1333	0.1905	0.2002	OK!
PISO 07	D7	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1353	- 0.1324	0.1893	0.2002	OK!
PISO 06	D6	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1344	- 0.1316	0.1881	0.2002	OK!
PISO 05	D5	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1334	- 0.1307	0.1868	0.2002	OK!
PISO 04	D4	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1325	- 0.1297	0.1854	0.2002	OK!
PISO 03	D3	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1315	- 0.1289	0.1841	0.2002	OK!
PISO 02	D2	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1306	- 0.1281	0.1829	0.2002	OK!
PISO 01	D1	LAGUNAS 2019 Min	- 0.1298	- 0.1274	0.1819	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 38. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1966*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	U <sub>RESULTANTE</sub> m	U <sub>max</sub> m	RESULTADO
PISO 08	D8	LIMA 1966 Max	0.1067	0.1355	0.1724	0.2002	OK!
PISO 07	D7	LIMA 1966 Max	0.1060	0.1346	0.1714	0.2002	OK!
PISO 06	D6	LIMA 1966 Max	0.1054	0.1337	0.1703	0.2002	OK!
PISO 05	D5	LIMA 1966 Max	0.1046	0.1328	0.1691	0.2002	OK!
PISO 04	D4	LIMA 1966 Max	0.1039	0.1319	0.1679	0.2002	OK!
PISO 03	D3	LIMA 1966 Max	0.1031	0.1310	0.1667	0.2002	OK!
PISO 02	D2	LIMA 1966 Max	0.1024	0.1302	0.1656	0.2002	OK!
PISO 01	D1	LIMA 1966 Max	0.1018	0.1296	0.1648	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 39. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1966*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	U <sub>RESULTANTE</sub> m	U <sub>max</sub> m	RESULTADO
PISO 08	D8	LIMA 1966 Min	- 0.1067	- 0.1324	0.1700	0.2002	OK!
PISO 07	D7	LIMA 1966 Min	- 0.1060	- 0.1316	0.1690	0.2002	OK!
PISO 06	D6	LIMA 1966 Min	- 0.1053	- 0.1307	0.1679	0.2002	OK!
PISO 05	D5	LIMA 1966 Min	- 0.1046	- 0.1298	0.1667	0.2002	OK!
PISO 04	D4	LIMA 1966 Min	- 0.1039	- 0.1289	0.1655	0.2002	OK!
PISO 03	D3	LIMA 1966 Min	- 0.1031	- 0.1280	0.1644	0.2002	OK!
PISO 02	D2	LIMA 1966 Min	- 0.1024	- 0.1272	0.1633	0.2002	OK!
PISO 01	D1	LIMA 1966 Min	-0.1018	- 0.1266	0.1625	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 40. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1974*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	LIMA 1974 Max	0.1148	0.1518	0.1903	0.2002	OK!
PISO 07	D7	LIMA 1974 Max	0.1141	0.1509	0.1892	0.2002	OK!
PISO 06	D6	LIMA 1974 Max	0.1133	0.1499	0.1879	0.2002	OK!
PISO 05	D5	LIMA 1974 Max	0.1125	0.1489	0.1866	0.2002	OK!
PISO 04	D4	LIMA 1974 Max	0.1116	0.1478	0.1853	0.2002	OK!
PISO 03	D3	LIMA 1974 Max	0.1108	0.1469	0.1839	0.2002	OK!
PISO 02	D2	LIMA 1974 Max	0.1100	0.1460	0.1827	0.2002	OK!
PISO 01	D1	LIMA 1974 Max	0.1093	0.1453	0.1818	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 41. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Lima 1974*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	LIMA 1974 Min	- 0.1432	- 0.1250	0.1901	0.2002	OK!
PISO 07	D7	LIMA 1974 Min	- 0.1423	- 0.1242	0.1889	0.2002	OK!
PISO 06	D6	LIMA 1974 Min	- 0.1414	- 0.1234	0.1877	0.2002	OK!
PISO 05	D5	LIMA 1974 Min	- 0.1404	- 0.1225	0.1863	0.2002	OK!
PISO 04	D4	LIMA 1974 Min	- 0.1393	- 0.1216	0.1849	0.2002	OK!
PISO 03	D3	LIMA 1974 Min	- 0.1383	- 0.1208	0.1836	0.2002	OK!
PISO 02	D2	LIMA 1974 Min	- 0.1373	- 0.1200	0.1823	0.2002	OK!
PISO 01	D1	LIMA 1974 Min	- 0.1365	- 0.1194	0.1814	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15



Tabla 42. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Moyobamba 2005*

PISO	DIAFRAG- MA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1395	0.1307	0.1911	0.2002	OK!
PISO 07	D7	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1387	0.1298	0.1900	0.2002	OK!
PISO 06	D6	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1378	0.1290	0.1887	0.2002	OK!
PISO 05	D5	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1368	0.1281	0.1874	0.2002	OK!
PISO 04	D4	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1358	0.1272	0.1861	0.2002	OK!
PISO 03	D3	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1348	0.1263	0.1847	0.2002	OK!
PISO 02	D2	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1339	0.1255	0.1835	0.2002	OK!
PISO 01	D1	MOYOBAMBA 2005 Max	0.1331	0.1249	0.1826	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 43. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Moyobamba 2005*

PISO	DIAFRAG- MA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	Umax m	RESULTADO
PISO 08	D8	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1264	- 0.1257	0.1783	0.2002	OK!
PISO 07	D7	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1257	- 0.1249	0.1772	0.2002	OK!
PISO 06	D6	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1249	- 0.1240	0.1760	0.2002	OK!
PISO 05	D5	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1240	- 0.1232	0.1748	0.2002	OK!
PISO 04	D4	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1231	- 0.1223	0.1735	0.2002	OK!
PISO 03	D3	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1222	- 0.1215	0.1723	0.2002	OK!
PISO 02	D2	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1213	- 0.1207	0.1711	0.2002	OK!
PISO 01	D1	MOYOBAMBA 2005 Min	- 0.1206	- 0.1201	0.1702	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 44. *Desplazamiento máximo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Pisco 2007*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	U <sub>max</sub> m	RESULTADO
PISO 08	D8	PISCO 2007 Max	0.1458	0.1089	0.1820	0.2002	OK!
PISO 07	D7	PISCO 2007 Max	0.1450	0.1082	0.1809	0.2002	OK!
PISO 06	D6	PISCO 2007 Max	0.1441	0.1075	0.1798	0.2002	OK!
PISO 05	D5	PISCO 2007 Max	0.1431	0.1068	0.1786	0.2002	OK!
PISO 04	D4	PISCO 2007 Max	0.1421	0.1060	0.1773	0.2002	OK!
PISO 03	D3	PISCO 2007 Max	0.1411	0.1053	0.1761	0.2002	OK!
PISO 02	D2	PISCO 2007 Max	0.1401	0.1046	0.1749	0.2002	OK!
PISO 01	D1	PISCO 2007 Max	0.1394	0.1041	0.1740	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 45. *Desplazamiento mínimo de piso en estructura aislada según Análisis TH con registro Pisco 2007*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX m	UY m	URESULTANTE m	U <sub>max</sub> m	RESULTADO
PISO 08	D8	PISCO 2007 Min	- 0.1372	- 0.0936	0.1661	0.2002	OK!
PISO 07	D7	PISCO 2007 Min	- 0.1364	- 0.0930	0.1651	0.2002	OK!
PISO 06	D6	PISCO 2007 Min	- 0.1354	- 0.0924	0.1639	0.2002	OK!
PISO 05	D5	PISCO 2007 Min	- 0.1344	- 0.0918	0.1628	0.2002	OK!
PISO 04	D4	PISCO 2007 Min	- 0.1334	- 0.0911	0.1616	0.2002	OK!
PISO 03	D3	PISCO 2007 Min	- 0.1324	- 0.0905	0.1603	0.2002	OK!
PISO 02	D2	PISCO 2007 Min	- 0.1314	- 0.0900	0.1592	0.2002	OK!
PISO 01	D1	PISCO 2007 Min	- 0.1306	- 0.0895	0.1584	0.2002	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.5.3 Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores

Para el requerimiento de desplazamientos máximos y mínimos en aisladores, el desplazamiento mínimo se encuentra en la señal de Lima 1974, con un valor cercano al requerimiento mínimo de 0.1602 m. En esta misma señal se registra el desplazamiento máximo de un aislador con 0.1999 m, siendo el valor máximo permisible 0.2002 m.

Tabla 46. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Ancash 1970*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
ANCASH 1970 U <sub>Max</sub>	0.1687	0.2002	OK!
ANCASH 1970 U <sub>Min</sub>	0.1609	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 47. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Arequipa 2001*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
AREQUIPA 2001 U <sub>Max</sub>	0.1781	0.2002	OK!
AREQUIPA 2001 U <sub>Min</sub>	0.1615	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 48. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Lagunas 2019*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
LAGUNAS 2019 U <sub>Max</sub>	0.1719	0.2002	OK!
LAGUNAS 2019 U <sub>Min</sub>	0.1687	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 49. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Lima 1966*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
LIMA 1966 U <sub>Max</sub>	0.1649	0.2002	OK!
LIMA 1966 U <sub>Min</sub>	0.1613	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

 Tabla 50. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Lima 1974*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
LIMA 1974 U <sub>Max</sub>	0.1999	0.2002	OK!
LIMA 1974 U <sub>Min</sub>	0.1602	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

 Tabla 51. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Moyobamba 2005*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
MOYOBAMBA 2005 U <sub>Max</sub>	0.1795	0.2002	OK!
MOYOBAMBA 2005 U <sub>Min</sub>	0.1723	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

 Tabla 52. *Desplazamientos máximos y mínimos en aisladores con registro Pisco 2007*

<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>U m</b>	<b>U<sub>LIMITE</sub> m</b>	<b>RESULTADO</b>
PISCO 2007 U <sub>Max</sub>	0.1666	0.2002	OK!
PISCO 2007 U <sub>Min</sub>	0.1647	0.1602	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.5.4 Derivas máximas

Para el requerimiento de derivas máximas, este tiene un valor de 5‰ para el caso de análisis dinámico tiempo-historia. La deriva máxima se encuentra en la señal de Moyobamba 2005, en el quinto nivel, con un valor de 0.60‰, comprobándose para que el caso de todas las señales se cumple con no superar la deriva máxima.

Tabla 53. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Ancash 1970*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	ANCASH 1970 Max	0.000331	0.000359	0.49	OK!
PISO 07	ANCASH 1970 Max	0.000357	0.000377	0.52	OK!
PISO 06	ANCASH 1970 Max	0.000382	0.000391	0.55	OK!
PISO 05	ANCASH 1970 Max	0.000398	0.000394	0.56	OK!
PISO 04	ANCASH 1970 Max	0.000397	0.000381	0.55	OK!
PISO 03	ANCASH 1970 Max	0.000371	0.000341	0.50	OK!
PISO 02	ANCASH 1970 Max	0.000295	0.000263	0.40	OK!
PISO 01	ANCASH 1970 Max	0.000239	0.000196	0.31	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 54. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Ancash 1970*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	ANCASH 1970 Min	0.000331	0.00034	0.47	OK!
PISO 07	ANCASH 1970 Min	0.000358	0.000357	0.51	OK!
PISO 06	ANCASH 1970 Min	0.000383	0.00037	0.53	OK!
PISO 05	ANCASH 1970 Min	0.0004	0.000373	0.55	OK!
PISO 04	ANCASH 1970 Min	0.0004	0.000359	0.54	OK!
PISO 03	ANCASH 1970 Min	0.000374	0.000321	0.49	OK!
PISO 02	ANCASH 1970 Min	0.000299	0.000247	0.39	OK!
PISO 01	ANCASH 1970 Min	0.000243	0.000182	0.30	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 55. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Arequipa 2001*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	AREQUIPA 2001 Max	0.000362	0.000363	0.51	OK!
PISO 07	AREQUIPA 2001 Max	0.00039	0.00038	0.54	OK!
PISO 06	AREQUIPA 2001 Max	0.000417	0.000393	0.57	OK!
PISO 05	AREQUIPA 2001 Max	0.000435	0.000396	0.59	OK!
PISO 04	AREQUIPA 2001 Max	0.000435	0.000382	0.58	OK!
PISO 03	AREQUIPA 2001 Max	0.000406	0.000342	0.53	OK!
PISO 02	AREQUIPA 2001 Max	0.000323	0.000263	0.42	OK!
PISO 01	AREQUIPA 2001 Max	0.000262	0.000191	0.32	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 56. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Arequipa 2001*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	AREQUIPA 2001 Min	0.000307	0.000351	0.47	OK!
PISO 07	AREQUIPA 2001 Min	0.000331	0.000368	0.49	OK!
PISO 06	AREQUIPA 2001 Min	0.000354	0.000381	0.52	OK!
PISO 05	AREQUIPA 2001 Min	0.000368	0.000384	0.53	OK!
PISO 04	AREQUIPA 2001 Min	0.000368	0.000371	0.52	OK!
PISO 03	AREQUIPA 2001 Min	0.000343	0.000334	0.48	OK!
PISO 02	AREQUIPA 2001 Min	0.000272	0.000258	0.37	OK!
PISO 01	AREQUIPA 2001 Min	0.00022	0.000189	0.29	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 57. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Lagunas 2019*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	LAGUNAS 2019 Max	0.000326	0.000331	0.46	OK!
PISO 07	LAGUNAS 2019 Max	0.000352	0.000347	0.49	OK!
PISO 06	LAGUNAS 2019 Max	0.000376	0.000358	0.52	OK!
PISO 05	LAGUNAS 2019 Max	0.000392	0.000361	0.53	OK!
PISO 04	LAGUNAS 2019 Max	0.000392	0.000347	0.52	OK!
PISO 03	LAGUNAS 2019 Max	0.000366	0.00031	0.48	OK!
PISO 02	LAGUNAS 2019 Max	0.000291	0.000238	0.38	OK!
PISO 01	LAGUNAS 2019 Max	0.000236	0.000174	0.29	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 58. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Lagunas 2019*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	LAGUNAS 2019 Min	0.000365	0.000368	0.52	OK!
PISO 07	LAGUNAS 2019 Min	0.000395	0.000386	0.55	OK!
PISO 06	LAGUNAS 2019 Min	0.000422	0.0004	0.58	OK!
PISO 05	LAGUNAS 2019 Min	0.000439	0.000403	0.60	OK!
PISO 04	LAGUNAS 2019 Min	0.00044	0.000389	0.59	OK!
PISO 03	LAGUNAS 2019 Min	0.00041	0.000349	0.54	OK!
PISO 02	LAGUNAS 2019 Min	0.000326	0.000269	0.42	OK!
PISO 01	LAGUNAS 2019 Min	0.000264	0.000196	0.33	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 59. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Lima 1966*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	LIMA 1966 Max	0.000285	0.000379	0.47	OK!
PISO 07	LIMA 1966 Max	0.000308	0.000398	0.50	OK!
PISO 06	LIMA 1966 Max	0.00033	0.000412	0.53	OK!
PISO 05	LIMA 1966 Max	0.000343	0.000415	0.54	OK!
PISO 04	LIMA 1966 Max	0.000343	0.0004	0.53	OK!
PISO 03	LIMA 1966 Max	0.00032	0.000359	0.48	OK!
PISO 02	LIMA 1966 Max	0.000255	0.000276	0.38	OK!
PISO 01	LIMA 1966 Max	0.000207	0.000201	0.29	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 60. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Lima 1966*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	LIMA 1966 Min	0.000283	0.000375	0.47	OK!
PISO 07	LIMA 1966 Min	0.000305	0.000393	0.50	OK!
PISO 06	LIMA 1966 Min	0.000327	0.000407	0.52	OK!
PISO 05	LIMA 1966 Min	0.00034	0.000409	0.53	OK!
PISO 04	LIMA 1966 Min	0.000341	0.000394	0.52	OK!
PISO 03	LIMA 1966 Min	0.000319	0.000353	0.48	OK!
PISO 02	LIMA 1966 Min	0.000254	0.000271	0.37	OK!
PISO 01	LIMA 1966 Min	0.000206	0.000197	0.29	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15



Tabla 61. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Lima 1974*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	LIMA 1974 Max	0.00032	0.00043	0.54	OK!
PISO 07	LIMA 1974 Max	0.000346	0.000451	0.57	OK!
PISO 06	LIMA 1974 Max	0.000369	0.000466	0.59	OK!
PISO 05	LIMA 1974 Max	0.000384	0.000469	0.61	OK!
PISO 04	LIMA 1974 Max	0.000382	0.000452	0.59	OK!
PISO 03	LIMA 1974 Max	0.000355	0.000405	0.54	OK!
PISO 02	LIMA 1974 Max	0.000281	0.000311	0.42	OK!
PISO 01	LIMA 1974 Max	0.000227	0.000225	0.32	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 62. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Lima 1974*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	LIMA 1974 Min	0.000394	0.000351	0.53	OK!
PISO 07	LIMA 1974 Min	0.000426	0.000368	0.56	OK!
PISO 06	LIMA 1974 Min	0.000454	0.000381	0.59	OK!
PISO 05	LIMA 1974 Min	0.000473	0.000384	0.61	OK!
PISO 04	LIMA 1974 Min	0.000472	0.000371	0.60	OK!
PISO 03	LIMA 1974 Min	0.000439	0.000332	0.55	OK!
PISO 02	LIMA 1974 Min	0.000348	0.000256	0.43	OK!
PISO 01	LIMA 1974 Min	0.000281	0.000187	0.34	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 63. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Moyobamba 2005*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000371	0.000392	0.54	OK!
PISO 07	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000401	0.000411	0.57	OK!
PISO 06	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000428	0.000424	0.60	OK!
PISO 05	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000446	0.000425	0.62	OK!
PISO 04	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000446	0.000408	0.60	OK!
PISO 03	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000417	0.000363	0.55	OK!
PISO 02	MOYOBAMBA 2005 Max	0.000332	0.000277	0.43	OK!
PISO 01	MOYOBAMBA 2005 Max	0.00027	0.000205	0.34	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 64. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Moyobamba 2005*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000339	0.000354	0.49	OK!
PISO 07	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000366	0.000371	0.52	OK!
PISO 06	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000391	0.000385	0.55	OK!
PISO 05	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000408	0.000388	0.56	OK!
PISO 04	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000408	0.000375	0.55	OK!
PISO 03	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000381	0.000336	0.51	OK!
PISO 02	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000303	0.000259	0.40	OK!
PISO 01	MOYOBAMBA 2005 Min	0.000245	0.00019	0.31	OK!

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 65. *Derivas máximas con desplazamientos máximos en estructura aislada según registro TH Pisco 2007*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	PISCO 2007 Max	0.000398	0.000313	0.51	OK!
PISO 07	PISCO 2007 Max	0.00043	0.000328	0.54	OK!
PISO 06	PISCO 2007 Max	0.000459	0.000339	0.57	OK!
PISO 05	PISCO 2007 Max	0.000476	0.000341	0.59	OK!
PISO 04	PISCO 2007 Max	0.000475	0.000328	0.58	OK!
PISO 03	PISCO 2007 Max	0.000441	0.000293	0.53	OK!
PISO 02	PISCO 2007 Max	0.000349	0.000225	0.42	OK!
PISO 01	PISCO 2007 Max	0.000281	0.000164	0.33	OK!

**Fuente:** Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 66. *Derivas máximas con desplazamientos mínimos en estructura aislada según registro TH Pisco 2007*

Story	Load Case/Combo	Max Drift X	Max Drift Y	Drift*10 <sup>3</sup>	RESULTADO
PISO 08	PISCO 2007 Min	0.000384	0.000256	0.46	OK!
PISO 07	PISCO 2007 Min	0.000415	0.000269	0.49	OK!
PISO 06	PISCO 2007 Min	0.000443	0.000279	0.52	OK!
PISO 05	PISCO 2007 Min	0.00046	0.000282	0.54	OK!
PISO 04	PISCO 2007 Min	0.000459	0.000273	0.53	OK!
PISO 03	PISCO 2007 Min	0.000426	0.000246	0.49	OK!
PISO 02	PISCO 2007 Min	0.000337	0.00019	0.39	OK!
PISO 01	PISCO 2007 Min	0.000271	0.000139	0.30	OK!

**Fuente:** Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.2.6 Nivel de base y cimentación del sistema aislado

Si bien los objetivos de esta investigación corresponden a evaluar la mejora del desempeño de la superestructura aislada, una breve explicación de la configuración del nivel de base y la cimentación asociada al modelo aislado es necesaria.

Tras el predimensionamiento del nivel de base, también denominado piso técnico, este ha sido corroborado para su diseño. A continuación se muestran un corte del nivel de base y su cimentación, es decir, la interfaz de aislamiento. En este esquema puede verificarse que la distancia entre la base de la losa del nivel de base y el NPT sobre la cimentación cumplen con la medida mínima de 1.50 m indicado en la E 031:

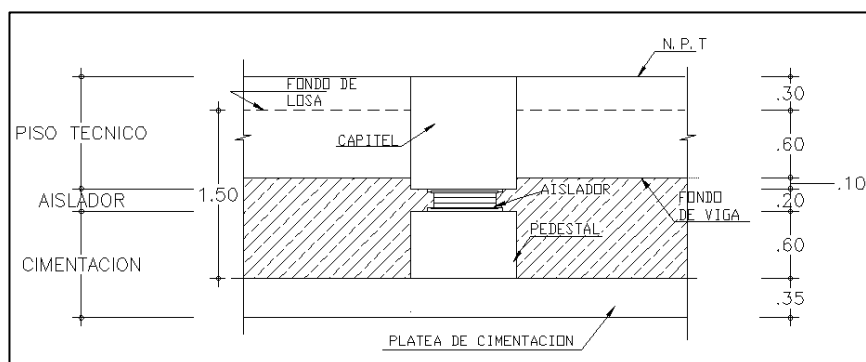


Figura 69. Modelo final de la interfaz de aislamiento

En la figura 59 se aprecia el esquema general de la distribución de los aisladores elastoméricos en sus 3 variantes, así como las vigas que redistribuyen la carga de la losa de transferencia a los respectivos capiteles, para llegar finalmente a las unidades de aislación. La losa de transferencia consta de una losa maciza en dos direcciones con acero de 1/2" @ 20 cm superior e inferior, y cuyos paños no superan los 2.50 m de luz libre. La mayoría de muros descansan sobre las vigas. A continuación se presenta un detalle de las vigas que sostienen la losa de transferencia. Una planta

indicando la ubicación de todos los cortes de cada viga así como detalles de encuentro muro-losa, muro-viga, viga-viga y viga-capitel pueden encontrarse en el anexo 07 de esta investigación:

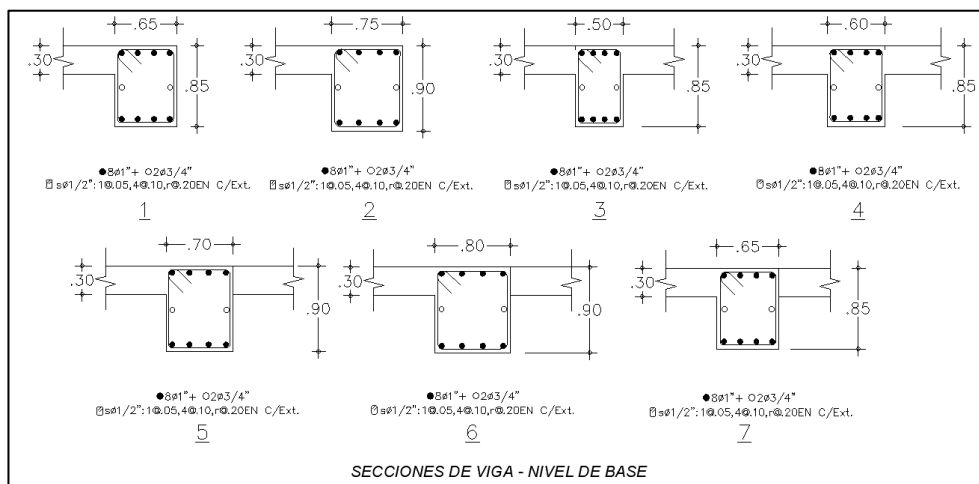


Figura 70. Secciones de vigas en nivel de base

Una vez que las cargas han sido transmitidas desde los capiteles hacia los aisladores, estos la distribuyen a los pedestales, cuya cimentación consiste en una platea de cimentación de 35 cm de espesor. Vale mencionar que la selección de una platea de cimentación corresponde al hecho de que los pedestales se encuentran relativamente cerca unos a otros, descartando la posibilidad de una cimentación por zapatas aisladas o conectadas. Así mismo, verificando la carga de servicio, la presión sobre el terreno aplicada sobre el terreno resulta del cociente entre 3987.51 toneladas sobre un área de 570.07 m<sup>2</sup>, obteniendo una presión aplicada de 0.70 kg/cm<sup>2</sup>, menor a la presión admisible del terreno indicado en el EMS de la zona de estudio.

La platea de cimentación posee un refuerzo de 5/8" @ 20 cm inferior y superior en ambas direcciones, y cuenta con una viga perimetral de 40x70. Algunos detalles de la cimentación son mostrados a continuación. Vale recalcar que una lámina de la

cimentación para el sistema aislado puede ubicarse en el anexo N° 07 de esta investigación:

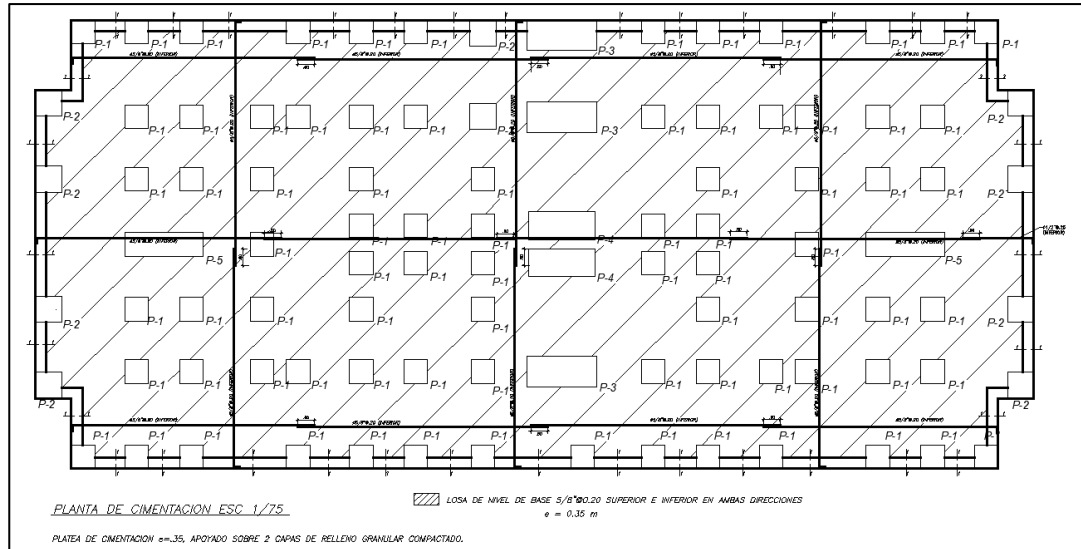


Figura 71. Planta de cimentación del sistema aislado

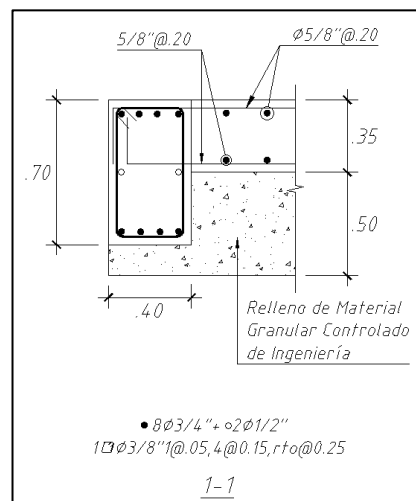


Figura 72. Viga de cimentación perimetral de sistema aislado

Finalmente se ha cumplido con las exigencias sismorresistentes de forma que se pueda aseverar la adecuada operación del mecanismo de aislamiento, pudiendo determinarse una comparación de la mejora en el desempeño entre el modelo de base fija y la versión aislada frente al sismo de diseño.

#### 4.1.3. Desempeño sísmico de la estructura aislada con respecto a sismo de diseño

Lo obtenido para la estructura aislada según sismo de diseño considera la necesidad de utilizar los mismos indicadores que serían aplicados a su versión fija, de manera que puedan ser comparables con la mejora del desempeño otorgada por los dispositivos de aislación. En adelante se exponen las cortantes, desplazamientos y derivas máximas para la versión con mecanismo de aislación sometida al sismo de diseño:

##### 4.1.3.1 Fuerzas por piso

Tabla 67. *Fuerzas de piso en X-X de estructura aislada con respecto a sismo de diseño*

<b>PISO</b>	<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>VX tonf</b>	<b>VY tonf</b>
PISO 08	SISMO DIN X-X Max	38.54	11.84
PISO 07	SISMO DIN X-X Max	77.52	23.75
PISO 06	SISMO DIN X-X Max	115.86	35.42
PISO 05	SISMO DIN X-X Max	153.58	46.85
PISO 04	SISMO DIN X-X Max	190.81	58.08
PISO 03	SISMO DIN X-X Max	227.47	69.11
PISO 02	SISMO DIN X-X Max	263.65	79.97
PISO 01	SISMO DIN X-X Max	299.46	90.72

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 68. *Fuerzas de piso en Y-Y de estructura aislada con respecto a sismo de diseño*

<b>PISO</b>	<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>VX tonf</b>	<b>VY tonf</b>
PISO 08	SISMO DIN Y-Y Max	11.83	38.54
PISO 07	SISMO DIN Y-Y Max	23.74	77.51
PISO 06	SISMO DIN Y-Y Max	35.40	115.86
PISO 05	SISMO DIN Y-Y Max	46.82	153.62
PISO 04	SISMO DIN Y-Y Max	58.05	190.88
PISO 03	SISMO DIN Y-Y Max	69.05	227.62
PISO 02	SISMO DIN Y-Y Max	79.88	263.94
PISO 01	SISMO DIN Y-Y Max	90.57	299.95

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.3.2 Desplazamientos

 Tabla 69. *Desplazamientos en X-X para estructura aislada con respecto a sismo de diseño.*

<b>PISO</b>	<b>DIAFRAGMA</b>	<b>CASO DE CARGA/COMBO</b>	<b>UX cm</b>
PISO 08	D8	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0370
PISO 07	D7	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0368
PISO 06	D6	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0365
PISO 05	D5	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0363
PISO 04	D4	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0360
PISO 03	D3	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0357
PISO 02	D2	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0355
PISO 01	D1	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0353

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15



Tabla 70. *Desplazamientos en Y-Y para estructura aislada con respecto a sismo de diseño.*

PISO	DIAFRAGMA	CASO DE CARGA/COMBO	UX cm
PISO 08	D8	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0369
PISO 07	D7	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0367
PISO 06	D6	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0365
PISO 05	D5	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0362
PISO 04	D4	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0359
PISO 03	D3	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0357
PISO 02	D2	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0355
PISO 01	D1	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0353

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

#### 4.1.3.3 Derivas máximas

Tabla 71. *Derivas máximas en X-X de estructura aislada con respecto a sismo de diseño*

Piso	Caso de carga	Drift*R*10 <sup>3</sup>
PISO 08	SISMO DIN X-X Max	0.456
PISO 07	SISMO DIN X-X Max	0.488
PISO 06	SISMO DIN X-X Max	0.520
PISO 05	SISMO DIN X-X Max	0.540
PISO 04	SISMO DIN X-X Max	0.536
PISO 03	SISMO DIN X-X Max	0.496
PISO 02	SISMO DIN X-X Max	0.392
PISO 01	SISMO DIN X-X Max	0.312

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

Tabla 72. *Derivas máximas en Y-Y de estructura aislada con respecto a sismo de diseño*

<b>Piso</b>	<b>Caso de carga</b>	<b>Drift*R*10<sup>3</sup></b>
PISO 08	SISMO DIN Y-Y Max	0.568
PISO 07	SISMO DIN Y-Y Max	0.596
PISO 06	SISMO DIN Y-Y Max	0.616
PISO 05	SISMO DIN Y-Y Max	0.620
PISO 04	SISMO DIN Y-Y Max	0.596
PISO 03	SISMO DIN Y-Y Max	0.532
PISO 02	SISMO DIN Y-Y Max	0.408
PISO 01	SISMO DIN Y-Y Max	0.272

Fuente: Elaboración propia. ETABS V15

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

### 5.1. Comparación del desempeño sísmico entre el sistema aislado y el sistema con aislamiento

#### 5.1.1. Cortante basal sísmica

Tabla 73. Cuadro comparativo cortante sísmica Sismo de diseño X-X en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento

PISO	CASO DE CARGA/COMBO	SIN AISLAMIENTO	CON AISLAMIENTO	$\Delta V_X$ %
		VX tonf	VX tonf	
PISO 08	SISMO DE DISEÑO X-X	206.90	38.54	81.37%
PISO 07	SISMO DE DISEÑO X-X	371.76	77.52	79.15%
PISO 06	SISMO DE DISEÑO X-X	495.76	115.86	76.63%
PISO 05	SISMO DE DISEÑO X-X	587.94	153.58	73.88%
PISO 04	SISMO DE DISEÑO X-X	670.31	190.81	71.53%
PISO 03	SISMO DE DISEÑO X-X	735.67	227.47	69.08%
PISO 02	SISMO DE DISEÑO X-X	779.44	263.65	66.17%
PISO 01	SISMO DE DISEÑO X-X	<b>806.84</b>	<b>299.46</b>	<b>62.88%</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 74. Cuadro comparativo cortante sísmica Sismo de diseño Y-Y en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento

PISO	CASO DE CARGA/COMBO	SIN AISLAMIENTO	CON AISLAMIENTO	$\Delta V_Y$ %
		VY tonf	VY tonf	
PISO 08	SISMO DE DISEÑO Y-Y	220.95	38.54	82.56%
PISO 07	SISMO DE DISEÑO Y-Y	395.53	77.51	80.40%
PISO 06	SISMO DE DISEÑO Y-Y	527.21	115.86	78.02%
PISO 05	SISMO DE DISEÑO Y-Y	621.41	153.62	75.28%
PISO 04	SISMO DE DISEÑO Y-Y	711.27	190.88	73.16%
PISO 03	SISMO DE DISEÑO Y-Y	776.76	227.62	70.70%
PISO 02	SISMO DE DISEÑO Y-Y	812.27	263.94	67.51%
PISO 01	SISMO DE DISEÑO Y-Y	<b>843.35</b>	<b>299.95</b>	<b>64.43%</b>

Fuente: Elaboración propia.

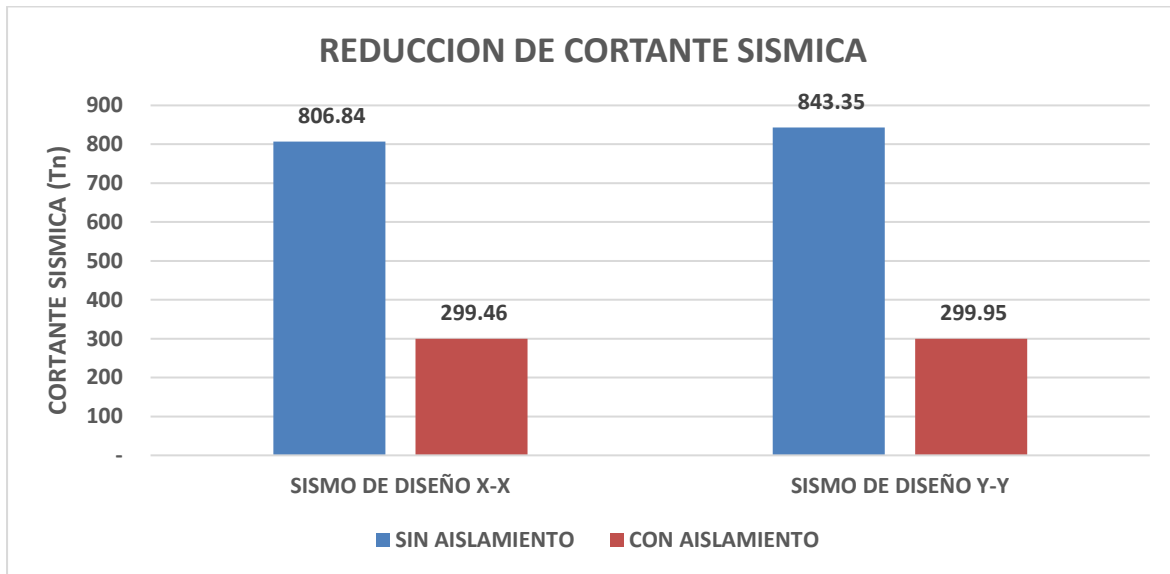


Figura 73. Reducción de cortante sísmica en estructura con aislamiento.

En cuanto al parámetro de cortante sísmica puede apreciarse, para la situación de la cortante basal con el sismo de diseño en la dirección X-X, una disminución del 62.88% de la cortante, mientras que para el último nivel se aprecia una reducción del 81.37%. Para la situación del sismo de diseño en la dirección Y-Y, se aprecia un decremento del 64.43% en la base, mientras que para el último nivel se obtiene una reducción del 82.56%.

### 5.1.2. Desplazamientos laterales del último nivel

Tabla 75. Cuadro comparativo desplazamiento con Sismo de diseño X-X en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento

PISO	CASO DE CARGA/COMBO	SIN AISLAMIENTO	CON AISLAMIENTO	$\Delta UX$ %
		UX cm	UX cm	
PISO 08	SISMO DE DISEÑO X-X	<b>0.5797</b>	<b>0.0370</b>	<b>93.62%</b>
PISO 07	SISMO DE DISEÑO X-X	0.4991	0.0368	92.63%
PISO 06	SISMO DE DISEÑO X-X	0.4145	0.0365	91.19%
PISO 05	SISMO DE DISEÑO X-X	0.3277	0.0363	88.93%
PISO 04	SISMO DE DISEÑO X-X	0.2393	0.0360	84.96%
PISO 03	SISMO DE DISEÑO X-X	0.1547	0.0357	76.90%
PISO 02	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0810	0.0355	56.19%
PISO 01	SISMO DE DISEÑO X-X	0.0288	0.0353	-22.52%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 76. Cuadro comparativo desplazamiento con Sismo de diseño Y-Y en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento

PISO	CASO DE CARGA/COMBO	SIN AISLAMIENTO	CON AISLAMIENTO	$\Delta UY$ %
		UY cm	UY cm	
PISO 08	SISMO DE DISEÑO Y-Y	<b>0.5730</b>	<b>0.0369</b>	<b>93.55%</b>
PISO 07	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.4856	0.0367	92.44%
PISO 06	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.3962	0.0365	90.80%
PISO 05	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.3064	0.0362	88.18%
PISO 04	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.2182	0.0359	83.53%
PISO 03	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.1369	0.0357	73.92%
PISO 02	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0692	0.0355	48.72%
PISO 01	SISMO DE DISEÑO Y-Y	0.0231	0.0353	-52.89%

Fuente: Elaboración propia.

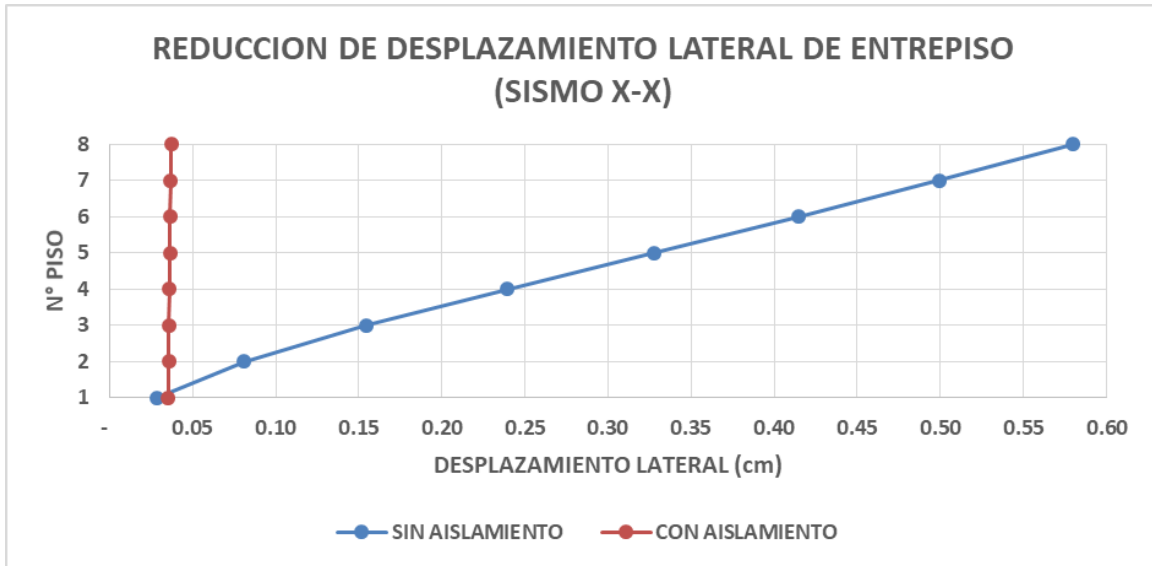


Figura 74. Reducción de desplazamiento lateral de entrepiso en estructura aislada con Sismo de diseño X-X

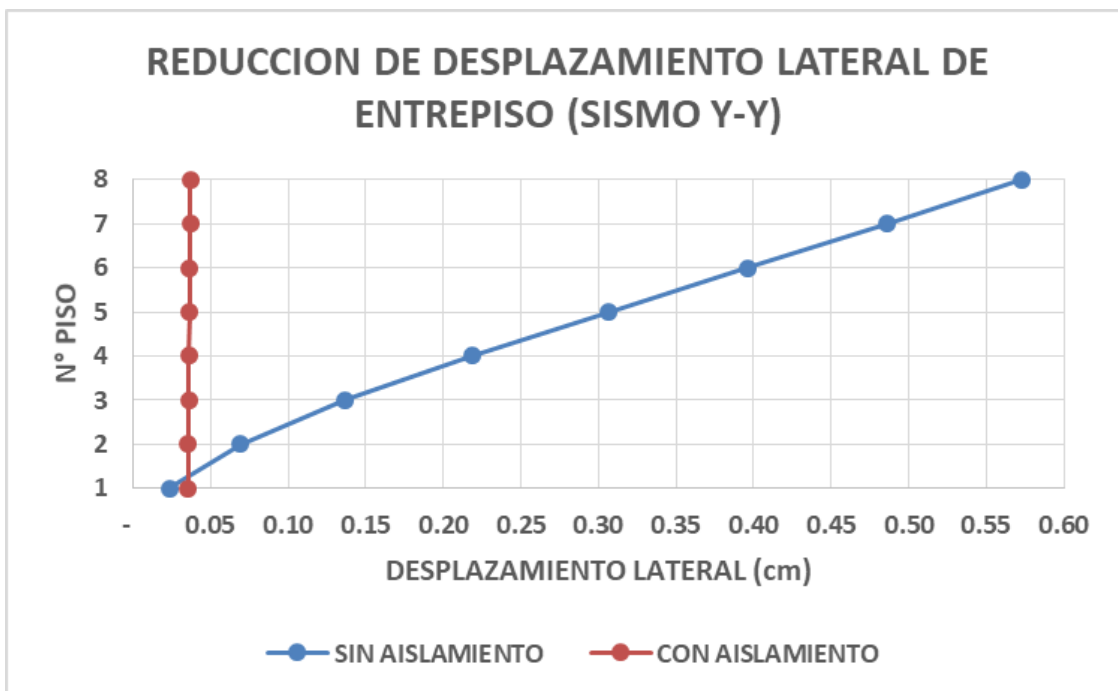


Figura 75. Reducción de desplazamiento lateral de entrepiso en estructura aislada con Sismo de diseño Y-Y

Para la situación de los desplazamientos, que son relativos a su base, para el sismo de diseño en dirección X-X se muestra un incremento del desplazamiento en el primer nivel de 22.52%, mientras que se visualiza un decremento del 93.62% en el último piso. Un caso similar sucede con el sismo de diseño en la dirección Y-Y, donde se visualiza un incremento del 52.89% en el piso uno, pero una disminución del 93.55% en el piso último. En general se aprecia una uniformización de los desplazamientos de piso con el sistema aislado, que es clave para la reducción de derivas.

### 5.1.3. Derivas máximas

Tabla 77. Cuadro comparativo derivas máximas con Sismo de diseño X-X en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento

PISO	CASO DE CARGA	SIN AISLAMIENTO	CON AISLAMIENTO	$\Delta$ drift %
		Drift*R*10 <sup>3</sup>	Drift*R*10 <sup>3</sup>	
Piso 8	SISMO DIN X-X Max	1.90	0.456	76.00%
Piso 7	SISMO DIN X-X Max	2.03	0.488	75.96%
Piso 6	SISMO DIN X-X Max	<b>2.10</b>	<b>0.520</b>	<b>75.24%</b>
Piso 5	SISMO DIN X-X Max	2.08	0.540	74.04%
Piso 4	SISMO DIN X-X Max	1.94	0.536	72.37%
Piso 3	SISMO DIN X-X Max	1.66	0.496	70.12%
Piso 2	SISMO DIN X-X Max	1.15	0.392	65.91%
Piso 1	SISMO DIN X-X Max	0.61	0.312	48.85%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 78. Cuadro comparativo derivas máximas con Sismo de diseño Y-Y en estructura sin aislamiento y estructura con aislamiento

PISO	CASO DE CARGA	SIN AISLAMIENTO	CON AISLAMIENTO	$\Delta$ drift %
		Drift*R*10 <sup>3</sup>	Drift*R*10 <sup>3</sup>	
Piso 8	SISMO DIN Y-Y Max	2.29	0.568	75.20%
Piso 7	SISMO DIN Y-Y Max	2.40	0.596	75.17%
Piso 6	SISMO DIN Y-Y Max	<b>2.43</b>	<b>0.616</b>	<b>74.65%</b>
Piso 5	SISMO DIN Y-Y Max	2.36	0.620	73.73%
Piso 4	SISMO DIN Y-Y Max	2.15	0.596	72.28%
Piso 3	SISMO DIN Y-Y Max	1.79	0.532	70.28%
Piso 2	SISMO DIN Y-Y Max	1.20	0.408	66.00%
Piso 1	SISMO DIN Y-Y Max	0.61	0.272	55.41%

Fuente: Elaboración propia.

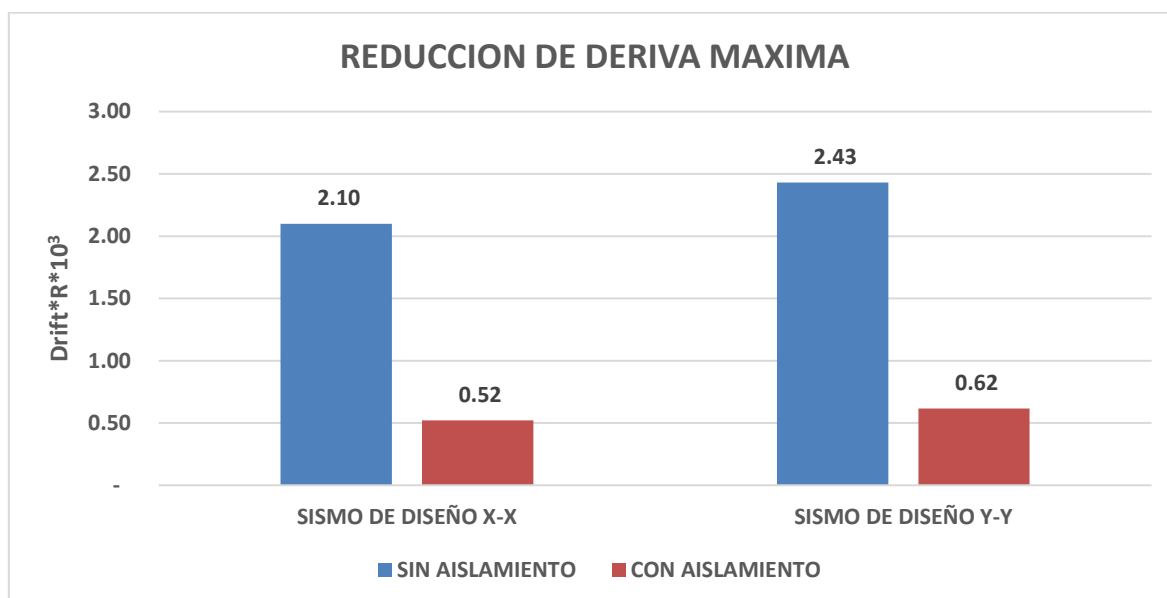


Figura 76. Reducción de deriva máxima de entrepiso en estructura aislada



Para la situación de las derivas máximas puede apreciarse, para el sismo de diseño en la dirección X-X, una reducción de la deriva en el primer entrepiso de 48.85%, mientras que en el último entrepiso se observa una reducción del 76%. La reducción en la deriva máxima alcanza el 75.24%. Para el caso del sismo en la dirección Y-Y, se aprecia una reducción del 55.4% en el primer entrepiso, mientras que en el último entrepiso la reducción alcanza un 75.20%. La reducción en la deriva máxima alcanza el 74.65%.

## CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

- El decremento de la cortante basal por la implementación de unidades de aislación elastoméricos LRB en la edificación residencial de MDL alcanza el 62.88% para la dirección X-X y 64.43% para la dirección Y-Y, esto como consecuencia de haber quintuplicado su periodo natural. Soriano (2014), en su sustentación de la “Comparación de la respuesta estructural del pabellón A de la Universidad Privada del Norte con aisladores sísmicos elastoméricos y sin aisladores sísmicos” demostró que un edificio educativo con sistema dual alcanzaba una reducción de hasta el 71% en la fuerza cortante basal. Meza (2015) por su parte en “Análisis y Diseño de un hospital con aisladores elastoméricos en el Perú” verificó que un inmueble del rubro de salud podía reducir la cortante basal hasta un 73.9%. Así mismo, Huanca y Meléndez (2016) en su tesis titulada: “Análisis Dinámico Modal Espectral de una Edificación Convencional y otra con Aisladores Sísmicos A nivel Intermedio de la Estructura en la Ciudad de Tacna”, determinaron que en una edificación de concreto armado de 5 niveles se alcanza una reducción del 54.86%. Partiendo de este último se planteó hipotéticamente que la reducción en las cortantes basales para el edificio con sistema de MDL podría alcanzar un orden del 60%. Teniendo en cuenta estos antecedentes, puede apreciarse que existen resultados similares más no exactos con respecto a proyectos de investigación anteriores, por lo que es posible afirmar que existe una mejora importante del desempeño sísmico en cuanto a reducción de fuerzas cortantes basales se refiere.

- El desplazamiento lateral en el último nivel de entrepiso alcanza una reducción del orden del 94%. Arriagada (2005) en su tesis “Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional)”, obtuvo una reducción del orden del 82-95% en sus desplazamientos laterales del último nivel, motivo por el cual se estimó una reducción del 90% en la para el modelo del edificio con MDL, por la

similitud de pisos en ambos modelos. El resultado de esta investigación ha sido favorable frente a la hipótesis y se acerca con gran precisión al resultado obtenido por el estudio realizado en Chile, dado los resultados similares más no exactos, por lo que se refuerza la afirmación de la mejora en el desempeño sísmico

- Las derivas máximas alcanzaron una reducción del orden del 75%. Soriano (2014) obtuvo para su modelo de edificio educativo una reducción del orden del 50%, valor que fue utilizado para sostener una hipotética reducción de derivas en el modelo de esta investigación. Así mismo, Meza (2015) en su modelo de hospital con base aislada obtuvo una reducción del orden de 86.9%. Huanca y Meléndez (2016) alcanzaron una reducción de 80.42% para su modelo de concreto armado, mientras que Leyton (2017) en su trabajo investigativo titulado “Implementación de aisladores sísmicos en un edificio de viviendas en Lima, Perú” alcanzó una reducción de derivas máximas del orden de 69.5%. Como puede revisarse, la reducción de derivas máximas para el modelo de esta investigación se encuentra por encima del mínimo determinado en los antecedentes, y se halla incluso por encima del valor promedio, que sería 71.7%, pudiéndose sobre ello aseverar que existen resultados similares a los obtenidos por modelos antecesores. De esta forma se demuestra la validez de todas las dimensiones que definen la mejora del desempeño sísmico en la estructura con muros de ductilidad limitada. Cabe resaltar que ninguno de los modelos comparados es del todo exacto al modelo de esta investigación, ya que ninguno es un edificio con el sistema estructural empleado en esta tesis. Específicamente, se han comparado los resultados de un EMDL de 08 niveles con edificaciones que poseen sistemas duales y aporticados, de diversos niveles y cuyo uso es por lo general de carácter hospitalario, educativo o financiero.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

- Se determinó que el sistema MDL utilizando aisladores sísmicos para el modelo Techo Propio del proyecto Ciudad Sol de Retablo alcanza una reducción del orden del 63-65% en la fuerza cortante basal, lo cual puede apreciarse numéricamente en la tablas 73 y 74 y gráficamente en la figura 73, ante lo cual, valiéndose de los resultados antecedentes para otros proyectos aislados, se asevera que la reducción de la fuerza cortante en el modelo aislado permite una mejora importante en el comportamiento sísmico para la estructura de MDL.

- De los cálculos realizados en el modelo MDL con base aislada se presenta un incremento del orden del 23-53% en los desplazamientos del primer piso, debido al efecto del desplazamiento del sistema aislado, pasando por una reducción de los desplazamientos a partir del segundo piso desde el orden del 49-56% hasta llegar al orden del 94% en el último piso, pudiendo apreciarse esto en las tablas 75 y 76 y en las figuras 74 y 75, lo cual es un indicador de la reducción en las derivas de entrepiso. La reducción del 94% del desplazamiento lateral en el último nivel permite contribuye a la conclusión de una mejora importante en el desempeño sísmico para la estructura.

- Así mismo se demostró que el sistema MDL utilizando aisladores sísmicos, según las tablas 77 y 78 alcanza una reducción del orden del 75% en las derivas máximas, el cual es mayor al 50% obtenido en el caso de un antecedente de modelos aislados, pudiéndose apreciar esto gráficamente en la figura 76 y reafirmando la mejora del desempeño sísmico.

- Se determinó, por tanto, gracias a todas las dimensiones de la variable independiente en estudio, que el edificio modelo Techo Propio de 8 pisos con sistema MDL utilizando aisladores presenta una mejora importante en su desempeño sísmico, teniendo en cuenta la mejora del desempeño en otras edificaciones aisladas, por lo que se concluye que la utilización de unidades de aislación en edificios con MDL representa una solución segura y viable para resolver el problema de la vulnerabilidad sísmica en edificios multifamiliares con este sistema estructural en el distrito de Comas, de manera que resulte en un beneficio para los propietarios de esta categoría de viviendas sociales.

## CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES

- Si bien se ha comprobado la mejora en el desempeño sísmico para un edificio con MDL de 8 niveles, sería recomendable verificar la cantidad de niveles en los que esta mejora del desempeño resulta favorable y por lo tanto definir las limitaciones para el uso de aisladores en este tipo de sistema estructural, esto considerando que en la actualidad se vienen construyendo edificios residenciales en Lima que van entre los 12 a 16 pisos utilizando un sistema mixto de muros estructurales y MDL.

- Una alternativa de propuestas con dispositivos HDR y péndulo de fricción es posible, pudiendo servir como un complemento a esta investigación, de manera que se verifiquen los aspectos ventajosos de cada alternativa.

Si bien otros estudios han realizado cálculos aproximados para determinar el presupuesto de reparación frente a un terremoto, basados en estudios analíticos previos, una extensión de estos análisis orientados a una comparación más refinada de los perjuicios probables en esta clase de edificaciones es necesaria.

- Se han descrito algunos criterios básicos para la utilización de mecanismos de aislación, en cuanto a proceso constructivo se refiere, sin embargo, se recomienda profundizar más en los detalles relacionados con el procedimiento y controles para la correcta ejecución en la instalación de las unidades de instalación, el cual todavía es un conocimiento poco difundido en el contexto actual de la construcción, por ser una tecnología todavía en proceso de expansión en el mercado. Esto contribuiría a un análisis más detallado de los costos directos de los mecanismos de aislamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2006). *“El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica”*. 6ª Edición. Editorial Episteme
- Arriagada Rosas, J. A. (2005). *“Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional)”*. (Tesis para título profesional). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Balestrini, M. (1997). *“Cómo se elabora el Proyecto de Investigación”*. 1º Edición. Editorial BL Consultores Asociados.
- Bertero, R., Bertero, V. (1992). *“Tall reinforced concrete building: Conceptual earthquake-resistance design methodology”*. Report No. UCB/EERC-92/16. EERC. University of California at Berkeley.USA.
- Bozzo, M. B. (2003). *“Losas Reticulares Mixtas”*. Barcelona: Reverté.
- Bozzo, M. B. (2010). *“Aislación sísmica y disipación de energía”*. Chile: Universidad de Chile.
- Delgado Ehni, R.J.; Rodríguez Larraín, C.P. (2006). *“Edificios Peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada”*. (Tesis para título profesional). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Hernandez Sampieri R., Fernandez C., Baptista F. (1998). *“Metodología de la Investigación”*. 2da edición. Editorial McGraw-Hill.
- Herrera Mena, M. T. (2018). *“Desempeño Sísmico en Edificaciones con Aisladores Elastoméricos y Amortiguadores de Fluido Viscoso”*. (Tesis para título profesional). Universidad de Piura, Piura, Perú.

- Huanca Chambilla, J. E.; Meléndez Limache, M. A. (2016) *“Análisis Dinámico Modal Espectral de una Edificación Convencional y otra con Aisladores Sísmicos A nivel Intermedio de la Estructura en la Ciudad de Tacna”*. (Tesis para título profesional). Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú.
- Instituto de la Construcción y Gerencia (2006). *“Reglamento Nacional de Edificaciones”*. Lima, Perú.
- Kelly, T. E., Robinson, W. H., & Skinner, R. I. (2008). *“Seismic isolation for designers and structural engineers”*. Kanpur: National Information Centre of Earthquake Engineering.
- Korswagen Eguren, P.A.; Arias Ricse, J.C.; Huaranga Huamaní, P.G. (2012). *“Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú”*. (Tesis para título profesional), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Kuroiwa Hirachi, J. (2005). *“Reducción de Desastres”*. (2ª Edición). Lima, Perú: Bruño.
- Lema Toapanta, E. P. (2013). *“Análisis y Diseño de un Edificio con Aisladores Sísmicos Modelamiento en el ETABS”*. (Tesis para título profesional). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Leyton Bradley, M. (2017) *“Implementación de aisladores sísmicos en un edificio de viviendas en Lima, Perú”*. (Tesis para título profesional). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Lubliner, J. (1990) *“Plasticity theory”*. Macmillan Publishing Company, New York. USA.



- Meza Palacios, Z. M. (2015) “*Análisis y Diseño de un hospital con aisladores elastoméricos en el Perú*”. (Tesis para título profesional). Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). “*Design of seismic isolated structures: from theory to practice*”. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Pérez Zamora, N. A.; Vásquez Ortega, M. J. (2016). “*Diseño de aisladores sísmicos de base para edificio de oficinas de 10 niveles con sistema estructural de pórticos rígidos de concreto reforzado*”. (Tesis para título profesional). Universidad Centroamericana de Nicaragua, Managua, Nicaragua.
- Quintana M., P. (2011). “*Uso de aisladores sísmicos en edificios en Chile: un caso de estudio*”. (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Reyes Virhuez, C. A. (2017). “*Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú*”. (Tesis para grado de magister). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Reyna Flores, A. K. (2017). “*Análisis comparativo de la respuesta sísmica de estructuras de concreto armado con y sin aisladores sísmicos en la base según su variación en la altura*”. (Tesis para título profesional). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Romero Urrunaga, Y. I. (2014) “*Análisis Dinámico de Aisladores de Base Elastoméricos como Alternativa de Solución para Edificaciones con Fallas por Piso Blando*” (Tesis para título profesional). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.

- Rodríguez Núñez, M. E. (2011). *“Comportamiento a fuerza cortante de muros de concreto de ductilidad limitada con 8 cm de espesor”*. (Tesis para título profesional). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Rojas Soriano, R. (1996). *“Proceso de Investigación Científica”*. 3ra edición. Editorial Trillas. México.
- Ruiz S., Badillo H., Silva F., Esteva L. (2000) *“Seismic design criteria for retrofitting of buildings with hysteretic energy dissipators”*. (12th World Conference on Earthquake Engineering). Auckland. New Zealand.
- Soriano Cacho, J. L. (2014). *“Comparación de la respuesta estructural del pabellón a de la universidad privada del norte con aisladores sísmicos elastoméricos y sin aisladores sísmicos”*. (Tesis para título profesional). Universidad Privada Del Norte, Cajamarca, Perú.
- Talavera Gómez, A. (2017). *“Experiencia Nacional en edificaciones con sistemas de protección sísmica”*. (Presentación en diapositivas). Ministerio de Vivienda, Lima, Perú.
- Tamayo, M. (2007). *“El Proceso de la investigación científica”*. Caracas: Editorial Limusa.
- Valerio Zacarías, J. J. (2015). *“Análisis comparativo de un edificio fijo en la base vs un edificio aislado utilizando 4 tipos de aisladores sísmicos”*. (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.