

Diseño y construcción de un sistema de control pasivo para el aislamiento sísmico de tipo elemento flexible

Vega Rivas, Carlos Enrique y Villagrán Mayorga, Roberto Andrés

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título Ingeniero Mecánico

Ing. Msc. Abatta Jácome, Lenin Rómulo

13 de septiembre del 2020

Urkund Analysis Result

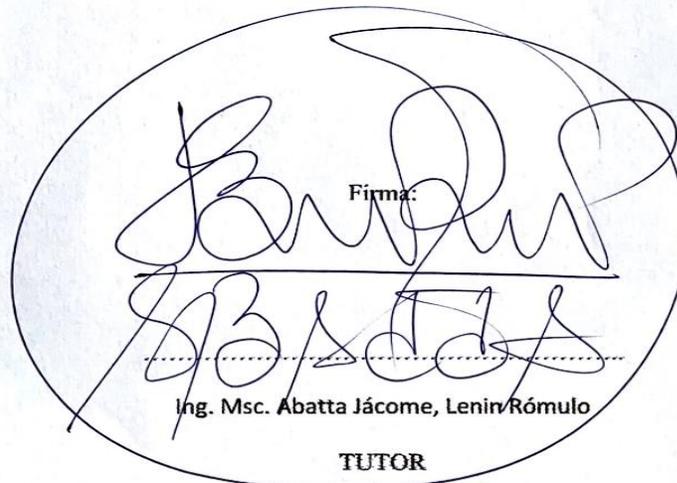
Analysed Document: TESIS_VEGA_VILLAGRAN_URKUND.pdf (D79121165)
Submitted: 9/14/2020 7:23:00 PM
Submitted By: lrabatta@espe.edu.ec
Significance: 3 %

Sources included in the report:

TESIS COMINA PARRA WILLINGTON-MACAS PALACIOS JORGE.pdf (D29519569)
 Tesis Pedro Merino imprimir 18 DE MARZO DEL 2019.docx (D49340484)
 MONCADA GUAMAN JUAN CARLOS.docx (D34963445)
 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL AISLADOR LRB.docx (D40448584)
 TESINA SAN JOSÉ MANTA ROMMEL ABRIL.docx (D31689112)
 a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463
<https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/5067/5000>
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1xzd2qYI-cptYEjrbrTXP56XMIINd2IN_r1Izjna1tTY/edit?usp=sharing
<https://repositorio.udes.edu.co/bitstream/001/3812/1/An%C3%A1lisis%20comparativo%20de%20la%20respuesta%20din%C3%A1mica%20entre%20una%20estructura%20s%C3%ADsmicamente%20aislada%20con%20aisladores%20LRB%20%28LEAD%20RUBBER%20BEARING%29%20vs%20una%20estructura%20convencional.pdf>
<https://docplayer.es/87804784-Analisis-comportamiento-y-diseno-en-concreto-armado-de-un-edificio-de-6-niveles-con-un-sotano-con-aisladores-elastomericos-con-nucleo-de-plomo.html>

Instances where selected sources appear:

18



Firma:

Ing. Msc. Abatta Jácome, Lenin Rómulo

TUTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño y construcción de un sistema de control pasivo para el aislamiento sísmico de tipo elemento flexible**” fue realizado por los señores **Vega Rivas, Carlos Enrique y Villagrán Mayorga, Roberto Andrés** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 14 de septiembre del 2020

Firma:

Ing. Msc. Abatta Jácome, Lenin Romulo

CI: 1723180707



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Vega Rivas, Carlos Enrique** con cédula de ciudadanía n° 172507037-7 y **Villagrán Mayorga, Roberto Andrés** con cédula de ciudadanía n° 180438792-4, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un sistema de control pasivo para el aislamiento sísmico de tipo elemento flexible”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 14 de septiembre del 2020

Firmas

Carlos

 Vega Rivas, Carlos Enrique

C.C.: 172507037-7

Villagrán Mayorga, Roberto Andrés

C.C.: 180438792-4

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Vega Rivas, Carlos Enrique** con cédula de ciudadanía n°172507037-7 y **Villagrán Mayorga, Roberto Andrés** con cédula de ciudadanía n°180438792-4, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un sistema de control pasivo para el aislamiento sísmico de tipo elemento flexible”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 14 de septiembre del 2020

Firmas


.....
Vega Rivas, Carlos Enrique
C.C.: 172507037-7


.....
Villagrán Mayorga, Roberto Andrés
C.C.: 180438792-4

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a toda mi familia y amigos que me han apoyado, que siempre han confiado en mí y han estado en las buenas y en las malas.

Carlo E. Vega R.

Con el orgullo y la satisfacción de haber culminado mis estudios de tercer nivel en una de las universidades más prestigiosas del Ecuador, dedico el presente trabajo de titulación a:

Mi madre Myriam, por su sacrificio incansable durante todos estos años, por su apoyo incondicional cuando decidí salir a estudiar lejos de casa, por su preocupación, por su amor constante, por haberme inculcado las ideas de siempre tratar de ser el mejor. Me faltarían palabras y una vida entera para dedicarte palabras madre mía, gracias infinitamente por lo que has hecho por mí.

Mis abuelitos mamá Yoly y papá Abel, porque con ellos crecí día a día durante 18 años de mi vida en los cuales me pudieron inculcar sus valores, sus pensamientos y conjuntamente con mi madre Myriam me fueron formando para llegar a ser el hombre que el día de hoy soy. Porque fue muy difícil alejarme de ellos para buscar mi sueño de ser Ingeniero Mecánico y sin embargo con una llamada me daban fuerzas para continuar. Los amo mis viejitos y a la vez mis padres también.

Roberto A. Villagren M.

Agradecimiento

A mi madre, por todos los años de esfuerzo que me dedico para que nunca me falte nada y que pudiera crecer con muchas fortalezas para afrontar la vida.

A mis hermanos que siempre han estado cuando los he necesitado y son un pilar fundamental para mi vida.

A mis tíos que siempre me han apoyado con su hospitalidad y alegría.

Al ingeniero Lenin Abatta por su ayuda, consejos y confianza para la realización del presente proyecto.

A mis amigos, por el apoyo que me han brindado a lo largo de mi carrera.

Al ingeniero Francisco Fuentes y a todos los trabajadores de Grupo Vikingo, por el apoyo brindado durante el proceso de fabricación y ensayos.

A mi perrita Moly, por estar a mi lado día y noche sin importar las circunstancias.

Carlo E. Vega R.

Agradezco a Dios y a mi Virgencita por haberme guiado y cuidado durante todo este camino y a la vez aventura que fue salir de casa en búsqueda de mi sueño.

Agradezco a mi papá por haberme apoyado incondicionalmente durante todas las etapas de mi vida y por la confianza que me ha brindado.

Agradezco a mi familia por su apoyo que a la distancia me supieron brindar día a día para que no me rinda.

Agradezco especialmente a mi primo Mauricio porque él fue el precursor para que pueda estudiar en esta prestigiosa universidad.

Agradezco a mi novia Nicole por todo el tiempo que hemos compartido juntos, por haberme brindado su apoyo incondicional, por darme su compañía cuando me sentía solo fuera de casa, por su amor, por su cariño y por todo lo que con palabras no puedo expresar.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por ser mi segundo hogar durante esta etapa y por haberme impartido diversos conocimientos.

A mi director de tesis Ing. Lenin Abatta por habernos ayudado en el desarrollo del presente trabajo de titulación y por su apoyo durante el transcurso de la carrera.

Finalmente, a mis amigos de la universidad que al estar lejos de casa se llegaron a convertir en mi segunda familia y con quienes compartí tantas experiencias inolvidables.

Roberto A. Villagrun M.

Índice de contenidos	
Resultados Urkund.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos.....	9
Índice de tablas	13
Índice de figuras.....	14
Nomenclatura	21
Resumen	27
Abstract.....	28
Capítulo I.....	29
Generalidades.....	29
<i>Introducción</i>	29
<i>Antecedentes</i>	30
<i>Definición del problema</i>	32
<i>Justificación e Importancia</i>	33

<i>Objetivos</i>	34
<i>Alcance del proyecto</i>	34
Capítulo II.....	36
Estado del arte	36
<i>Generalidades</i>	36
<i>Técnicas de control de respuesta sísmica</i>	40
<i>Estado actual de los aisladores sísmicos elastoméricos</i>	51
<i>Definición de conceptos fundamentales</i>	59
Capítulo III.....	62
Diseño y fabricación.....	62
<i>Definición del modelo de estructura a ser analizada</i>	62
<i>Características de los materiales</i>	63
<i>Determinación de las cargas</i>	65
<i>Modelamiento del tipo de estructura</i>	69
<i>Diseño del prototipo de aislador sísmico</i>	72
Coeficientes según el terreno y el desplazamiento inicial.	72
Propiedades del material.	76
Cargas necesarias para el diseño del aislador sísmico elastomérico.	77
Dimensionamiento.....	78
Propiedades geométricas del aislador.....	81

<i>Análisis bilineal</i>	82
<i>Parámetros adicionales</i>	87
<i>Fuerzas laterales mínimas</i>	89
<i>Deformación por cortante (control de espesor de las capas de elastómero).</i>	97
<i>Esfuerzo en las láminas de refuerzo de acero (control de espesor en las láminas de refuerzo)</i>	103
<i>Cálculo del espesor mínimo en las placas de anclaje.</i>	107
<i>Control de pandeo.</i>	111
<i>Proceso de análisis dinámico</i>	114
<i>Elaboración del protocolo de fabricación</i>	120
<i>Fabricación de los aisladores</i>	126
Capítulo IV.....	148
Ensayos y resultados.....	148
<i>Descripción de la máquina</i>	148
<i>Generalidades para los ensayos</i>	149
<i>Protocolo para el ensayo de los prototipos de aisladores sísmicos elastoméricos</i>	150
<i>Ejecución de los ensayos</i>	152
<i>Análisis de resultados</i>	164
<i>Inspección visual de los prototipos</i>	164
<i>Gráficas obtenidas de los ensayos.</i>	172

<i>Simulación por elementos finitos</i>	189
Capítulo V.....	194
Desarrollo del programa computacional.....	194
Capítulo VI.....	198
Análisis económico	198
Capítulo VII.....	203
Conclusiones y recomendaciones	203
<i>Conclusiones</i>	203
<i>Recomendaciones</i>	205
Capítulo VIII.....	207
Referencias bibliográficas	207
Anexos	211

Índice de tablas

Tabla 1 Valores del factor z con respecto a la zona sísmica.	57
Tabla 2 Cargas muertas a considerar en la estructura.	66
Tabla 3 Cargas vivas a considerar en la estructura.	69
Tabla 4 Cargas y desplazamientos necesarios para los ensayos.	152
Tabla 5 Desplazamiento según la carga axial aplicada.	153
Tabla 6 Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 1.	154
Tabla 7 Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 2.	154
Tabla 8 Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 3.	155
Tabla 9 Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 4.	155
Tabla 10 Datos obtenidos del ensayo <i>carga vs extensión del AEV1</i>	190
Tabla 11 Costo aproximado de construcción de la estructura con aislamiento sísmico.	198
Tabla 12 Costo aproximado de construcción de la estructura sin aislamiento sísmico.	200

Índice de figuras

<i>Figura 1 Edificios aislados en Japón hasta el año 2000.</i>	31
<i>Figura 2 Comportamiento de una estructura aislada y una no aislada al momento de un sismo.</i> 37	
<i>Figura 3 Hospital INAGI aislado sísmicamente, Tokio, Japón.</i>	38
<i>Figura 4 Edificio de 4 pisos afectado por el terremoto el 10 de diciembre de 1970 en la provincia de Loja.</i>	39
<i>Figura 5 Recopilación de los SEAOC Blue Book, para diseño sísmico.</i>	40
<i>Figura 6 Ciclo de histéresis de sistema estructural, energía elástica e inelástica.</i>	41
<i>Figura 7 Clasificación de los sistemas de protección sísmica.</i>	42
<i>Figura 8 Modo fundamental de un sistema aislado.</i>	43
<i>Figura 9 Diferentes técnicas de control pasivo.</i>	44
<i>Figura 10 Diferentes técnicas de aislamiento sísmico en la base.</i>	45
<i>Figura 11 Aisladores sísmico de flexión y de fricción.</i>	46
<i>Figura 12 Edificios con y sin disipadores de energía.</i>	46
<i>Figura 13 Disipadores de energía tipo adas, tadas y panel.</i>	47
<i>Figura 14 Tipos de amortiguadores de masa sintonizada.</i>	48
<i>Figura 15 Aislador elastomérico LDRB.</i>	49
<i>Figura 16 Aislador elastomérico LRB.</i>	51
<i>Figura 17 Diagrama de histéresis para los aisladores LRB.</i>	51
<i>Figura 18 Comparación de transmisibilidad de aceleración de aisladores de base pasivos.</i>	53
<i>Figura 19 Respuesta histórica de LRB bajo movimientos de corta duración SD y larga duración LD.</i>	54
<i>Figura 20 Central nuclear de tercera generación.</i>	55

Figura 21 Zonas sísmicas en el Ecuador.....	56
Figura 22 Modelo de estructura unifamiliar.....	62
Figura 23 División de espacios en el interior de la casa: a) planta baja de la casa. b) planta alta de la casa.	63
Figura 24 Estructura reticulada de elastómeros.....	64
Figura 25 División del piso superior para el cálculo de cargas sobre las vigas.....	65
Figura 26 Longitud de la viga l y su área cooperante.....	68
Figura 27 Modelo geométrico de la estructura.....	70
Figura 28 Vigas cargadas de forma distribuida.....	70
Figura 29 Demanda – capacidad de los elementos de la estructura.....	71
Figura 30 Verificación de la deflexión.....	72
Figura 31 Niveles de amenaza sísmica.....	72
Figura 32 Curvas de peligro sísmico para Quito.....	73
Figura 33 Clasificación del sitio.....	73
Figura 34 Coeficiente F_a según el tipo de suelo.....	74
Figura 35 Coeficiente F_d según el tipo de suelo.....	74
Figura 36 Coeficientes de amortiguación.....	75
Figura 37 Zona sísmica.....	89
Figura 38 Comportamiento no lineal de los suelos.....	90
Figura 39 Espectro elástico de aceleraciones para un período de 0,74 [s].....	92
Figura 40 Espectro elástico de aceleraciones para un período de 0,82 [s].....	93
Figura 41 Coeficientes de importancia.....	94
Figura 42 Geometría para el área reducida.....	109
Figura 43 Espectro de respuestas de aceleraciones.....	116

Figura 44 Efecto $P - \Delta$ sobre aisladores elastomérico.	118
Figura 45 Paso 1 de la construcción de la matriz.	126
Figura 46 Paso 2 de la construcción de la matriz.	127
Figura 47 Paso 3 de la construcción de la matriz.	127
Figura 48 Paso 4 de la construcción de la matriz.	128
Figura 49 Paso 5 de la construcción de la matriz.	128
Figura 50 Paso 6 de la construcción de la matriz.	129
Figura 51 Paso 1 de la construcción de las placas de anclaje.	129
Figura 52 Paso 2 de la construcción de las placas de anclaje.	130
Figura 53 Paso 3 de la construcción de las placas de anclaje.	130
Figura 54 Paso 4 de la construcción de las placas de anclaje.	131
Figura 55 Paso 1 de la construcción de las placas de refuerzo.	131
Figura 56 Paso 2 de la construcción de las placas de refuerzo.	132
Figura 57 Paso 1 de la elaboración del elastómero virgen.	132
Figura 58 Paso 2 de la elaboración del elastómero virgen.	133
Figura 59 Paso 3 de la elaboración del elastómero virgen.	133
Figura 60 Paso 4 de la elaboración del elastómero virgen.	135
Figura 61 Paso 5 de la elaboración del elastómero virgen.	136
Figura 62 Paso 1 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).	137
Figura 63 Paso 2 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).	138
Figura 64 Paso 3 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).	138
Figura 65 Paso 4 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).	139
Figura 66 Paso 5 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).	140
Figura 67 Resultados del ensayo de tracción material reciclado.	141

Figura 68 Paso 1 del montaje de los aisladores sísmicos.	142
Figura 69 Paso 2 del montaje de los aisladores sísmicos.	142
Figura 70 Paso 3 del montaje de los aisladores sísmicos.	143
Figura 71 Paso 4 del montaje de los aisladores sísmicos.	143
Figura 72 Paso 5 del montaje de los aisladores sísmicos.	144
Figura 73 Paso 6 del montaje de los aisladores sísmicos.	144
Figura 74 Paso 7 del montaje de los aisladores sísmicos.	145
Figura 75 Paso 8 del montaje de los aisladores sísmicos.	146
Figura 76 Resultados finales de la construcción.	147
Figura 77 Prensa hidráulica.	148
Figura 78 Ensayo de compresión en los aisladores sísmicos.	153
Figura 79 Desplazamiento 0,5DD aislador elastomérico virgen 1.	157
Figura 80 Desplazamiento 1,0 DD aislador elastomérico virgen 1.	157
Figura 81 Desplazamiento 1,1 DD aislador elastomérico virgen 1.	158
Figura 82 Desplazamiento 0,5 DD aislador elastomérico virgen 2.	158
Figura 83 Desplazamiento 1,0 DD aislador elastomérico virgen 2.	159
Figura 84 Desplazamiento 1,1 DD aislador elastomérico virgen 2.	159
Figura 85 Desplazamiento 0,5 DD aislador elastomérico reciclado 1.	160
Figura 86 Desplazamiento 1,0 DD aislador elastomérico reciclado 1.	160
Figura 87 Desplazamiento 1,1 DD aislador elastomérico reciclado 1.	161
Figura 88 Desplazamiento 0,5 DD aislador elastomérico reciclado 2.	161
Figura 89 Desplazamiento 1,0 DD aislador elastomérico reciclado 2.	162
Figura 90 Desplazamiento 1,1 DD aislador elastomérico reciclado 2.	162
Figura 91 Desplazamiento 1,4 DD aislador elastomérico virgen.	163

Figura 92 Desplazamiento 1,4 DD aislador elastomérico reciclado.	163
Figura 93 Falla encontrada en el A.E.V.1 a 15 toneladas de compresión.	164
Figura 94 Aislador de elastómero mezclado durante la compresión.	165
Figura 95 Ensayo al 50%, 100% y 110% con 10 toneladas de compresión.	166
Figura 96 Ensayo al 140% del desplazamiento de diseño y 15 toneladas de compresión.	167
Figura 97 Ensayo al 50% del desplazamiento de diseño y 10 toneladas de compresión.	168
Figura 98 Ensayo al 100% del desplazamiento de diseño y 10 toneladas de compresión.	169
Figura 99 Ensayo al 110% del desplazamiento de diseño y 10 toneladas de compresión.	170
Figura 100 Ensayo al 140% del desplazamiento de diseño y 15 toneladas de compresión.	171
Figura 101 Desplazamiento 0,5 DD A.E.V.1 vs. Tiempo.	172
Figura 102 Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 0,5 DD.	172
Figura 103 Desplazamiento 1,0 DD A.E.V.1 vs. Tiempo.	173
Figura 104 Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 1,0 DD.	173
Figura 105 Desplazamiento 1,1 DD A.E.V.1 vs. Tiempo.	174
Figura 106 Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 1,1 DD.	174
Figura 107 Desplazamiento 1,4 DD A.E.V.1 vs. Tiempo.	175
Figura 108 Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 1,4 DD.	175
Figura 109 Desplazamiento 0,5 DD A.E.V.2 vs. Tiempo.	176
Figura 110 diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 0,5 DD.	176
Figura 111 Desplazamiento 1,0 DD A.E.V.2 vs. Tiempo.	177
Figura 112 Diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 1,0 DD.	177
Figura 113 Desplazamiento 1,1 DD A.E.V.2 vs. Tiempo.	178
Figura 114 Diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 1,1 DD.	178
Figura 115 Desplazamiento 1,4 DD A.E.V.2 vs. Tiempo.	179

Figura 116 <i>Diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 1,4 DD.</i>	179
Figura 117 <i>Desplazamiento 0,5 DD A.E.M.1 vs. Tiempo.</i>	180
Figura 118 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 0,5 DD.</i>	180
Figura 119 <i>Desplazamiento 1,0 DD A.E.M.1 vs. Tiempo.</i>	181
Figura 120 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 1,0 DD.</i>	181
Figura 121 <i>Desplazamiento 1,1 DD A.E.M.1 vs. Tiempo.</i>	182
Figura 122 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 1,1 DD.</i>	182
Figura 123 <i>Desplazamiento 1,4 DD A.E.M.1 vs. Tiempo.</i>	183
Figura 124 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 1,4 DD.</i>	183
Figura 125 <i>Desplazamiento 0,5 DD A.E.M.2 vs. Tiempo.</i>	184
Figura 126 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 0,5 DD.</i>	184
Figura 127 <i>Desplazamiento 1,0 DD A.E.M.2 vs. Tiempo.</i>	185
Figura 128 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 1,0 DD.</i>	185
Figura 129 <i>Desplazamiento 1,1 DD A.E.M.2 vs. Tiempo.</i>	186
Figura 130 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 1,1 DD.</i>	186
Figura 131 <i>Desplazamiento 1,4 DD A.E.M.2 vs. Tiempo.</i>	187
Figura 132 <i>Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 1,4 DD.</i>	187
Figura 133 <i>Ensayo de extensión del aislador elastomérico virgen 1.</i>	189
Figura 134 <i>Carga vs extensión del aislador elastomérico virgen 1.</i>	190
Figura 135 <i>Carga vs extensión del A.E.V.1 por elementos finitos.</i>	192
Figura 136 <i>Carga vs extensión del aislador elastomérico virgen 1.</i>	192
Figura 137 <i>Carga vs extensión del aislador elastomérico virgen 1.</i>	193
Figura 138 <i>Colores por celda en el programa computacional.</i>	195
Figura 139 <i>Datos de entrada para el programa computacional.</i>	196

Figura 140 *Pestaña de resumen del programa computacional generado.* 197

Nomenclatura

A_{ais}	:	Área del aislador
A_{min}	:	Área mínima de los aisladores de acuerdo a la carga máxima que se presente en la estructura
A_{rDE}	:	Área reducida por las cargas del sismo de diseño
A_r	:	Área reducida por cargas de servicio
b	:	Dimensión 1 del área rectangular equivalente reducida para el cálculo del espesor mínimo de las placas de anclaje
b_1	:	Dimensión del área de concreto que soporta la carga
B_D	:	Coefficiente de amortiguamiento para sismo de diseño (DE)
B_M	:	Coefficiente de amortiguamiento para sismo máximo considerado (MCE)
C_t	:	Depende del tipo de edificio
D	:	Desplazamiento propuesto de diseño
D_{Ladm}	:	Desplazamiento lateral admisible
D_D	:	Desplazamiento de diseño
D_L	:	Capacidad de desplazamiento lateral
D_y	:	Desplazamiento por fluencia
E_C	:	Módulo de elasticidad del conjunto elastómero-acero
E_D	:	Energía disipada en el primer ciclo de histéresis por un aislador
f_1	:	Coefficiente 1 para deformación por cortante
f_2	:	Coefficiente 2 para deformación por cortante
f_b	:	Resistencia de diseño del hormigón
f_c'	:	Resistencia a la compresión del hormigón
f_H	:	Frecuencia horizontal

f_V	:	Frecuencia vertical
F_a	:	Coeficiente de sitio para aceleraciones de período corto de 0,2 [s]
F_d	:	Coeficiente de sitio para aceleraciones de período 1 [seg]
F_y	:	Fuerza de fluencia
F_{ys}	:	Fuerza de fluencia del sistema
g	:	Gravedad
G	:	Módulo de corte del elastómero
h_n	:	Altura de la estructura medida desde la base [metros]
H_T	:	Altura total del aislador sin las placas de anclaje
I	:	Momento de inercia del aislador
K	:	Constante del material
K_{EF}	:	Rigidez efectiva
K_{EFS}	:	Rigidez efectiva del sistema
K_V	:	Rigidez vertical
K_e	:	Rigidez elástica
K_{es}	:	Rigidez elástica del sistema
K_p	:	Rigidez de post-fluencia
K_{ps}	:	Rigidez de post-fluencia del sistema
L	:	Dimensión 1 del área rectangular equivalente reducida para el cálculo del espesor mínimo de las placas de anclaje
M	:	Masa sísmica de la estructura
M_u	:	Resistencia requerida por la placa al doblado por unidad de longitud
N_{ais}	:	Número total de aisladores del sistema
N_e	:	Número de capas de elastómero para un aislador

N_s	:	Número de láminas de acero para un aislador
η	:	Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado.
p	:	Perímetro del aislador
P_{DDEcc}	:	Carga muerta para la columna crítica por sismo de diseño
P_{Dcc}	:	Carga muerta para la columna crítica
P_{Eh}	:	Componente horizontal de la carga sísmica
P_{EDE}	:	Carga por sismo de diseño
P_{Ev}	:	Componente vertical de la carga sísmica
P_{LDEcc}	:	Carga viva para la columna crítica por sismo de diseño
P_{Lcc}	:	Carga viva para la columna crítica
P_{uDE}	:	Carga axial factorada por sismo de diseño
P_D	:	Carga muerta de la estructura
P_L	:	Carga viva de la estructura
P_{cr}	:	Carga de pandeo
P_{cr}'	:	Carga crítica de pandeo
P_{crDE}'	:	Carga crítica de pandeo por sismo de diseño
P_d	:	Peso sísmico efectivo de la estructura
P_{max}	:	Peso máximo presente en la estructura (columna crítica)
P_u	:	Carga axial factorada por cargas de servicio
Q_d	:	Fuerza característica
Q_{ds}	:	Fuerza característica del sistema
r_1	:	Brazo de carga

r	:	Factor usado en el espectro de diseño elástico
S	:	Factor de forma del aislador
S_1	:	Aceleración mapeada para período de 1 seg
S_{D1}	:	Aceleración para el sismo de diseño para un período de 1 [s]
S_{DS}	:	Aceleración para el sismo de diseño para un período de 1 [s]
S_{M1}	:	Aceleración para el sismo máximo considerado para un período de 1 [s]
S_{MS}	:	Aceleración para el sismo máximo considerado para un período corto de 0,2 [s]
S_S	:	Aceleración mapeada para período corto 0,2 [s]
t_{bpmin}	:	Espesor mínimo de la placa inferior de anclaje
$t_{smin,DE}$:	Espesor mínimo de las láminas de acero de refuerzo por sismo de diseño
t_{smin}	:	Espesor mínimo de las láminas de acero de refuerzo por cargas de servicio
$t_{srecomen}$:	Espesor recomendado de las láminas de acero de refuerzo
t_{tpmin}	:	Espesor mínimo de la placa superior de anclaje
t_{bp}	:	Espesor de la placa inferior de anclaje
t_e	:	Espesor de las capas de elastómero
t_{ec}	:	Espesor de la cubierta de elastómero
t_s	:	Espesor de las láminas de acero
t_{tp}	:	Espesor de la placa superior de anclaje
T	:	Período fundamental de vibración de la estructura fija
T_D	:	Período deseado de la estructura sísmicamente aislada
T_{EF}	:	Período efectivo de la estructura con el sistema de aislación de base
T_r	:	Altura de las capas de elastómero
V_S	:	Fuerza lateral por encima del sistema de aislación

V_b	:	Fuerza lateral por debajo del sistema de aislación
W_{cc}	:	Peso que soporta la columna más crítica de la estructura
α	:	Depende del tipo de edificio
β	:	Porcentaje de amortiguamiento
β_{EF}	:	Amortiguamiento efectivo del sistema
γ	:	Factor para el cálculo del desplazamiento lateral total
γ_{SDE}	:	Deformación por desplazamiento lateral por sismo de diseño
γ_{CDE}	:	Deformación debido a compresión por sismo de diseño
γ_{rDE}	:	Deformación por rotación por sismo de diseño
γ_D	:	Factor de carga muerta
γ_L	:	Factor de carga viva
γ_{SS}	:	Deformación por desplazamiento lateral
γ_{CS}	:	Deformación debido a compresión
γ_{rs}	:	Deformación por rotación
γ_s	:	Módulo de tensión
δ	:	Factor para el cálculo del área reducida
Δ	:	Desplazamiento lateral total
Δ_{EDE}	:	Desplazamiento lateral por sismo de diseño
Δ_S	:	Desplazamiento lateral no sísmico (estático)
η	:	Relación de amplificación espectral
θ	:	Componente estático de rotación
\emptyset_{ais}	:	Diámetro del aislador
\emptyset_b	:	Factor de resistencia a la flexión

ϕ_c	:	Factor de reducción para la resistencia del concreto
ϕ_{min}	:	Diámetro mínimo de los aisladores de acuerdo a la carga máxima que se presente en la estructura
σ_{rDE}	:	Esfuerzo radial por sismo de diseño
σ_{rs}	:	Esfuerzo radial por cargas de servicio
σ_{zs}	:	Esfuerzo tangencial por cargas de servicio
$\sigma_{\theta DE}$:	Esfuerzo angular por sismo de diseño
$\sigma_{\theta DE}$:	Esfuerzo tangencial por sismo de diseño
$\sigma_{\theta s}$:	Esfuerzo angular por cargas de servicio
σ_{cg}	:	Esfuerzo a compresión de la goma
τ_{max}	:	Esfuerzo cortante máximo por cargas de servicio
τ_{max}	:	Esfuerzo cortante máximo por sismo de diseño

Resumen

En el presente proyecto se realizó el diseño de una estructura unifamiliar de dos pisos, el diseño de aisladores sísmicos elastoméricos, construcción y ensayos de los mismos. La estructura unifamiliar se la diseñó en un programa computacional, con el fin de reducir la rigidez ya que contará con un sistema de aislación de base. Para el diseño de los aisladores se hizo una recopilación de información entre distintas normas. Del diseño obtenido se construyeron cuatro aisladores elastoméricos, dos con material virgen y dos con material mixto (40% elastómero virgen y 60% elastómero reciclado). Para esta construcción se realizó un protocolo de fabricación con el objetivo de mantener el mismo procedimiento para todos los prototipos. Posteriormente, se elaboró un protocolo de ensayos para someter a distintas pruebas a los cuatro prototipos. Los resultados obtenidos en los dos primeros con material virgen concluyeron que el diseño es correcto ya que superaron con éxito el número de ciclos requerido tanto para el desplazamiento de diseño como para el desplazamiento total. En cuanto a los dos prototipos siguientes con material mixto, los resultados mostraron que a pesar de que los aisladores no se rompieron en los ciclos requeridos tanto para el desplazamiento de diseño como para el desplazamiento total, sí se pudo evidenciar que la capacidad de éstos es menor ya que existió un desprendimiento parcial de las capas de elastómero conectadas con las placas de anclaje del aislador.

Palabras clave:

- **AISLADOR SÍSMICO**
- **DISEÑO**
- **DESPLAZAMIENTO**
- **PROTOCOLO**
- **SISMO DE DISEÑO**

Abstract

In this project, the design of a two-story single family structure, the design of elastomeric seismic isolators, their construction, and tests were carried out. The single family structure was designed in a computer program, in order to reduce rigidity since it will have a base isolation system. For the design of the isolators, a compilation of information was made between different standards. From the obtained design, four rubber bearings were built, two with virgin material and two with mixed material (40% virgin elastomer and 60% recycled elastomer). For this construction a manufacturing protocol was carried out in order to maintain the same procedure for all prototypes. Subsequently, a test protocol was developed to subject the four prototypes to different tests. The results obtained in the first two with virgin material concluded that the design is correct since they successfully exceeded the number of cycles required for both design displacement and total displacement. Regarding the following two prototypes with mixed material, the results showed that although the isolators did not break in the cycles required for both the design displacement and for the total displacement, it was possible to show that their capacity is less since there was a partial detachment of the elastomer layers connected to the anchor plates of the isolator.

Keywords:

- **SEISMIC ISOLATOR**
- **DESIGN**
- **DISPLACEMENT**
- **PROTOCOL**
- **DESIGN EARTHQUAKE.**

Capítulo I

Generalidades

Introducción

En las últimas décadas se han presentado eventos sísmicos considerables a nivel mundial, que han sido estudiados por diferentes institutos geofísicos. Entre los de mayor magnitud se pueden nombrar el terremoto de Indonesia en 2005 con una magnitud de momento 8,6 causante de 1313 muertes, el terremoto de Haití en 2010 con una magnitud de momento de 7 causante de 300 mil muertes, el terremoto de Chile en 2010 con una magnitud de momento de 8,8 causante de 521 muertes, el terremoto de Japón en 2011 con una magnitud de momento 9,1 causante de 100 mil muertes y el terremoto de Ecuador en 2016 con una magnitud de momento 7,8 causando 661 muertes, (Vega , 2015).

Entre varios métodos que han sido estudiados y aceptados por expertos para salvaguardar la integridad de las edificaciones y más aún la vida del ser humano, se encuentran los sistemas de aislación sísmico pasivo, es decir, sistemas que se ubican directamente en la base de la estructura. El objetivo de estos sistemas es que la estructura tenga una frecuencia de vibración distinta a la del suelo en que se encuentra para reducir las aceleraciones provocadas por un sismo que van directamente a la estructura. Se ha buscado estudiar dichos sistemas para dar un paso más adelante sobre la temática sísmica en la construcción y así encontrar diseños confiables para futuras edificaciones. Esto motiva a mejorar la calidad de las infraestructuras, primordialmente en zonas donde existe alto peligro sísmico, como es el caso del Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde se ubica Ecuador, uno de los países más afectados sísmicamente en Latinoamérica. La infraestructura existente carece de sistemas aptos para proteger a la población ante desastres naturales de tipo sísmico, esto ocasiona miles de muertos, una gran

cifra de personas desaparecidas, muchas familias sin hogar y una gran pérdida económica a nivel nacional, cifras que de no ser atendidas aumentarán en los siguientes años.

Con el presente proyecto se busca incrementar el conocimiento de los lectores sobre el tema, por lo que se ha investigado y analizado cada uno de los aspectos referentes a los sistemas de aislamiento pasivo de distintas fuentes bibliográficas, para así, elaborar un método de diseño completo de aisladores sísmicos elastoméricos. Para validar dicho diseño se construirá aisladores sísmicos para una estructura unifamiliar ubicada en la zona sísmica de Quito, éstos serán ensayados buscando así comprobar las ventajas que una estructura aislada sísmicamente tiene sobre otra que no tiene un sistema de aislación sísmico.

El proyecto también está enfocado en estudiar el posible uso de material elastomérico reciclado (caucho de neumáticos) en la construcción de sistemas de aislación pasivo, buscando así contribuir al medio ambiente, ya que el elastómero procesado tarda más de 100 años en descomponerse y juntamente con el plástico es uno de los objetos que más afectan los ecosistemas marinos en especial por su alto contenido de azufre.

Antecedentes

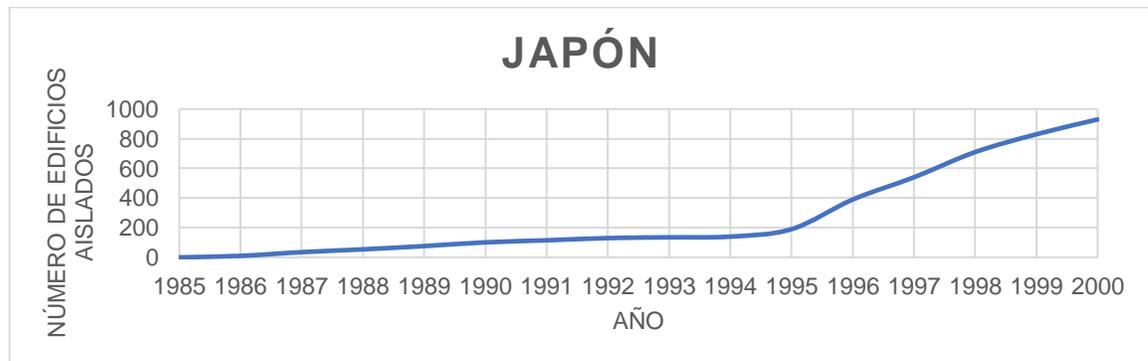
El aislamiento sísmico es una técnica estructural que se encarga de proteger la integridad de una edificación contra los efectos de un sismo, asegurando así la protección de las personas, esto mediante un control pasivo de las vibraciones de la edificación que se logra desacoplando la estructura de la cimentación, es decir, el aislador sísmico funciona como una herramienta que separa la estructura de la cimentación, aislando la edificación de alta frecuencia y cortos periodos producidos por los sismos, (Parra & Vinicio, 2010).

El concepto de aisladores sísmicos se ha desarrollado ya desde hace 100 años atrás, en el año de 1909 el Ingles J. A. Calentarients afirmó que cualquier edificación puede ser construída en un lugar sísmico con seguridad, siempre y cuando exista una junta entre la base de la

estructura y el suelo, rellena de arena o alguna sustancia adecuada que le permita deslizarse durante el evento sísmico, (Korswagen, Arias, & Huringa, 2012). Desde 1920 en los Estados Unidos se empezó con el estudio y diseño de estructuras con el propósito de evitar el colapso de éstas, donde muchas investigaciones experimentales han dado a conocer la efectividad que tiene un sistema de aislamiento sísmico, reduciendo en gran medida los efectos causados en la estructura a comparación con una estructura de base fija, (Anaya & et al., 2016). El uso de estas herramientas de aislamiento se ha vuelto más común en países del primer mundo, demostrando su efectividad durante sismos como por ejemplo, en el terremoto de Kobe - Japón del año 1995, donde los 85 edificios aislados presentaron un buen desempeño haciendo que el uso de aisladores sísmicos incrementara, para 1998 se registraban 600 edificios aislados, en la Figura 1 se puede observar la tendencia exponencial al uso de aisladores sísmicos en Japón, (Korswagen, Arias, & Huringa, 2012).

Figura 1

Edificios aislados en Japón hasta el año 2000.



Nota. Recuperado de (Anaya & et al., 2016).

En el Ecuador desde el año 1906 se han registrado 20 terremotos de gran magnitud, donde el terremoto de la ciudad de Ambato del 5 de agosto de 1949 es uno de los más

catastróficos, registrando más de seis mil muertos. Para el terremoto del 16 de abril del 2016, el puente Los Caras en Bahía de Caráquez y San Vicente que hasta la fecha era la única estructura con aislamiento sísmico, pudo demostrar la gran valía de esta herramienta dado su buen desempeño durante el terremoto de 7.8 de magnitud de momento, esto incrementó el atractivo del uso de aisladores sísmicos en el país, (Salomón, Oller, & Barbat, 2000).

En el Ecuador no se encuentra una línea de producción de aisladores sísmicos, por lo que se busca diseñar y construir aisladores sísmicos de tipo elemento flexible ajustados a las necesidades del mercado Ecuatoriano. Los aisladores sísmicos en base a elastómeros han sido efectivos, como es el caso del terremoto de Chile del 27 de febrero del 2010, que registra una magnitud de momento de 8.8, donde la clínica San Carlos de Apoquindo no sufrió daños debido al uso de este tipo de aisladores, (Anaya & et al., 2016).

Definición del problema

Desde el siglo veinte, y aún con la tecnología existente en aquella época se podía notar que el hombre seguía siendo muy vulnerable a uno de los desastres naturales más agresivos del planeta, los movimientos telúricos. Por esta razón, se establecieron varios estudios para contrarrestar los efectos de dicho fenómeno, que además de destruir casi en su totalidad la infraestructura de una ciudad acaba con la vida de muchas personas dejando en los registros miles de fallecidos y muchas otras personas en la indigencia. El presente proyecto busca continuar con dichos estudios enfocándose en los sistemas de control pasivo para el aislamiento sísmico, diseñando, construyendo y ensayando cuatro aisladores sísmicos, dos fabricados con elastómero natural virgen y dos fabricados con una mezcla de elastómero virgen y elastómero reciclado. Esto permitirá explorar así nuevos materiales para la construcción que de acuerdo su factibilidad, favorecerán al medio ambiente que ha sido muy afectado en los últimos años.

Justificación e Importancia

El Ecuador es un país con un alto peligro sísmico, como se detalla en la tesis doctoral del Señor Tcrn. Humberto Parra. A lo largo del último siglo se han producido sismos de gran magnitud, lo que ha llevado a la destrucción parcial o total de más del 60% de las edificaciones de la zonas afectadas, esto se debe a las innumerables construcciones artesanales y sin estudios previos con las que fueron ejecutadas, (Parra & Vinicio, 2010).

En el Ecuador a partir del 2014 entró en vigencia la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), la cual dispone especificaciones para cargas sísmicas, cargas no sísmicas, rehabilitación sísmica de estructuras, entre otras. Éstas definen requisitos mínimos de calidad para construcciones estructurales sismo resistentes, así como el cálculo y el dimensionamiento de las mismas. Para que una estructura resista sismos se presentan algunas opciones: mediante disipadores de energía o aisladores sísmicos, siendo el último un método más económico y factible para nuestro medio. Existe mucha diferencia entre una estructura fija al suelo y una estructura con aisladores sísmicos, los esfuerzos producidos son alrededor de diez veces más pequeños en una estructura aislada, como se ha comprobado en diversos estudios realizados en Chile, cuya zona sísmica es similar o mayor a la Ecuatoriana, (Araya, 1994).

Por los antecedentes que se presentan, es importante contar con un estudio detallado sobre un diseño apto para aisladores sísmicos en base de elastómeros, que trabajen de acuerdo a las condiciones inherentes de nuestro país, estos prototipos serán construidos con materiales disponibles en Ecuador para determinar si la industria local está en la capacidad de producir elastómeros con características y propiedades que requieren estos aisladores sísmicos.

Objetivos

Objetivo General. Diseñar y construir un sistema de control pasivo para el aislamiento sísmico de tipo elemento flexible.

Objetivos Específicos.

- Diseñar aisladores sísmicos que tengan la capacidad de trabajar en forma adecuada ante las cargas estructurales y los respectivos desplazamientos a los cuales serán sometidos.
- Construir cuatro aisladores sísmicos, de los cuales dos serán de material elastomérico virgen y dos de material elastomérico reciclado, siguiendo un protocolo establecido, de tal manera, que se asegure que todos serán fabricados bajo las mismas condiciones.
- Analizar los resultados de las pruebas que se obtengan de los aisladores sísmicos ensayados.
- Realizar un programa computarizado que permita agilizar el proceso de diseño de los aisladores sísmicos.

Alcance del proyecto

El presente proyecto busca desarrollar y entregar los ítems definidos a continuación:

- Protocolo para la fabricación de los aisladores sísmicos de prueba para que todos se construyan bajo las mismas condiciones, de tal manera, que sean capaces de entregar resultados reproducibles y confiables.
- Construcción de cuatro aisladores sísmicos para la estructura planteada: dos serán contruidos con material elastomérico virgen y dos con material elastomérico reciclado; se

detallará las variables específicas, materiales utilizados, dimensiones del producto fabricado y costo de fabricación.

- Protocolo para la ejecución de los ensayos, considerando los procedimientos, la máquina e instrumentos a ser utilizados, las fuerzas necesarias que se deben aplicar y las posibles fallas que se espera encontrar en el transcurso del ensayo.
- Elaboración de un programa computacional que mediante ciertos factores como la fuerza lateral y/o las cargas a las que será sometida la estructura, entre otras, permita obtener las dimensiones confiables para los aisladores sísmicos. Esto mediante el uso de las ecuaciones y parámetros con los que se diseñarán los aisladores sísmicos en el transcurso del presente proyecto.

Con esto se busca implementar aisladores sísmicos para casas que tengan un comportamiento confiable durante un evento sísmico, con esto se lograría reducir el costo por pérdidas económicas y a su vez disminuir la probabilidad de pérdidas humanas. Según los registros del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) en los últimos años en la Provincia de Pichincha se han producido varios eventos sísmicos teniendo el mayor de ellos una magnitud de momento de 5.1.

Capítulo II

Estado del arte

Generalidades

El objetivo de una estructura aislada no es solo la de proteger la vida humana, es también reducir el daño de la estructura y de los bienes en su interior. Estos dos requisitos han llevado a la definición de dos niveles sísmicos, el primer nivel denominado sismo de diseño (SD), nivel que corresponde al utilizado en el diseño de estructuras usuales, éste indica una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. Por otra parte, está el segundo nivel denominado sismo máximo posible (SMP), éste indica una probabilidad de excedencia de 10% en 100 años y es usado por lo general para el diseño de hospitales. Con esto se busca tener una estructura aislada sísmicamente para que cuando ocurra un sismo, ésta permanezca elástica diferenciándose así de una estructura convencional con base fija que busca solamente reducir las pérdidas humanas y no reducir el daño de la edificación (Ver Figura 2). En principio una estructura aislada debe tener un sistema que se comporte con una cierta ductilidad y que se mantenga estable gravitacionalmente, proporcionando una estructura al menos tan segura como la de base fija, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

En el caso de un sismo severo, una estructura aislada sísmicamente debe cumplir 2 objetivos de desempeño:

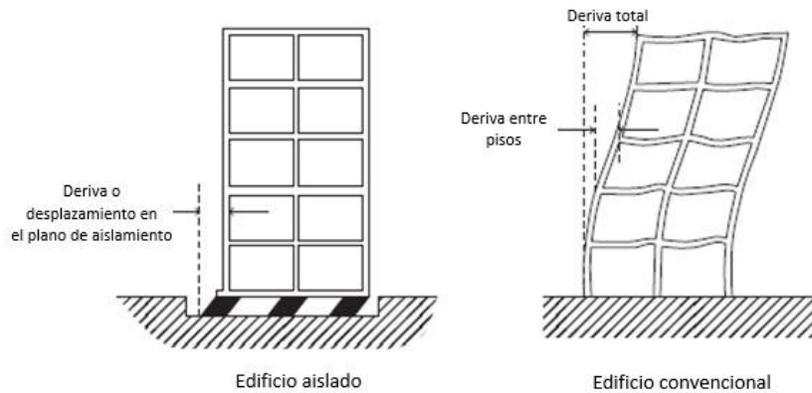
- No deben existir deficiencias en el sistema de aislación.
- No deben existir daños significativos en los elementos estructurales y no estructurales.

Para cumplir con dichos requisitos se limita la respuesta inelástica a una fracción menor de la permitida a una edificación usual, edificación que no alcanzaría los objetivos de

desempeño antes mencionados con ningún método de refuerzo estructural y menos mantener sin daño a la estructura, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Figura 2

Comportamiento de una estructura aislada y una no aislada al momento de un sismo.



Nota.

Recuperado de (Charleson & Guisasola, 2016).

Estudios realizados muestran que el uso de aislación sísmica a nivel mundial ha incrementado considerablemente. Estadísticamente en Japón desde el año de 1998 se han levantado más de 700 edificaciones con aislación sísmica (Ver Figura 3), entre los que están 18 edificios del gobierno, 35 centros de salud y 304 edificios de viviendas, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Figura 3

Hospital INAGI aislado sísmicamente, Tokio, Japón.



Nota. Recuperado de (Charleson & Guisasola, 2016).

Durante un fenómeno sísmico el suelo se desliza en sentido horizontal lo que causa daños graves en las infraestructuras, si el suelo bajo la estructura se moviera en forma independiente a la estructura se disminuiría el daño sobre la misma. Un problema que existe en el diseño sísmico de estructuras medianas es que la frecuencia natural de vibración está en el rango de frecuencia en el que la energía del sismo es mayor; en la Figura 4 se puede apreciar una edificación afectada sísmicamente con un terremoto con una magnitud de momento de 7.2 donde el edificio fue un amplificador de las vibraciones del suelo causando esfuerzos considerables sobre los elementos estructurales, además de desplazamientos entre los pisos, dañando columnas, vigas y demás elementos, (Garcia & et al., 2014).

Figura 4

Edificio de 4 pisos afectado por el terremoto el 10 de diciembre de 1970 en la provincia de Loja.



Nota. Recuperado de (Theurer, Velasco, & et al., 2017).

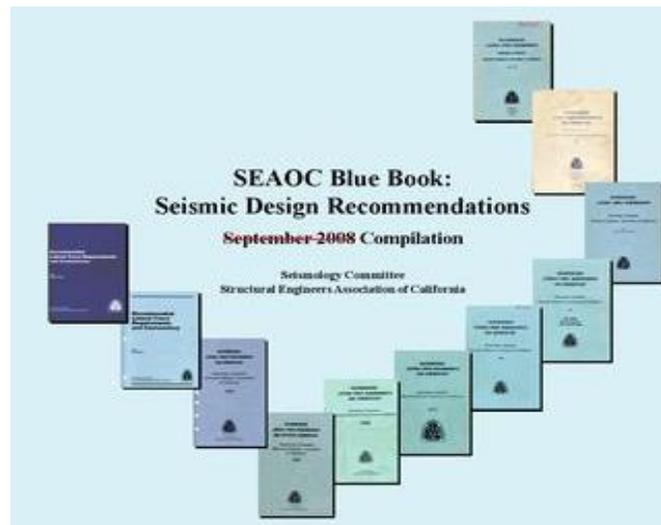
Un método para reducir la amplificación de las vibraciones es la construcción de una estructura totalmente rígida evitando que ésta experimente una aceleración mayor que la del suelo, esta solución es efectiva pero muy costosa. El otro método que se detalla a lo largo del proyecto es la reducción de las aceleraciones por debajo de las del suelo, para esto se pueden utilizar diferentes técnicas de control de respuesta sísmica que se detallan en el ítem 2.2, (García & et al., 2014).

El ser humano se ha visto en la necesidad de producir códigos y normas para la construcción tanto de máquinas como edificaciones, el caso de estructuras aisladas sísmicamente no es la excepción, el primer código para dicho tema fue desarrollado en 1986 por la Asociación de Ingeniería Estructural de California, SEAOC (Ver Figura 5) por su nomenclatura en inglés, con un documento titulado, Requerimientos Tentativos de Diseño para Aislación Sísmica para posteriormente en el año de 1990 desarrollar el segundo código, Requerimientos Generales para el Diseño y Construcción de Estructuras Aisladas Sísmicamente, estos requisitos

se han revisado y han sido publicados en el Código Uniforme de Construcción, UBC por su nomenclatura en inglés, desde el año de 1997, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Figura 5

Recopilación de los SEAOC Blue Book, para diseño sísmico.



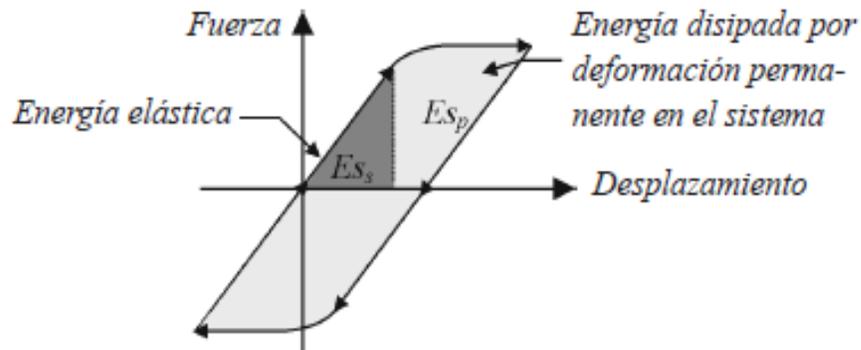
Nota. Recuperado de (Charleson & Guisasola, 2016).

Técnicas de control de respuesta sísmica

Las técnicas de control de respuesta sísmica buscan incrementar la energía disipada por histéresis que se muestra en la Figura 6, perteneciente a la estructura (E_{S_p}) y la energía disipada por dispositivos adicionales (E_p) como es el caso de los aisladores sísmicos, (Oviedo & Duque, 2006).

Figura 6

Ciclo de histéresis de sistema estructural, energía elástica e inelástica.



Nota. Recuperado de (Oviedo & Duque, 2006).

Las técnicas de control se clasifican según la manera de como el sistema maneja la energía producida por el fenómeno sísmico, de cómo el sistema la adsorbe y como la disipa. Se identifican como sistemas de disipación de energía los que aportan con energía disipada por dispositivos adicionales (E_p) en el balance de energía. Los estadounidenses plantean cuatro categorías que se pueden observar en la Figura 7, (Oviedo & Duque, 2006).

$$E_k + E_D + E_{S_s} + E_{S_p} + E_p = E_l$$

Donde se tiene que:

- E_k : Energía cinética de la estructura
- E_D : Energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura
- E_{S_s} : Energía de deformación elástica no disipada
- E_l : Energía de entrada al sistema

Figura 7

Clasificación de los sistemas de protección sísmica.



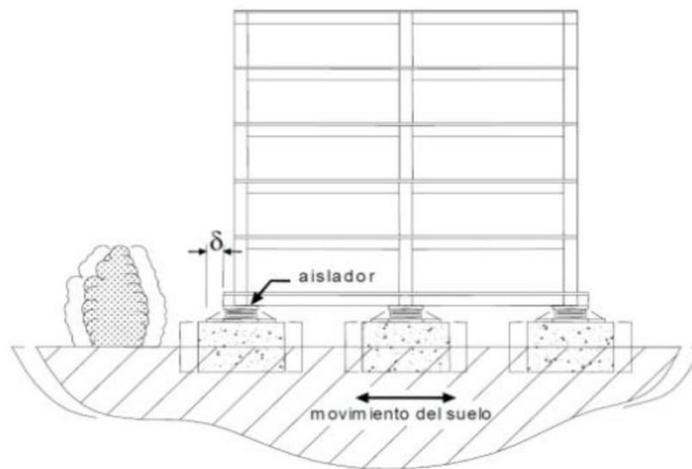
Nota. Recuperado de (Falconi & Aguiar, 2013)

Sistemas pasivos. Después de una serie de experimentos realizados a nivel mundial y la efectividad que han tenido en el transcurso de un movimiento sísmico, se ha demostrado que los sistemas de control pasivo son los más adecuados para la protección de una estructura contra un posible sismo, dado que éstos disminuyen la respuesta sísmica, al modificar la rigidez, la masa o las propiedades disipativas de la estructura, (Paolacci, Giannini, & De Angelis, 2013). El objetivo fundamental del aislamiento sísmico es desacoplar la superestructura del suelo, con el fin de que el movimiento producido por un sismo no se transmita a ésta y que permanezca idealmente inmóvil, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Como se puede observar en la Figura 8 la superestructura permanece esencialmente rígida mientras que toda la deformación está concentrada en la aislación.

Figura 8

Modo fundamental de un sistema aislado.

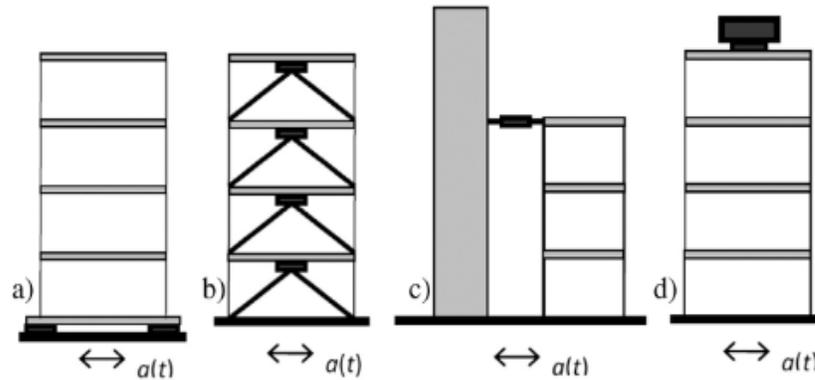


Nota. Recuperado de (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

A las técnicas de control de respuesta sísmica de tipo pasivo, se las ha dividido en tres subgrupos diferentes: primero los aisladores sísmicos Figura 9a, segundo los disipadores de energía Figura 9b donde se aprecia la técnica de arriostramiento disipativo dentro de la misma estructura, la Figura 9c con la técnica de acoplamiento disipativo entre estructuras adyacentes y por último los osciladores resonantes también denominados amortiguadores de masa sintonizada (TMD) Figura 9d, (Paolacci, Giannini, & De Angelis, 2013).

Figura 9

Diferentes técnicas de control pasivo.



Nota. Recuperado de (Paolacci, Giannini, & De Angelis, 2013).

El sistema de aislación debe satisfacer lo siguiente:

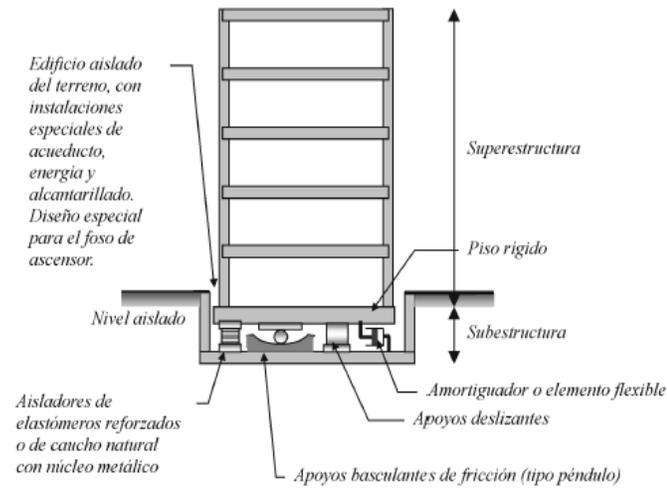
- La flexibilidad debe ser lo suficientemente alta para que se pueda alargar el período fundamental de vibración de la estructura a una zona de aceleración espectral menor, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).
- Contar con un modo de disipación de energía, tal que, la demanda sobre el sistema de aislación sea menor, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).
- Contar con una rigidez suficiente ante cargas de servicio de modo que no se produzca vibraciones molestosas, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Sistemas sísmicos. Para utilizar esta técnica se instalan los dispositivos denominados aisladores sísmicos en la base, en el nivel más bajo de la estructura, de esta manera los dispositivos absorben una cierta parte de la energía generada por el fenómeno sísmico, antes de que esta energía sea transferida a la estructura. Entre los dispositivos utilizados como aisladores

sísmicos están los aisladores flexibles y los aisladores de fricción deslizante que se los puede observar en la Figura 10, (Oviedo & Duque, 2006).

Figura 10

Diferentes técnicas de aislamiento sísmico en la base.

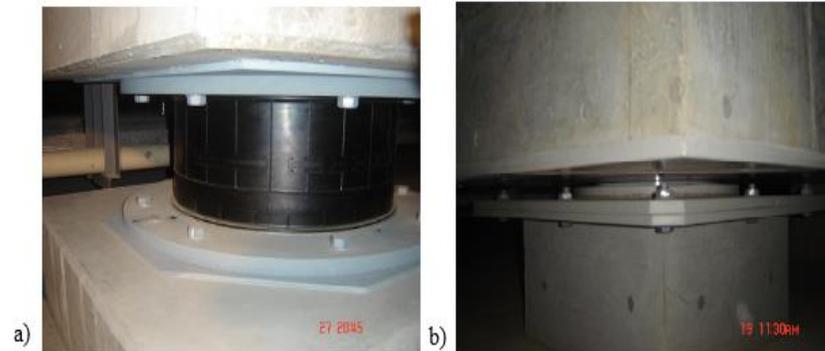


Nota. Recuperado de (Oviedo & Duque, 2006).

La reducción de energía por parte de los aisladores flexibles se da por el aumento del período de vibración de la estructura al ser alejado del período natural de vibración del piso, en la Figura 11a se puede apreciar un aislador flexible de caucho natural. Por otra parte, la reducción de energía en los aisladores de fricción se da por medio del deslizamiento entre la estructura y la cimentación, en la Figura 11b se puede observar un aislador de fricción, (Oviedo & Duque, 2006).

Figura 11

Aisladores sísmico de flexión y de fricción.

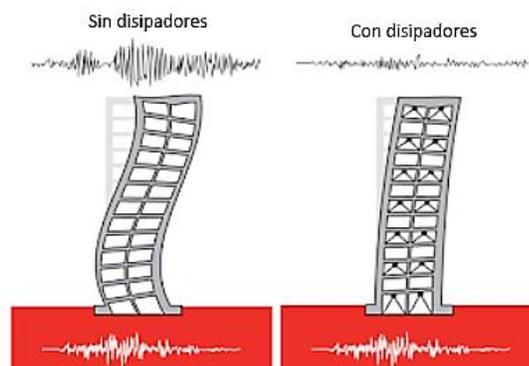


Nota. Recuperado de (Oviedo & Duque, 2006).

Disipadores de energía. Los disipadores de energía se colocan en riostras diagonales adentro de los pórticos de la estructura, como se puede ver en la Figura 12, donde los edificios con disipadores de energía tienen una menor amplitud en su frecuencia de vibración comparado con un edificio sin disipadores.

Figura 12

Edificios con y sin disipadores de energía.

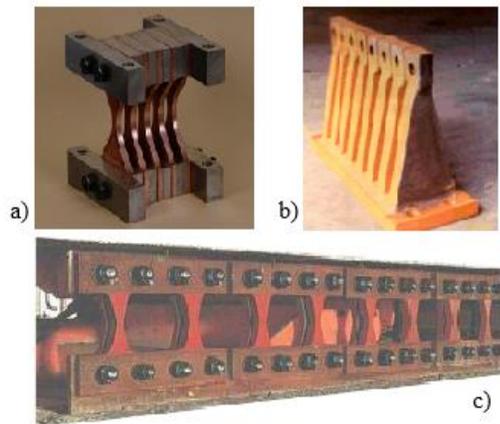


Nota. Recuperado de (Oviedo & Duque, 2006).

En la Figura 13a se puede apreciar un disipador tipo ADAS a flexión el mismo que está formado por varias placas en forma de (I) donde concentran la energía por deformación plástica. En la Figura 13b se observa un disipador tipo TADAS y en la Figura 13c un disipador de tipo panel formado por placas alineadas, (Oviedo & Duque, 2006).

Figura 13

Disipadores de energía tipo adas, tadas y panel.

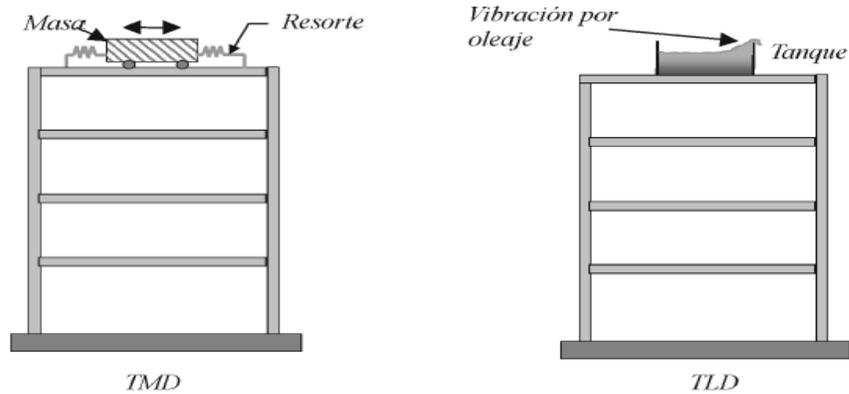


Nota. Recuperado de (Oviedo & Duque, 2006).

Amortiguadores de masa sintonizada (TMD). Esta técnica consiste en combinar una masa con la estructura para que ésta vibre con la misma frecuencia de la estructura. Si la frecuencia de la masa acoplada a la estructura coincide con la de excitación, la masa perteneciente a la estructura permanecerá inmóvil. La masa se coloca en la estructura mediante resortes y amortiguadores que inducen fuerzas opuestas a la excitación, por lo que, se disminuyen los desplazamientos causados por el fenómeno sísmico, como se puede apreciar con el dispositivo de masa sintonizada (TMD) de la Figura 14a, (Oviedo & Duque, 2006).

Figura 14

Tipos de amortiguadores de masa sintonizada.



Nota. Recuperado de (Oviedo & Duque, 2006).

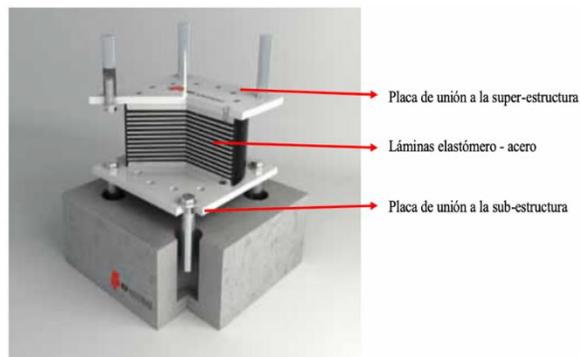
Aisladores sísmicos pasivos

Aisladores elastoméricos. Los aisladores elastoméricos son un conjunto intercalado entre láminas de elastómero y láminas de acero. Para la unión de éstas se usa un proceso de vulcanización, en el cual, se va adhiriendo las láminas de elastómero a las láminas de acero hasta alcanzar el espesor requerido del aislador sísmico. La rigidez se controla mediante el espesor de la lámina de elastómero, es decir, mientras éstas tengan más grosor mayor flexibilidad tendrá el apoyo en dirección horizontal. Las láminas de acero controlan la expansión lateral al no permitir que se expandan lateralmente las láminas de elastómero producto de la presión vertical que ejerce la columna. El comportamiento de los aisladores sísmicos elastoméricos no depende de la temperatura, frecuencia de movimiento o el envejecimiento, pero sí depende de la amplitud de deformación a la cual es sometido. Existen varios tipos de aisladores elastoméricos que se diferencian principalmente por el porcentaje de amortiguamiento que presentan debido a los materiales empleados, aditivos usados o formas de construcción de los aisladores sísmicos.

Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB). El amortiguamiento en este tipo de aisladores elastoméricos está un rango entre (2-5) %, debido al bajo porcentaje que presentan es recomendable trabajar en conjunto con disipadores de energía, ya que pueden aportar amortiguamiento adicional a las estructuras. La principal ventaja de los LDRB (Low damping rubber bearing) es que su fabricación es sencilla y sus propiedades mecánicas no son afectadas por el envejecimiento o la temperatura, consta de: láminas de elastómero unidas por un proceso de vulcanización a las láminas de acero, en su parte superior e inferior tienen dos placas de acero en donde se colocan los pernos de anclaje hacia a la superestructura y la subestructura respectivamente como se observa en la Figura 15, (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Figura 15

Aislador elastomérico LDRB.



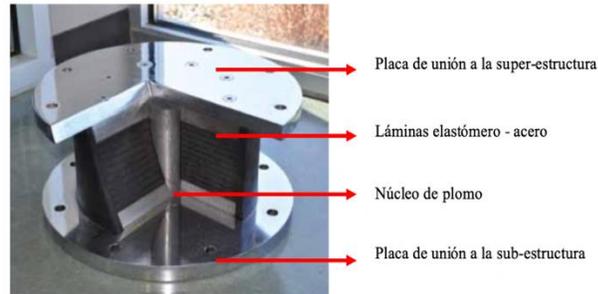
Nota. Recuperado y Adaptado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB). La fabricación de estos aisladores elastoméricos es bastante similar a los LDRB con la diferencia que las láminas de goma (elastómero) se fabrican con aditivos como el carbón, resinas, aceites, entre otros, lo cual eleva el amortiguamiento a un rango del (10-20)%, al igual que aumenta la capacidad de flexibilidad y rigidez. Su desventaja es que, a diferencia de los LDRB, éstos presentan mayor sensibilidad a la frecuencia del movimiento sísmico y a la temperatura. En los primeros ciclos de carga los HDRB (High damping rubber bearing) presentan una mayor rigidez, la cual, se estabiliza a partir del tercer ciclo. Este tipo de aisladores elastoméricos combinan la disipación con el amortiguamiento, por lo que, no es necesario agregar ningún otro método para que trabaje en conjunto en un eventual sismo, (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB). Este tipo de aisladores elastoméricos son semejantes a los LDRB con la diferencia que en el centro poseen un núcleo de plomo (Ver Figura 16), esto hace que el amortiguamiento de estos aisladores esté entre (25-30) %, es decir, un mayor rango que los anteriormente analizados. Al producirse un sismo los aisladores empiezan a deformarse lateralmente, el núcleo de plomo entra en fluencia llegando al rango plástico y a su vez disipa la energía absorbida en forma de calor, posterior al sismo el núcleo de plomo recristaliza y el elastómero regresa a su posición original. En los LRB (Lead Rubber Bearing) con la adición del núcleo de plomo se combina el amortiguamiento con la disipación de energía, esto proporciona una mejor respuesta de los aisladores en un sismo al incrementar la rigidez y reducir los desplazamientos de la estructura por el alto porcentaje de amortiguamiento que presentan (Ver Figura 17), (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Figura 16

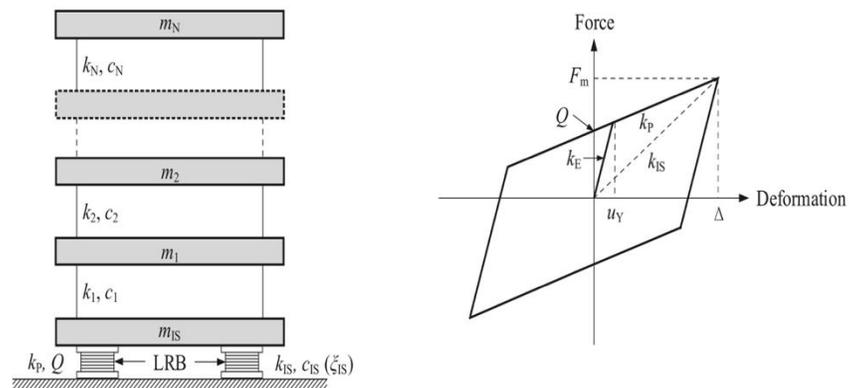
Aislador elastomérico LRB.



Nota. Recuperado y Adaptado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Figura 17

Diagrama de histéresis para los aisladores LRB.



Nota. Recuperado de (Ye, Xiao, & et al., 2019).

Estado actual de los aisladores sísmicos elastoméricos

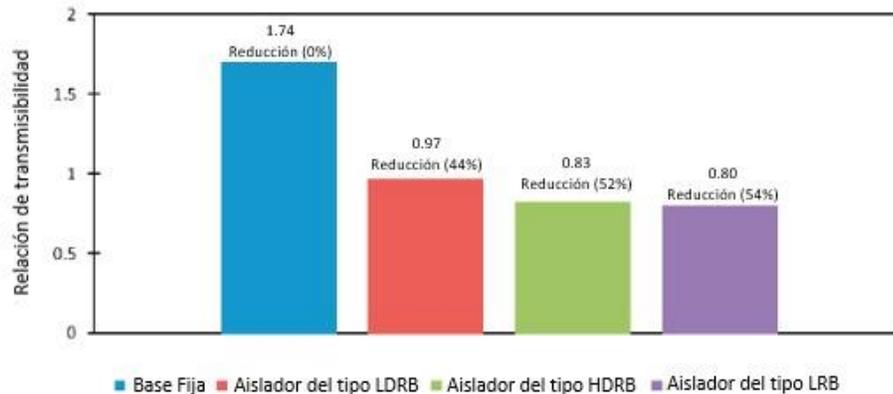
Durante los últimos cinco años este tipo de aislamiento sísmico ha sido estudiado y analizado por diferentes ingenieros, doctores y científicos, que sin duda han buscado la manera de mostrar públicamente los descubrimientos de los aisladores elastoméricos en la construcción, entre algunos destacados se pueden nombrar los siguientes estudios:

- El capítulo 20 del Manual de diseño de puentes innovadores titulado “Dispositivos de componentes sísmicos” del 2016, realizado por Agrawal A.K. y Amjadian M. del departamento

- de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de New York en Estados Unidos. Se presenta las generalidades y tipos de dispositivos para la protección sísmica, conceptos teóricos de aislación sísmica en puentes y estándares para su diseño como la norma AASHTO, demostrando que la aislación sísmica es eficaz tanto en puentes como en edificios, debido a que incrementan la ductilidad alejando su periodo natural del periodo dominante del terremoto, manteniéndolas en funcionamiento evitando pérdidas económicas.
- El artículo de la revista científica Procedía titulado “Efecto de los terremotos de campo cercano y lejano en el rendimiento de varios sistemas de aislamiento de base” del 2019, realizado por Bilal L. Khana, Muhammad Azeem, Muhammad Fawad y Muhammad Usman de la Universidad Nacional de Ciencias y Tecnología en Pakistán, y Syed H. Farooq de la Universidad de Macau en China. Esta investigación compara el desempeño de tres tipos de aisladores elastoméricos los LRDB, HDRB y LRB en una estructura de 8 pisos, analizando parámetros como: la deriva entre pisos, deriva global máxima y la transmisibilidad de la aceleración, Figura 18. Se aprecia la reducción de transferencia de aceleración de piso en un gran porcentaje comparado con una estructura fija, concluyendo que el mejor rendimiento es por parte de los aisladores LRB.

Figura 18

Comparación de transmisibilidad de aceleración de aisladores de base pasivos.

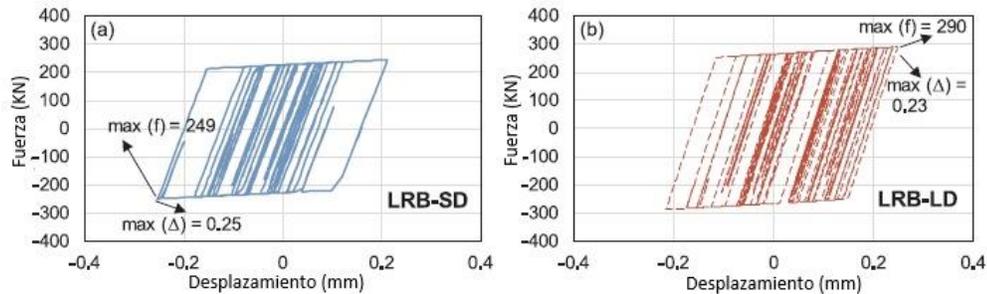


Nota. Recuperado de (Khan & et al., 2019).

- El artículo de la revista científica Ingeniería en Estructuras titulado “Influencia de la duración del movimiento del suelo y los apoyos de aislamiento en la respuesta sísmica de los puentes aislados en la base” del 2020, realizado por Afraa Labiba Hassan y AHM Muntasir Billah del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Lakehead en Canadá. Para la consecución de este estudio se analizó el comportamiento de tres tipos de aisladores diferentes, entre los que se encontraba el aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB). El estudio de estos aisladores fue un antecedente para decidir cual tendría un mejor resultado en un puente de vigas de concreto continuo de tres tramos ubicado en la provincia de Columbia Británica, Canadá. Se obtuvo una respuesta histórica del aislador LRB bajo un par de movimiento de corta y larga duración como se visualiza en la Figura 19. Se concluyó que este tipo de aisladores bajo un estado de larga duración son susceptibles a grandes desplazamientos residuales que frenaría la correcta funcionalidad del puente ante la presencia del sismo.

Figura 19

Respuesta histérica de LRB bajo movimientos de corta duración SD y larga duración LD.

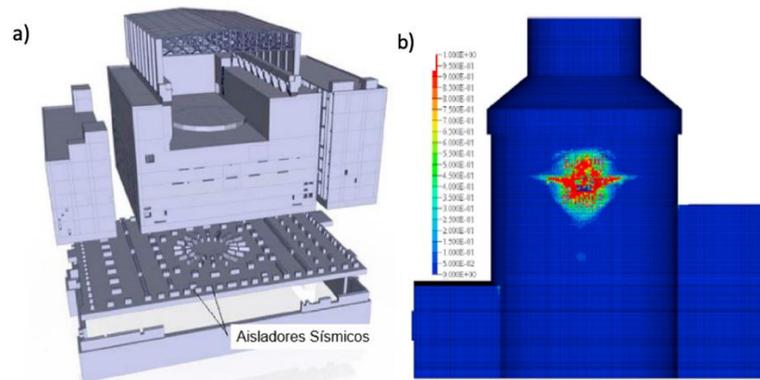


Nota. Recuperado de (Hassan & Billah, 2020).

- El artículo de la revista científica Progreso en Energía Nuclear titulado “Evaluación de la respuesta a vibraciones de centrales nucleares de tercera generación con tecnología de aislamiento ante gran impacto de aviones comerciales” del 2020, realizado por Runyu Mei, Jianbo Li & Gao Lin de la Universidad tecnológica de Dalian en China y Rong Pan & Xiuyun Zhu del Centro de Seguridad Nuclear y Radiología de Beijing en China. Este estudio aborda la respuesta dinámica de una central nuclear aislada en la base con aisladores sísmicos de tipo LRB (Ver Figura 20a). Para este estudio se planteó que la central sea sometida al impacto de un avión comercial Airbus A340-300 (ver Figura 20b). El motivo de este planteamiento fueron los atentados del 11 de septiembre del 2001 en Estados Unidos. La conclusión fue que la velocidad del avión afecta directamente la respuesta de vibración del edificio, además se determinó que para el diseño de los aisladores hay que tomar muy en cuenta la rigidez horizontal, el amortiguamiento horizontal y la distribución de masa.

Figura 20

Central nuclear de tercera generación.



Nota. a) Central nuclear de tercera generación con aislación sísmica. b) Distribución de daños de una central nuclear aislada en la base con respecto a la velocidad de impacto de la aeronave de 200m/s. Recuperado de (Mei & et al., 2020)

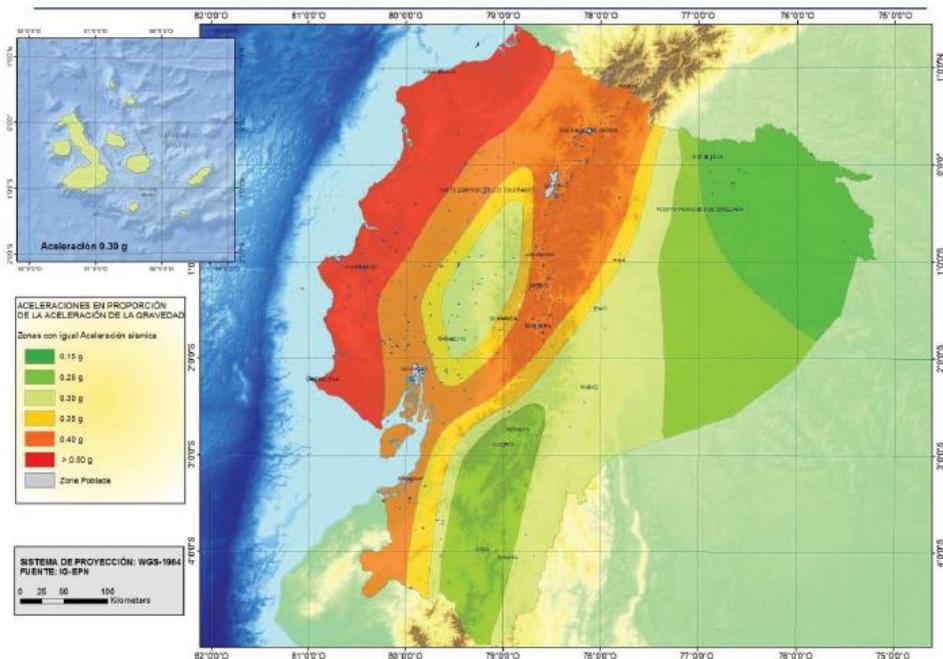
Normas de diseño

Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). En la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) se presentan los diferentes requerimientos y metodologías que se deben aplicar en un diseño sismo resistente para diferentes tipos de estructuras, ésta se complementa con normas extranjeras. En esta norma se pone a disposición de los diseñadores diferentes herramientas de cálculo para que puedan tomar la mejor decisión en la etapa de diseño, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015). El objetivo de la NEC es disminuir los riesgos sísmicos a niveles aceptables para la sociedad ecuatoriana. Lo establecido en dicha norma es de cumplimiento obligatorio en todo el país, para así evitar en lo posible la pérdida de vidas impidiendo el colapso de las infraestructuras, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Zonificación sísmica y factor de zona (Z). Para las edificaciones comunes se utiliza el valor de Z, éste representa la aceleración máxima esperada para el sismo de diseño, mismo que es expresada como fracción de la gravedad. El valor del factor Z se define con ayuda de la Figura 21 y la Tabla 1, dependiendo del sitio donde se construirá la estructura, como se puede ver la mayor parte del territorio ecuatoriano está declarado como de alto riesgo sísmico, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Figura 21

Zonas sísmicas en el Ecuador.



Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Tabla 1

Valores del factor z con respecto a la zona sísmica.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	$\geq 0,5$
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Cortante basal de diseño. Para obtener las cargas por sismo, importantes para el diseño de los aisladores sísmicos, se calculará el cortante basal que afecta a la estructura.

$$V = \frac{I S_a}{R \phi_P \phi_E} W$$

Donde se tiene que:

- I : Coeficiente de importancia
- S_a : Espectro de diseño en aceleración
- R : Factor de reducción de resistencia sísmica
- ϕ_P : Coeficiente de configuración en plano
- ϕ_E : Coeficiente de configuración en elevación
- W : Carga sísmica reactiva

Disposiciones Recomendadas para Regulaciones Sísmicas para Nuevos Edificios y Otras Estructuras, (FEMA 450). La Agencia Federal para la Gestión de Emergencias, por sus siglas en inglés FEMA, es una agencia de los Estados Unidos de América encargada de dar respuesta a terremotos, inundaciones, huracanes y a todo tipo de desastres naturales. FEMA

conjuntamente con el Programa Nacional de Reducción de Riesgos de Terremotos, por sus siglas en inglés NEHRP, con el propósito de alentar las prácticas de diseño y construcción que aborden el peligro sísmico, disminuir el riesgo de daños y lesiones durante un sismo, han desarrollado el código NEHRP Disposiciones Recomendadas para Regulaciones Sísmicas para Nuevas Edificaciones y Otras Estructuras (FEMA 450), donde abordan todo lo correspondiente al estudio y comportamiento de los sismos, diseño de estructuras sismo resistentes, estructuras aisladas sísmicamente y construcción de las mismas, (Federal Emergency Management Agency, 2003).

Cargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras (ASCE). La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, por sus siglas en inglés ASCE, es un colegio profesional de ingenieros civiles que es reconocida a nivel mundial y fue fundada en el año de 1852. La ASCE desarrolló el estándar Cargas Mínimas de Diseño para Edificaciones y Otras Estructuras, ASCE por sus siglas en inglés, mismo que ha sido acreditado por el Instituto Nacional Americano de Estándares, ANSI por sus siglas en inglés. Este estándar aborda todo lo correspondiente con procedimientos de análisis y diseño sísmico que deben ser utilizados por los profesionales al momento de diseñar y construir edificaciones, preservando la salud, seguridad y bienestar de todos los involucrados, siendo la última publicación en el año 2016, (American Society of Civil Engineers, 2016).

Instituto Chileno de Normalización – Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica (prNCh2745). La norma prNCh2745 es el resultado del trabajo de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica, por sus siglas en español ACHISINA, inspirados en lo sucedido por los terremotos de Northridge en 1994, Kobe en 1995, Maule en 2010 y Tohoku en 2011. Esta norma indica requisitos para el análisis, así como para el diseño sísmico de edificaciones con su respectiva aislación sísmica, por otra parte, indica los requisitos para el diseño de los elementos no estructurales que serán soportados por la edificación además de los ensayos que

se requieren para el sistema de aislación, cabe recalcar que la norma prNch2745 no incluye el diseño de la edificación que se apoyará sobre el sistema de aislación, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Definición de conceptos fundamentales

Base de la estructura. Nivel al cual la estructura se ve afectada por la acción sísmica, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Cargas permanentes (cargas muertas). Estas cargas la conforman todos los elementos estructurales que por su naturaleza de construcción no se los puede modificar o mover de su lugar original, esto lo conforman: paredes, instalaciones eléctricas, sanitarias, mecánicas, pisos, materiales de construcción, entre otros, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Carga viva. Se la conoce también como sobre carga de uso y es dependiente del tipo de ocupación al cual estará destinada la estructura, esto lo conformará: accesorios y equipos móviles o temporales, el peso de las personas, entre otros, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Cortante basal de diseño. Sumatoria total de las cargas laterales que se aplica en la base de la edificación como resultado de la acción sísmica, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Deriva de piso. Factor entre el desplazamiento lateral del piso superior con respecto al piso inferior por la acción de una fuerza lateral, esto se mide ubicando dos puntos en una misma línea vertical, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Desplazamiento de diseño. Este desplazamiento se usa para diseñar el sistema de aislamiento y no considera el desplazamiento por torsión, ya que, únicamente considera el desplazamiento lateral provocado por un sismo, (American Society of Civil Engineers, 2016).

Desplazamiento total de diseño. Considera el desplazamiento por torsión y el desplazamiento lateral provocado por el sismo, se usa para el diseño del sistema de aislamiento o algún elemento de éste, (American Society of Civil Engineers, 2016).

Desplazamiento total máximo. Considera el desplazamiento total de diseño para verificar la estabilidad del sistema de aislamiento, pruebas de carga verticales para los aisladores y diseño de separaciones de las estructuras, (American Society of Civil Engineers, 2016).

Ductilidad global. Es la capacidad de la estructura para deformarse ante cargas laterales estáticas o cíclicas, sin perder sus propiedades de resistencia o rigidez, incluso cuando entra en el rango elástico , (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Factor de sobre resistencia. Relación entre el cortante basal último capaz de soportar la estructura y el cortante basal de diseño, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Fuerzas sísmicas de diseño. Es la distribución adecuada del cortante basal en fuerzas laterales en toda la estructura , (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Período de vibración. Es el tiempo que transcurre hasta que se complete un ciclo completo en un movimiento vibratorio para que un sistema afectado por dicho movimiento recupere su posición original, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Período de vibración fundamental. Es el período más importante en una estructura, ya que es el mayor período al cual se ve sometida durante un sismo, por lo general, se encuentra en la base de la edificación, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

PGA (Peak ground acceleration). Es la máxima aceleración sísmica que se produce en el terreno, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Rigidez efectiva. Es la relación entre la masa, rigidez y período de sistemas con un grado de libertad, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Sistemas de control de respuesta sísmica. Son dispositivos que se colocan en conjunto, modifican la respuesta dinámica de la estructura durante un sismo, de esta forma controlan y disipan la energía del sismo protegiendo a la edificación de severos daños. Se pueden clasificar en: Aisladores sísmicos, Sistemas de Control y Disipación Pasiva y/ó Activa de Energía, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Z (factor). Es el valor de máxima aceleración sísmica que representa a cada zona, es representado como fracción de la aceleración de la gravedad, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Zonas sísmicas. El Ecuador continental se encuentra dividido en 6 zonas sísmicas de acuerdo a la NEC-SE-DS, la zona con mayor peligrosidad sísmica es el litoral, sin embargo, la mayor parte del país se encuentra bajo amenaza constante de sismos con magnitudes considerables, (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Capítulo III

Diseño y fabricación

Definición del modelo de estructura a ser analizada

La estructura para analizar en el presente proyecto es una estructura unifamiliar de dos pisos construida con estructura de acero, como se puede ver en la Figura 22. Las paredes de la casa son de bloque alivianado, el techo contará con cielo falso y en la base se colocarán 13 aisladores sísmicos fabricados a base de elastómeros.

Figura 22

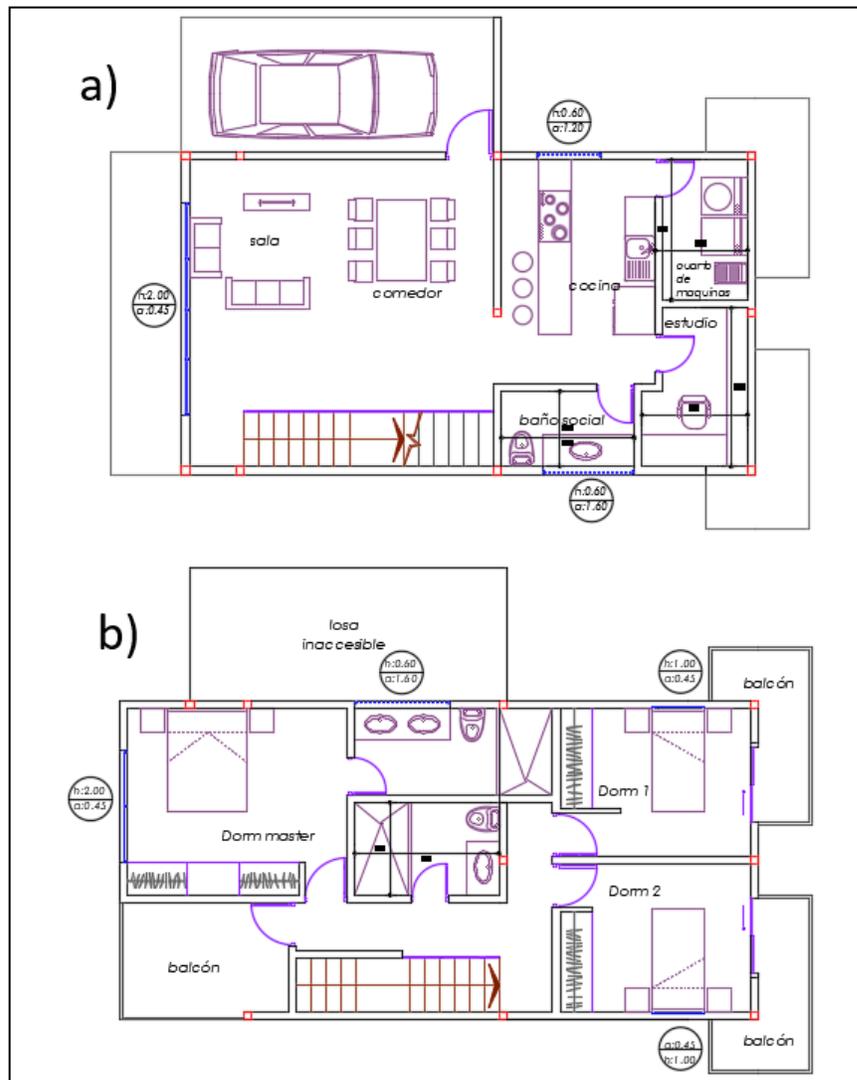
Modelo de estructura unifamiliar.



Dicha estructura es una casa que cuenta con todos los espacios necesarios para hacerla habitable y cómoda, como son tres dormitorios, tres baños, una cocina, gradas de primer a segundo piso, una sala, un comedor, tres balcones, un cuarto de máquinas, un estudio y un estacionamiento, espacios que se pueden observar en la Figura 23, conjuntamente con las ventanas y puertas.

Figura 23

División de espacios en el interior de la casa: a) planta baja de la casa. b) planta alta de la casa.



Características de los materiales

Características del acero. El acero es un conjunto de aleaciones, entre las más importantes están el hierro (Fe), el carbono (C), el silicio (Si) y el Zinc (Zn). Para su fabricación, al hierro se le añade una cantidad de carbono que no debe superar un 2% del total, el porcentaje

dependerá del grado que se requiera. Este proceso se realiza en hornos que mantienen los metales líquidos para ser mezclados y luego ser enfriados en moldes.

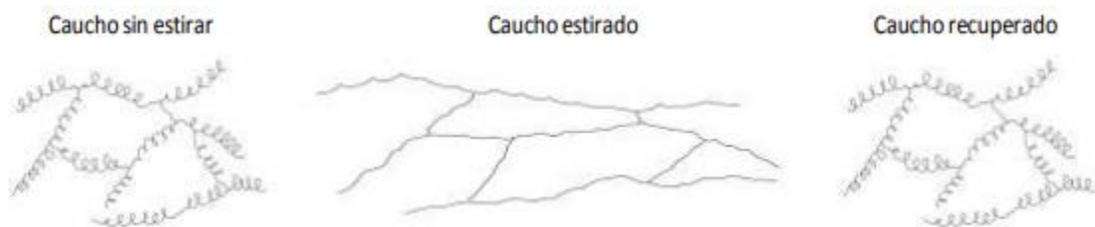
Las propiedades del acero varían dependiendo de su composición, entre sus características más importantes están:

- Densidad de 7850 (kg/m³).
- Temperatura de fusión cercana a los 1685 [°C].
- Material muy tenaz.
- Material dúctil.

Características del elastómero. Los elastómeros son el conjunto de materiales formados por polímeros termoestables que se unen gracias a enlaces químicos formando una estructura reticulada como se visualiza en la Figura 24.

Figura 24

Estructura reticulada de elastómeros.



Nota. Recuperado de (Varón & et al., 2012).

Entre las características más relevantes de los elastómeros podemos encontrar:

- No se pueden derretir.
- Son altamente flexibles y elásticos.
- Presentan menor resistencia a la fluencia que los plásticos.

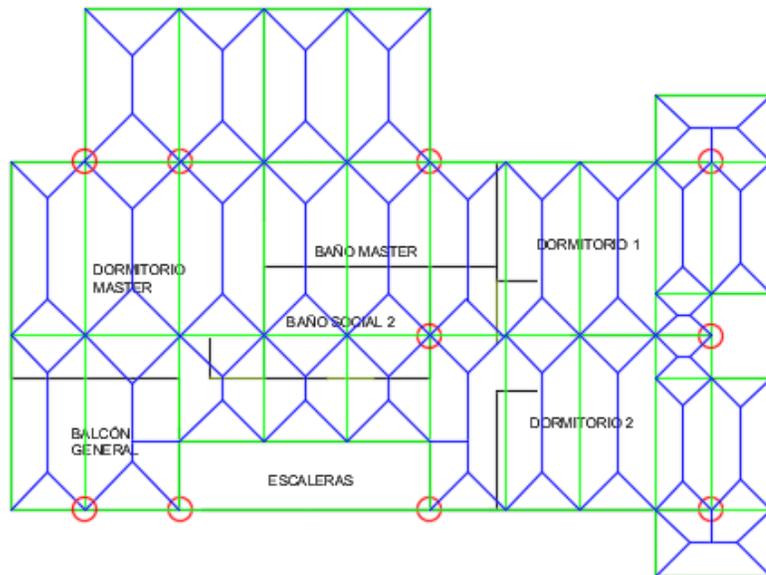
- Son insolubles.

Determinación de las cargas

Para el cálculo de las cargas se aplicó el método de áreas cooperantes por trapecios, donde se dividió a cada espacio entre vigas en triángulos y trapecios, como se ve en la Figura 25, donde las líneas en verde representan a las vigas, las líneas azules son la división del área y los círculos rojos representan las columnas. Cada una de las vigas que conforman la parte estructural será cargada de forma distribuida con las cargas muertas y vivas.

Figura 25

División del piso superior para el cálculo de cargas sobre las vigas.



Cargas muertas. Entre las cargas muertas se ha considerado las siguientes:

Tabla 2

Cargas muertas a considerar en la estructura.

DENOMINACIÓN	PESO (kg/m ²)
LOSA PLANTA BAJA	
Cerámica – baldosa, marca ECUACERAMICA	17,8
Deck metálico espesor 0.76 (mm), marca NOVACERO	7,47
Hormigón con un volumen de 0.075 (m ³ /m ²)	180
Hidrosanitario y parte eléctrica	10
Mampostería y muebles	200
LOSA PLANTA SUPERIOR	
Cerámica – baldosa, marca ECUACERÁMICA	17,8
Deck metálico espesor 0.65 (mm), marca NOVACERO	6,38
Hormigón con un volumen de 0.075 (m ³ /m ²)	180

DENOMINACIÓN	PESO (kg/m ²)
LOSA PLANTA SUPERIOR	
Hidrosanitario y parte eléctrica	10
Mampostería y muebles	200
Cielo falso, marca KEVÓ	2,89
BALCONES	
Cerámica – baldosa, marca ECUACERÁMICA	17,8
Deck metálico espesor 0.65 (mm), marca NOVACERO	6,38
Hormigón con un volumen de 0.075 (m ³ /m ²)	180
Hidrosanitario y parte eléctrica	10
Mampostería y muebles	100
LOSA PLANTA SUPERIOR - TECHO	
Deck metálico espesor 1 (mm), marca NOVACERO	9,82
Hormigón con un volumen de 0.075 (m ³ /m ²)	180
Hidrosanitario y parte eléctrica	10
Cielo falso, marca KEVÓ	2,89

Nota. Valores obtenidos de varios catálogos de industrias ecuatorianas.

Ejemplo de cálculo:

Longitud de la viga L9 – IPE 300(Ver Figura 26): 2,58 (m)

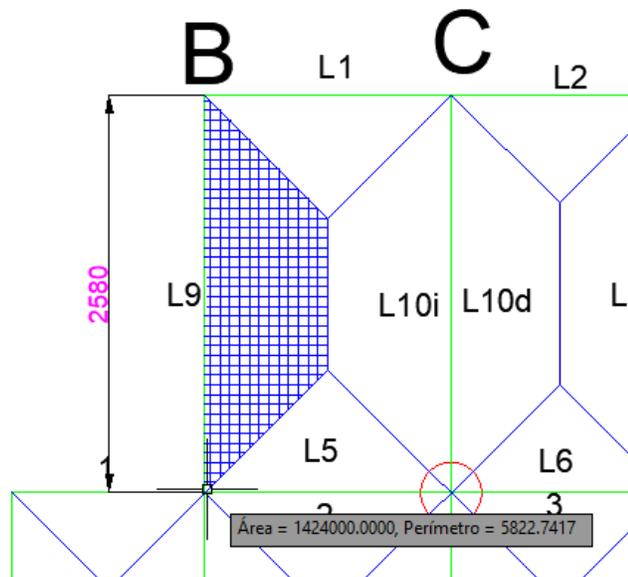
Área cooperante: 1,424 (m²)

Carga muerta de la planta superior (sumatoria de todas las cargas muertas consideradas sobre la losa superior): 417,07 (kg/m²)

$$CM_{vigaL} = \frac{\text{Área} * \text{Carga}}{\text{Longitud}} = 230,20 \left(\frac{kg}{m} \right)$$

Figura 26

Longitud de la viga l y su área cooperante.



Cargas vivas. Entre las cargas vivas obtenidas de ASCE 7-16 se ha considerado las siguientes:

Tabla 3

Cargas vivas a considerar en la estructura.

DENOMINACIÓN	PESO (KN/m ²)
Sala	4,79
Cocina	4,79
Comedor	4,79
Lavandería	1,92
Estudio	1,92
Baño	1,92
Escaleras	1,92
Dormitorio	1,92
Corredor	1,92
Balcón	4,79
Granizo	1

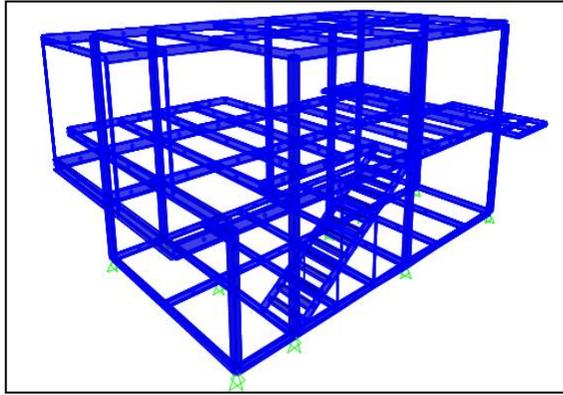
Nota. Obtenido de (American Society of Civil Engineers, 2016)

Modelamiento del tipo de estructura

La estructura unifamiliar ha sido modelada en un software estructural, en la Figura 27 se puede observar la primera parte del modelamiento que representa a toda la geometría de la estructura.

Figura 27

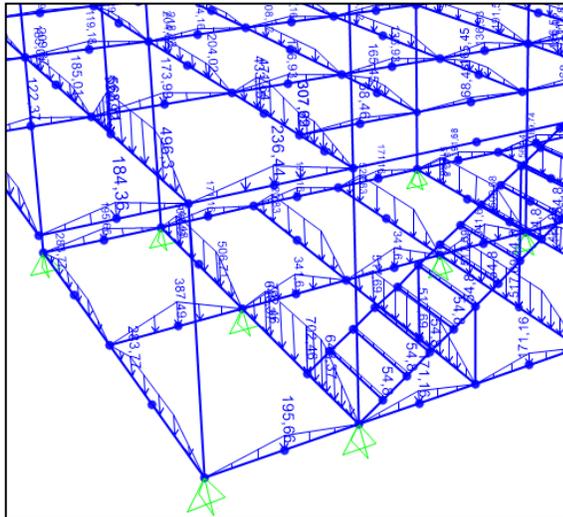
Modelo geométrico de la estructura.



En la segunda parte se colocan las cargas tanto vivas y muertas en cada una de las vigas que conforman la estructura como se observa en la Figura 28.

Figura 28

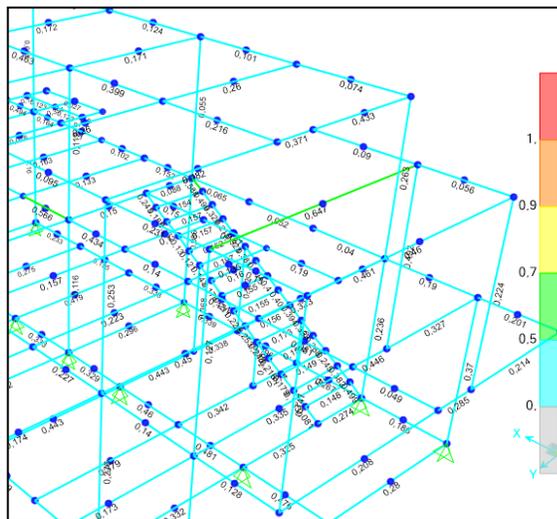
Vigas cargadas de forma distribuida.



En tercer lugar, se verifica la demanda – capacidad en cada uno de los elementos de la estructura como lo muestra la Figura 29, procurando que ningún elemento tenga una demanda superior a su capacidad.

Figura 29

Demanda – capacidad de los elementos de la estructura.



A continuación, como cuarto paso se verifica la serviciabilidad de la estructura, evaluando la deflexión en cada una de las vigas, como lo dicta el Código Internacional de la Construcción – 2009 (IBC por sus siglas en inglés), sometiendo a la estructura solo a las cargas vivas y verificando que la deflexión en cada viga no supere un valor de $L/360$ (valor en mm), como se visualiza en la Figura 30.

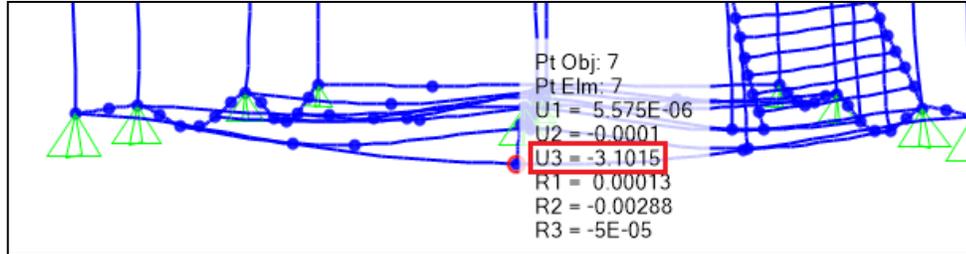
Ejemplo de cálculo en la viga IPE 160

Longitud de la viga: 5850 (mm)

Deflexión permitida: $\frac{L}{360} = \frac{5850 \text{ mm}}{360} = 16.25 \text{ mm}$

Figura 30

Verificación de la deflexión.



Diseño del prototipo de aislador sísmico

Coefficientes según el terreno y el desplazamiento inicial.

Aceleración mapeada.

Figura 31

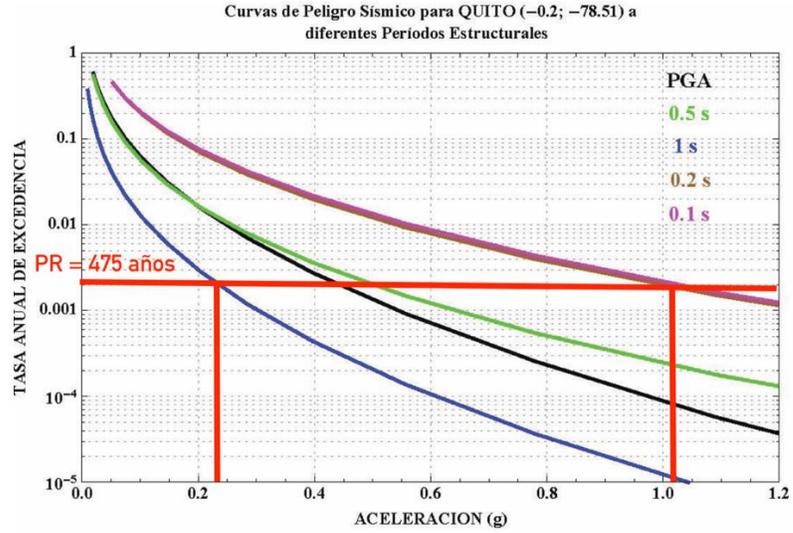
Niveles de amenaza sísmica.

Nivel de sismo	Sismo	Probabilidad de excedencia en 50 años	Período de retorno T_r (años)	Tasa anual de excedencia ($1/T_r$)
1	Frecuente (menor)	50%	72	0.01389
2	Ocasional (moderado)	20%	225	0.00444
3	Raro (severo)	10%	475	0.00211
4	Muy raro* (extremo)	2%	2 500	0.00040

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Figura 32

Curvas de peligro sísmico para Quito.



Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

$$S_S = 1,02 \text{ g}$$

$$S_1 = 0,23 \text{ g}$$

Clasificación del sitio.

Figura 33

Clasificación del sitio.

D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Coeficientes F_a y F_d .

Figura 34

Coeficiente F_a según el tipo de suelo.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

$$F_a = 1,2$$

Figura 35

Coeficiente F_d según el tipo de suelo.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

$$F_d = 2,0$$

Aceleración para el sismo máximo considerado.*(American Society of Civil Engineers, 2016).*

$$S_{MS} = F_a \times S_S$$

$$S_{MS} = 1,2 \times 1,02 \text{ g}$$

$$S_{MS} = 1,22 \text{ g}$$

$$S_{M1} = F_a \times S_1$$

$$S_{M1} = 2,0 \times 0,23 \text{ g}$$

$$S_{M1} = 0,4 \text{ g}$$

Aceleración para el sismo de diseño.*(American Society of Civil Engineers, 2016).*

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS}$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times 1,22 \text{ g}$$

$$S_{DS} = 0,81 \text{ g}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times 0,46 \text{ g}$$

$$S_{D1} = 0,31 \text{ g}$$

Coefficiente de amortiguamiento.

Tipo aislador: Aislador elastomérico sin núcleo de plomo tipo LDRB

Figura 36*Coefficientes de amortiguación.***Table 17.5-1 Damping Coefficient, B_D or B_M**

Effective Damping, β_D or β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_D or B_M Factor
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥50	2.0

^aThe damping coefficient shall be based on the effective damping of the isolation system determined in accordance with the requirements of Section 17.8.5.2.

^bThe damping coefficient shall be based on linear interpolation for effective damping values other than those given.

Nota. Recuperado de (American Society of Civil Engineers, 2016).

$$B_D = 1,0$$

Desplazamiento inicial o estimado.

(American Society of Civil Engineers, 2016).

$$T_D = 1,0 [s]$$

$$D = \frac{g \times S_{D1} \times T_D}{4 \times \pi^2 \times B_D}$$

$$D = \frac{9,81 \times 0,31 \times 1,0}{4 \times \pi^2 \times 1,0}$$

$$D = 0,080 [m]; 8,0 [cm]; 80 [mm]$$

Propiedades del material.

Para el elastómero virgen que se usará en la construcción se tendrá propiedades mecánicas con límites como se especifica a continuación:

Módulo de Corte

	LOWER	UPPER	
G	4,5	5,5	[Kg/cm ²]

Constante del material

$$K = 20000 [Kg/cm^2]$$

Esfuerzo a compresión de la goma

$$\sigma_{cg} = 90 [Kg/cm^2]$$

Amortiguamiento

$$\beta = 5 [\%]$$

Cargas necesarias para el diseño del aislador sísmico elastomérico.

Carga muerta total de la estructura

$$P_D = 541,23 \text{ [KN]}$$

$$P_D = 541230 \text{ [N]}$$

Carga viva total de la estructura

$$P_L = 368,68 \text{ [KN]}$$

$$P_L = 368680 \text{ [N]}$$

Gravedad

$$g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Carga muerta de la columna crítica

$$P_{D_{cc}} = 67,37 \text{ [KN]}$$

$$P_{D_{cc}} = 67370 \text{ [N]}$$

Carga viva de la columna crítica

$$P_{L_{cc}} = 34,09 \text{ [KN]}$$

$$P_{L_{cc}} = 34090 \text{ [N]}$$

Peso sísmico efectivo de la estructura

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

$$P_d = P_D + 0,25 \times P_L$$

$$P_d = 541,23 + 0,25 \times 368,68$$

$$P_d = 633,4 \text{ [KN]}$$

$$P_d = 633400 \text{ [N]}$$

Masa sísmica de la estructura

$$M = \frac{P_d}{g}$$

$$M = \frac{633400[N]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

$$M = 64566,77 [Kg]$$

Peso máximo presente en la estructura (columna crítica)

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

$$P_{max} = P_{Dcc} + P_{Lcc}$$

$$P_{max} = 67,37 + 34,09$$

$$P_{max} = 101,46 [KN]$$

$$P_{max} = 101460 [N]$$

$$P_{max} = 10342,51 [Kg]$$

Dimensionamiento.

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

Diámetro mínimo necesario según la máxima carga.

$$A_{min} = \frac{P_{max}}{\sigma_{cg}}$$

$$A_{min} = \frac{10342,51 [Kg]}{90 [Kg/cm^2]}$$

$$A_{min} = 114,92 [cm^2]$$

$$\Phi_{min} = \sqrt{\frac{A_{min} \times 4}{\pi}}$$

$$\Phi_{min} = \sqrt{\frac{114,92 \times 4}{\pi}}$$

$$\Phi_{min} = 12,1 [cm]$$

Pre-dimensionamiento. En el paso anterior se obtuvo el diámetro mínimo que debe tener el aislador. Cabe recalcar que se debe tener en consideración las dimensiones de la columna para dimensionar el diámetro del aislador, de forma que presente una sensación de seguridad y éste no sea menor a las dimensiones de la columna. Este proceso es iterativo ya que se deberá comprobar que las dimensiones que se están dando cumplan con varios requisitos que más adelante se irán presentando, caso contrario se debe cambiar las dimensiones hasta cumplir con todas las condiciones.

Resultado finales de las iteraciones realizadas:

$$\Phi_{ais} = 200 [mm]$$

$$t_e = 6 [mm]$$

$$t_s = 2 [mm]$$

$$t_{tp}, t_{bp} = 25 [mm]$$

$$t_{ec} = 10 [mm]$$

$$N_{ais} = 13$$

Altura de las capas de elastómero.

$$T_r = \frac{D}{\gamma_s}$$

$$\gamma_s = 1,5$$

$\gamma_s \rightarrow$ Módulo de tensión vertical generalmente usado en aisladores elastoméricos

$$T_r = \frac{80 [mm]}{1,5}$$

$$T_r = 53,33 [mm]$$

Número de las capas de elastómero.

$$N_e = \frac{T_r}{t_e}$$

$$T_r = 54 [mm]$$

$T_r \rightarrow$ Se usará 54 [mm] por motivos de espesores comerciales y facilidad de fabricación

$$N_e = \frac{54 [mm]}{6 [mm]}$$

$$N_e = 9$$

Número de las láminas de acero.

$$N_s = N_e - 1$$

$$N_s = 9 - 1$$

$$N_s = 8$$

Altura total del aislador sin las placas de anclaje.

$$H_T = N_s \times t_s + N_e \times t_e$$

$$H_T = 8 \times 2 [mm] + 9 \times 6 [mm]$$

$$H_T = 70 [mm]$$

Propiedades geométricas del aislador.

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

Área del aislador.

$$A_{\phi} = \frac{\pi \times \phi_{ais}^2}{4}$$

$$A_{\phi} = \frac{\pi \times 200^2}{4}$$

$$A_{\phi} = 31415,93 [mm^2]$$

$$A_{\phi} = 314,16 [cm^2]$$

Perímetro del aislador.

$$p = \pi \times \phi_{ais}$$

$$p = \pi \times 200 [mm]$$

$$p = 628,32 [mm]$$

$$p = 62,83 [cm]$$

Factor de forma.

$$S = \frac{\phi_{ais}}{4 \times t_e}$$

$$S = \frac{200}{4 \times 6}$$

$$S = 8,33$$

Momento de Inercia.

$$I = \frac{\pi \times \phi_{ais}^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi \times 200^4}{64}$$

$$I = 78539816,34 [mm^4]$$

Análisis bilineal

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

NOTA: El ejemplo de cálculo en cada paso de aquí en adelante se lo realizará para la propiedad mecánica inferior del elastómero, sin embargo, se colocarán ambos resultados.

i. Rigidez de pos-fluencia

$$K_p = \frac{G \times A_{ais}}{T_r}$$

$$K_p = \frac{0,045 \left[\frac{Kg}{mm^2} \right] \times 31415,93 [mm^2]}{54 [mm]}$$

	LOWER	UPPER	
K_p	26,18	32	[Kg/mm]

ii. Fuerza característica

$$D_y = 25 [mm]$$

$D_y \rightarrow$ Desplazamiento de fluencia usado en aisladores elastoméricos (Constantinou, et al.)

$$Q_d = \frac{\pi \times \beta \times K_p \times D^2}{(2 - \pi \times \beta)D - 2 D_y}$$

$$Q_d = \frac{\pi \times 0,05 \times 26,18 \left[\frac{Kg}{mm} \right] \times (80 [mm])^2}{(2 - \pi \times 0,05) 80 [mm] - 2 \times (25 [mm])}$$

	LOWER	UPPER	
Q_d	270,12	330,17	[Kg]

iii. Fuerza de fluencia

$$F_y = Q_d + K_p \times D_y$$

$$F_y = 270,12 [Kg] + 26,18 \left[\frac{Kg}{mm} \right] \times 25 [mm]$$

	LOWER	UPPER	
F_y	924,62	1130,17	[Kg]

iv. Rigidez elástica

$$K_e = \frac{F_y}{D_y}$$

$$K_e = \frac{924,62 [Kg]}{25 [mm]}$$

	LOWER	UPPER	
K_e	36,98	45,21	[Kg/mm]

v. Rigidez efectiva

$$K_{EF} = K_p + \frac{Q_d}{D}$$

$$K_{EF} = 26,18 \left[\frac{Kg}{mm} \right] + \frac{270,12 [Kg]}{80 [mm]}$$

	LOWER	UPPER	
K_{EF}	29,56	36,13	[Kg/mm]

- vi. Energía disipada en el primer ciclo de histéresis por un aislador

$$E_D = 4 \times Q_d (D - D_y)$$

$$E_D = 4 \times 270,12 \text{ [Kg]} \times (80 \text{ [mm]} - 25 \text{ [mm]})$$

	LOWER	UPPER	
E_D	59426,4	72637,4	[Kg mm]

- vii. Propiedades del sistema de aislación

$$K_{ps} = K_p \times N_{ais}$$

	LOWER	UPPER	
K_{ps}	340,34	416	[Kg/mm]

$$Q_{ds} = Q_d \times N_{ais}$$

	LOWER	UPPER	
Q_{ds}	3511,56	4292,21	[Kg]

$$F_{ys} = F_y \times N_{ais}$$

	LOWER	UPPER	
F_{ys}	12020,06	14692,21	[Kg]

$$K_{es} = K_e \times N_{ais}$$

	LOWER	UPPER	
K_{es}	480,74	587,73	[Kg/mm]

$$K_{EFs} = K_{EF} \times N_{ais}$$

	LOWER	UPPER	
K_{EFs}	384,28	469,69	[Kg/mm]

viii. Período efectivo del sistema

$$T_{EF} = 2 \times \pi \sqrt{\frac{M}{g \times K_{FEs}}}$$

$$T_{EF} = 2 \times \pi \sqrt{\frac{64566,77 [Kg]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right] \times 384,28 \left[\frac{Kg}{mm}\right]}}$$

	LOWER	UPPER	
T_{EF}	0,82	0,74	[s]

ix. Amortiguamiento efectivo del sistema

$$\beta_{EF} = \frac{2 \times Q_{ds} \times (D - D_y)}{\pi \times K_{FEs} \times D^2}$$

$$\beta_{EF} = \frac{2 \times 3511,56 [Kg] \times (80 [mm] - 25 [mm])}{\pi \times 384,28 \left[\frac{Kg}{mm}\right] \times (80 [mm])^2}$$

	LOWER	UPPER
β_{FEs}	0,05	0,05

Usando nuevamente la tabla del punto 3.5.1.6 se vuelve a encontrar un nuevo coeficiente de amortiguamiento.

$$B_D = 1,0$$

x. Desplazamiento por sismo de diseño

$$D_D = \frac{g \times S_{D1} \times T_{EF}}{4 \times \pi^2 \times B_D}$$

$$D_D = \frac{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times 0,31 \times 0,82 [s]}{4 \times \pi^2 \times 1,0}$$

	LOWER	UPPER	
D_D	0,063	0,057	[m]
	6,3	5,7	[cm]
	63	57	[mm]

El desplazamiento de diseño debe ser lo más cercano posible al desplazamiento propuesto en el punto 3.5.1.7, siempre y cuando se cumplan todas las condiciones que se analizarán a continuación.

xi. Desplazamiento total por sismo de diseño

El desplazamiento total por sismo de diseño incluye desplazamientos adicionales causados por la torsión natural y accidental, de acuerdo, a la distribución del sistema de aislación considerando su rigidez lateral y la excentricidad menos favorable.

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

En todo caso el desplazamiento total por sismo de diseño no puede ser menor que 1,1 veces el desplazamiento de diseño.

$$D_{TD} = 1,1 \times D_D$$

$$D_{TD} = 1,1 \times 0,063 [m]$$

	LOWER	UPPER	
D_{TD}	0,0693	0,0627	[m]
	6,93	6,27	[cm]

	69,3	62,7	[mm]
--	------	------	------

Parámetros adicionales

- i. Módulo de elasticidad del conjunto acero-elastómero

$$E_C = \left(\frac{1}{6 \times G \times S^2} + \frac{4}{3 + K} \right)^{-1}$$

$$E_C = \left(\frac{1}{6 \times 4,5 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \times 8,33^2} + \frac{4}{3 + 20000 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]} \right)^{-1}$$

	LOWER	UPPER	
E_C	1362,9	1570,64	[Kg/cm ²]

- ii. Rigidez vertical

$$K_V = \frac{E_C \times A_\phi}{T_r}$$

$$K_V = \frac{1362,9 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \times 314,16 [cm^2]}{5,40 [cm]}$$

	LOWER	UPPER	
K_V	79290,32	91376,14	[Kg/cm]

- iii. Frecuencia horizontal

$$f_H = \frac{1}{T_{EF}}$$

$$f_H = \frac{1}{0,82 [s]}$$

	LOWER	UPPER	
f_H	1,22	1,35	[Hertz]

iv. Frecuencia vertical

$$\frac{f_V}{f_H} = \sqrt{\frac{E_c}{G}}$$

$$f_V = 1,22 \times \sqrt{\frac{1362,9 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]}{4,5 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]}}$$

CONDICIÓN

$$f_V > 10$$

	f_V [HERTZ]	CUMPLE
LOWER	21,23	SI
UPPER	22,81	SI

v. Rigidez horizontal del sistema

$$K_{Hs} = \left(\frac{4 \pi^2 \times M}{T_{EF}^2 \times g} \right)$$

$$K_{Hs} = \left(\frac{4 \pi^2 \times 64566,77 [Kg]}{(0,82 [s])^2 \times 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} \right)$$

	LOWER	UPPER	
K_{Hs}	386431,11	474500,15	[Kg/m]

vi. Rigidez horizontal de un aislador

$$K_H = \left(\frac{K_{Hs}}{N_{ais}} \right)$$

$$K_H = \left(\frac{386431,33 \left[\frac{Kg}{m} \right]}{13} \right)$$

	LOWER	UPPER	
K_H	29725,47	36500,01	[Kg/m]

Fuerzas laterales mínimas

- i. Fuerza lateral por sismo (Cortante basal)

(Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Se calcula el cortante basal para una estructura con base fija, usando el peso sísmico de la estructura y el período igual al de la estructura aislada.

- Identificación de la zona sísmica

Figura 37

Zona sísmica.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

- Identificación del tipo de suelo. Ver ítem 3.5.1.2

Tipo de suelo: D

- Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto. Ver ítem 3.5.1.3

$$F_a = 1,2$$

- Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca. Ver ítem 3.5.1.3

$$F_d = 1,19$$

- Comportamiento no lineal de los suelos

Figura 38

Comportamiento no lineal de los suelos.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

$$F_s = 1,28$$

- Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico

$$T_C = 0,55 \times F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_C = 0,6981$$

- Período de vibración de la estructura aislada

	LOWER	UPPER
T_{EF}	0,82	0,74

 [s]

- Componentes horizontales de la carga sísmica

Según la NEC-SE-DS (peligro sísmico) el espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones para el caso de estudio es el siguiente:

Donde,

$$T_O = 0,1 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_O = 0,1 \times 1,28 \frac{1,19}{1,2}$$

$$T_O = 0,127 \text{ [s]}$$

$$T_C = 0,6981 \text{ [s]}$$

$$\left\{ \begin{array}{lll} Si, & T \leq T_O, & S_a = z F_a (1 + (\eta - 1) \frac{T}{T_O}) \\ Si, & T_O < T \leq, & S_a = \eta z F_a \\ Si, & T > T_C, & S_a = \eta z F_a \left(\frac{T_C}{T} \right)^r \end{array} \right.$$

Donde: $\eta = 2,48$, para provincias de la sierra

$r = 1$, para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E

Entonces,

$$\left\{ \begin{array}{lll} Si, & T \leq 0,127, & S_a = 0,48 + 5,5937 T \\ Si, & 0,127 < T \leq 0,69, & S_a = 1,1904 \\ Si, & T > 0,69, & S_a = 1,1904 \left(\frac{0,6981}{T} \right)^r \end{array} \right.$$

Para $T_{EF} = 0,74$ [seg];

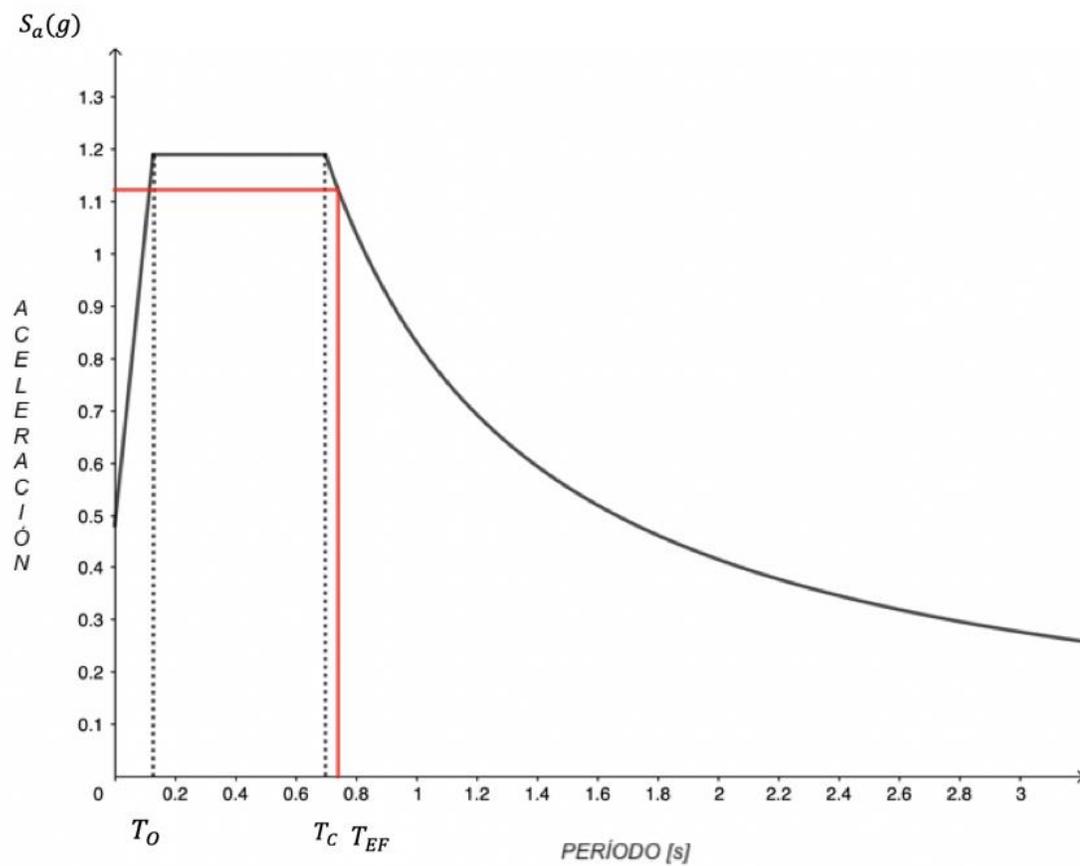
$$S_a = 1,1904 \left(\frac{0,6981}{T} \right)^r$$

$$S_a = 1,1904 \left(\frac{0,6981}{0,74} \right)^1$$

$$S_a = 1,123$$

Figura 39

Espectro elástico de aceleraciones para un período de 0,74 [s].



Nota. Basado en los lineamientos de la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

Para $T_{EF} = 0,82$ [seg];

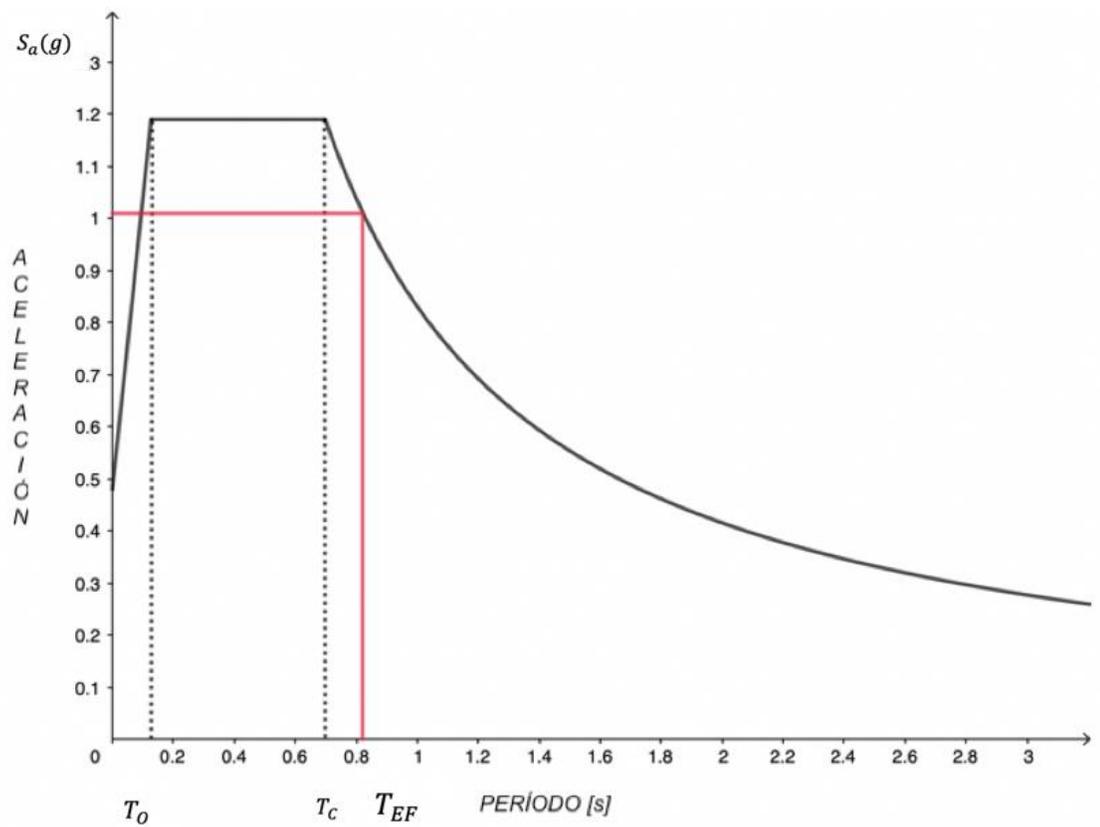
$$S_a = 1,1904 \left(\frac{0,6981}{T} \right)^r$$

$$S_a = 1,1904 \left(\frac{0,6981}{0,82} \right)^1$$

$$S_a = 1,01$$

Figura 40

Espectro elástico de aceleraciones para un período de 0,82 [s].



Nota. Basado en los lineamientos de la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

- Coeficiente de importancia

Figura 41

Coeficientes de importancia.

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coeficiente I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Nota. Recuperado de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015).

$$I = 1,0$$

- Factor de reducción del suelo

Cuando se usan sistemas de aislación, se recomienda usar un valor de $R=1$, ya que, el sistema permanecería en el rango elástico.

$$R = 1$$

- Factores de elevación y planta

Ver tabla 11 y 12 de la NEC_SE_DS (peligro sísmico)

$$\phi_E = 1$$

$$\phi_P = 1$$

- Cortante basal de la estructura

Para $T_{EF} = 0,74$ [seg];

$$S_a = 1,123$$

$$V = \frac{I \times S_a}{R \times \phi_E \times \phi_P} W$$

$$V = \frac{1 \times 1,123}{1 \times 1 \times 1} W$$

$$V = 1,123 W$$

Para $T_{EF} = 0,82$ [seg];

$$S_a = 1,01$$

$$V = \frac{I \times S_a}{R \times \phi_E \times \phi_P} W$$

$$V = \frac{1 \times 1,01}{1 \times 1 \times 1} W$$

$$V = 1,01 W$$

El cortante basal queda en función del peso de la estructura, que para el diseño de los aisladores sísmicos este peso vendría a ser el que soporta la columna más crítica en la estructura.

ii. Fuerza lateral necesaria para activar el aislador sísmico

(American Society of Civil Engineers, 2016).

$$V_i = 1,5 \times F_y$$

$$V_i = 1,5 \times 924,62 \text{ [Kg]}$$

	LOWER	UPPER	
V_i	1386,93	1695,26	[Kg]

iii. Fuerza lateral por encima del sistema de aislación

(American Society of Civil Engineers, 2016).

La estructura por encima del sistema de aislación debe ser diseñada para que soporte una fuerza de corte mínima.

El factor R_1 se debe basar en el sistema de resistencia a la fuerza sísmica usado para la estructura por encima del sistema de aislación y debe ser 3/8 del valor R dado en la tabla 12.2-1 del ASCE 7-16 con un valor máximo de 2 y un valor mínimo de 1.

$$R_1 = 1,31$$

$$V_s = \frac{K_{ps} \times D_D}{R_1}$$

$$V_s = \frac{340,34 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{mm}} \right] \times 63 \text{ [mm]}}{1,31}$$

	LOWER	UPPER	
V_s	16367,5	18100,76	[Kg]

Límites para V_S :

El valor de V_S no debe ser tomado menor que:

- La fuerza lateral por sismo (cortante basal) para una estructura con base fija con el mismo peso sísmico y un período igual al de la estructura aislada. Esto garantiza que la estructura no va a ser diseñada con un cortante menor al de una estructura de base fija.
 - El cortante basal correspondiente a la carga de diseño factorada por viento.
 - La fuerza lateral sísmica requerida para activar el sistema de aislación aumentada 1,5 veces.
- iv. Fuerza lateral por debajo del sistema de aislación

$$V_b = K_{ps} \times D_D$$

$$V_b = 340,34 \left[\frac{Kg}{mm} \right] \times 63 [mm]$$

	LOWER	UPPER	
V_b	21441,42	23712	[Kg]

Límites para V_b :

- El valor de V_b no debe ser menor al valor de V_S .

Deformación por cortante (control de espesor de las capas de elastómero).

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

Chequeo por cargas de servicio.

$$P_{Dcc} = 67370 [N]$$

$$P_{Lcc} = 34090 [N]$$

Las combinaciones de carga siguientes según Constantinou, están basadas en el código LRFD (AASHTO, 2007). En este código se especifican 5 combinaciones de carga de los cuales el I y el IV son los que van a predominar. A continuación, se presentan los factores correspondientes a cada combinación:

	γ_D	γ_L
Combinación 1	1,25	1,75
Combinación 4	1,5	0

$$P_u = \gamma_D \times P_{D\ cc} + \gamma_L \times P_{L\ cc}$$

Combinación 1

$$P_u = 1,25 \times 67,37 + 1,75 \times 34,09$$

Combinación 2

$$P_u = 1,5 \times 67,37 + 0 \times 34,09$$

Combinación 1	143870	[N]
Combinación 4	101055	[N]

Se debe usar la carga axial factorada mayor de las dos combinaciones, por lo cual:

P_u	143870	[N]
P_u	14665,65	[Kg]

i. Deformación debido a compresión

$\Delta_S \rightarrow$ Desplazamiento lateral no sísmico

$\Delta_S = 30$ [mm] \rightarrow Para el caso de análisis

$$\delta = 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{\Delta_S}{\phi_{ais}} \right)$$

$$\delta = 2 \times \cos^{-1}\left(\frac{30}{200}\right)$$

$$\delta = 2,84$$

$$A_r = \frac{\phi_{ais}^2}{4} (\delta - \text{sen}(\delta))$$

$$A_r = \frac{200^2}{4} (2,84 - \text{sen}(2,84))$$

$$A_r = 25429,59 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$f_1 = 1 \rightarrow$ Factor recomendado por Constantinou, et al.

$$\gamma_{cs} = \frac{P_u}{A_r \times G \times S} f_1$$

$$\gamma_{cs} = \frac{14665,65 \text{ [Kg]}}{254,29 \text{ [cm}^2\text{]} \times 4,5 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}\right] \times 8,33} \times 1$$

	LOWER	UPPER
γ_{cs}	1,54	1,26

ii. Deformación por desplazamiento lateral

$$\gamma_{ss} = \frac{\Delta_s}{T_r}$$

$$\gamma_{ss} = \frac{30 \text{ [mm]}}{54 \text{ [mm]}}$$

$$\gamma_{ss} = 0,56$$

iii. Deformación por rotación

$f_2 = 0,375 \rightarrow$ Factor recomendado por Constantinou, et al.

$$\theta = 0,005 \text{ [rad]}$$

θ → Valor de rotación mínimo que se debe usar debido al peso propio de la construcción

Se puede reducir este valor si el constructor presenta métodos certificados y ensayos apropiados.

$$\gamma_{rs} = \frac{\phi_{ais}^2 \times \theta}{t_e \times T_r} f_2$$

$$\gamma_{rs} = \frac{200^2 \times 0,005}{6 [mm] \times 54 [mm]} \times 1$$

$$\gamma_{rs} = 0,23$$

iv. Condiciones

CONDICIÓN I

$$\gamma_{cs} = \frac{P_u}{A_r \times G \times S} f_1 \leq 3,5$$

	CONDICIÓN	CUMPLE
LOWER	1,54	SI
UPPER	1,26	SI

CONDICIÓN II

$$\gamma_{cs} + \gamma_{ss} + \gamma_{rs} \leq 6,0$$

	CONDICIÓN	CUMPLE
LOWER	2,33	SI
UPPER	2,05	SI

Chequeo por sismo de diseño.

$$P_{Dcc} = 67370 [N]$$

$$P_{Lcc} = 34090 [N]$$

P_{hDE} → La fuerza horizontal de diseño es el cortante basal

	LOWER	UPPER	
P_{E_h}	10445,94	11583,61	[Kg]

$$P_{E_v} = \frac{2}{3} \times P_{E_h}$$

	LOWER	UPPER	
P_{E_v}	6963,96	7722,41	[Kg]

$$P_{L_{DEcc}} = 0,5 \times P_{L_{cc}}$$

$$P_{L_{DEcc}} = 0,5 \times 34,09$$

$$P_{L_{DEcc}} = 17,05 \text{ [KN]}; 1738,02 \text{ [Kg]}$$

$$P_{D_{DEcc}} = P_{D_{cc}}$$

$$P_{D_{DEcc}} = 67,37 \text{ [KN]}; 6867,48 \text{ [Kg]}$$

$\gamma_D = 1,25 \rightarrow$ Factor para carga muerta recomendado por Constantinou

$P_{u_{DE}} \rightarrow$ Carga de servicio axial factorada debido a la columna más crítica por sismo de diseño

$$P_{u_{DE}} = \gamma_D \times P_{D_{DEcc}} + P_{L_{DEcc}} + P_{E_v}$$

$$P_{u_{DE}} = 1,25 \times 6867,48 \text{ [Kg]} + 1738,02 \text{ [Kg]} + 6963,96 \text{ [Kg]}$$

	LOWER	UPPER	
$P_{u_{DE}}$	17286,33	18044,78	[Kg]

i. Deformación debido a compresión por sismo de diseño

$$\Delta_{E_{DE}} = 63 \text{ [mm]}$$

$\Delta_{E_{DE}} \rightarrow$ Se usa el desplazamiento calculado en el punto 3.5.5.1 literal x

$\gamma = 0,5 \rightarrow$ Constantinou, et al.

$$\Delta = \gamma \times \Delta_S + \Delta_{EDE}$$

$$\Delta = 0,5 \times 30 [mm] + 63 [mm]$$

$$\Delta = 78 [mm]$$

$$\delta_{DE} = 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{\phi_{ais}} \right)$$

$$\delta_{DE} = 2 \times \cos^{-1} \left(\frac{78}{200} \right)$$

$$\delta_{DE} = 2,34$$

$$A_{rDE} = \frac{\phi_{ais}^2}{4} (\delta - \text{sen}(\delta))$$

$$A_{rDE} = \frac{200^2}{4} (2,34 - \text{sen}(2,34))$$

$$A_{rDE} = 16215,35 [mm^2]; 162,15 [cm^2]$$

$$\gamma_{CDE} = \frac{P_{uDE}}{A_{rDE} \times G \times S} f_1$$

$$\gamma_{CDE} = \frac{17286,33 [Kg]}{162,15 [cm^2] \times 4,5 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \times 8,33} \times 1$$

	LOWER	UPPER
γ_{CDE}	2,84	2,43

ii. Deformación por desplazamiento lateral por sismo de diseño

$$\gamma_{SDE} = \frac{\Delta}{T_r}$$

$$\gamma_{SDE} = \frac{78 [mm]}{54 [mm]}$$

$$\gamma_{SDE} = 1,44$$

iii. Deformación por rotación por sismo de diseño

La deformación por rotación por sismo de diseño se omite para este cálculo, se usa el valor de deformación por rotación por cargas de servicio

$$\gamma_{rDE} = \gamma_{rs}$$

$$\gamma_{rDE} = 0,23$$

iv. Condiciones por sismo de diseño

CONDICIÓN I

$$\gamma_{cDE} + \gamma_{sDE} + 0,5 \times \gamma_{rDE} \leq 7,0$$

	CONDICIÓN	CUMPLE
LOWER	4,44	SI
UPPER	3,99	SI

Esfuerzo en las láminas de refuerzo de acero (control de espesor en las láminas de refuerzo)

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

Chequeo por cargas de servicio.

i. Esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{t_r}{t_s} \times \frac{P}{A_r} \times \left(\frac{3 + \nu}{2} \right)$$

Donde $\nu = 0,3$ para los aceros, entonces

$$\sigma_{r_s} = 1,65 \times \frac{t_e}{t_s} \times \frac{P_u}{A_r}$$

$$\sigma_{r_s} = 1,65 \times \frac{6 [mm]}{2 [mm]} \times \frac{14665,65 [Kg]}{254,30 [cm^2]}$$

$$\sigma_{r_s} = 285,47 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

ii. Esfuerzo angular

$$\sigma_{\theta_s} = 1,65 \times \frac{t_e}{t_s} \times \frac{P_u}{A_r}$$

$$\sigma_{\theta_s} = \sigma_{r_s}$$

$$\sigma_{\theta_s} = 285,47 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

iii. Esfuerzo tangencial

$$\sigma_{z_s} = -2 \times \frac{P_u}{A_r}$$

$$\sigma_{z_s} = -2 \times \frac{14665,65 [Kg]}{254,30 [cm^2]}$$

$$\sigma_{z_s} = -115,34 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

El signo menos indica que es un esfuerzo de compresión.

iv. Cálculo del esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{r_s} - \sigma_{z_s}}{2}$$

$$\tau_{max} = \frac{285,47 - (-115,34)}{2}$$

$$\tau_{max} = 200,41 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

v. Cálculo del espesor mínimo para las láminas de acero

$$t_{s.min} = \frac{\alpha \times t_e}{1,08 \times f_y \times \frac{A_r}{P_u} - 2}$$

Donde $\alpha = 1,65$ según la norma AASHTO (2010) para láminas de acero sin orificio, mientras que para láminas con orificio $\alpha = 3$.

$$t_{s.min} > \frac{1,65 \times t_e}{1,08 \times f_y \times \frac{A_r}{P_u} - 2}$$

$$t_{s.recom} > 1,9 \text{ [mm]}$$

$$t_s > t_{s.recom} > t_{s.min}$$

$$t_{s.min} = \frac{3 \times 6 \text{ [mm]}}{1,08 \times 250 \text{ [MPa]} \times \frac{25429,59 \text{ [mm}^2\text{]}}{143870 \text{ [N]}} - 2}$$

$$t_{s.min} = 0,22 \text{ [mm]}$$

Para el dimensionamiento del aislador sísmico se usó un valor de 2 [mm] para las láminas de acero de refuerzo. De acuerdo a la recomendación del AASHTO (2010) y el valor mínimo necesario calculado, se está cumpliendo con estos dos requisitos.

Chequeo por sismo de diseño.

	LOWER	UPPER	
P_{uDE}	17286,33	18044,78	[Kg]

i. Esfuerzo radial por sismo de diseño

$$\sigma_{rDE} = 1,65 \times \frac{t_e}{t_s} \times \frac{P_{uDE}}{A_{rDE}}$$

$$\sigma_{rDE} = 1,65 \times \frac{6 [mm]}{2 [mm]} \times \frac{17286,33 [Kg]}{162,15 [cm^2]}$$

	LOWER	UPPER	
σ_{rDE}	527,69	550,85	[Kg]

ii. Esfuerzo angular por sismo de diseño

$$\sigma_{\theta DE} = 1,65 \times \frac{t_e}{t_s} \times \frac{P_{uDE}}{A_{rDE}}$$

$$\sigma_{\theta DE} = \sigma_{rDE}$$

	LOWER	UPPER	
σ_{rDE}	527,69	550,85	[Kg]

iii. Esfuerzo tangencial por sismo de diseño

$$\sigma_{zDE} = -2 \times \frac{P_{uDE}}{A_{rDE}}$$

$$\sigma_{zDE} = -2 \times \frac{21234,04 [Kg]}{162,15 [cm^2]}$$

	LOWER	UPPER	
σ_{rDE}	-213,21	-222,56	[Kg]

iv. Cálculo del esfuerzo cortante máximo por sismo de diseño

$$\tau_{maxDE} = \frac{\sigma_{rDE} - \sigma_{zDE}}{2}$$

$$\tau_{max_{DE}} = \frac{527,69 - (-213,21)}{2}$$

	LOWER	UPPER	
$\tau_{max_{DE}}$	370,45	386,71	[Kg/cm ²]

- v. Cálculo del espesor mínimo para las láminas de acero por sismo de diseño

$$t_{s_{min,DE}} > \frac{1,65 \times t_e}{1,08 \times f_y \times \frac{A_{r_{DE}}}{P_{u_{DE}}} - 2}$$

$$t_{s_{recomen}} > 1,9 \text{ [mm]}$$

$$t_s > t_{s_{recomen}} > t_{s_{min,DE}}$$

$$t_{s_{min,DE}} = \frac{1,65 \times 6 \text{ [mm]}}{1,08 \times 250 \text{ [MPa]} \times \frac{16215,35 \text{ [mm}^2\text{]}}{17286,33 \text{ [Kg]}} - 2}$$

	LOWER	UPPER	
$t_{s_{min,DE}}$	0,42	0,44	[mm]

Igualmente se está cumpliendo con estos los dos requisitos, AASHTO (2010) y el espesor mínimo recomendado.

Cálculo del espesor mínimo en las placas de anclaje.

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

Lo crítico es la configuración deformada debido al desarrollo de grandes momentos o a la equivalencia de la carga axial transmitida a una pequeña "Área reducida".

Método del área reducida. El procedimiento se basa en el diseño de las placas base de la columna. Para el área reducida la carga axial es transferida a través del área reducida. Se asume que el área reducida tiene una forma rectangular $0,75L \times b$ (Ver figura 42). Los análisis y chequeos de seguridad para las placas de anclaje se los debe hacer para el nivel del sismo de diseño, (Constantinou & et al., 2011).

i. Cálculo de las dimensiones del área equivalente

$$A_{rDE} = 162,15 [cm^2]$$

$$L = \phi_{ais} - 2 \times t_{ec}$$

$$L = 200 [mm] - 2 \times 6 [mm]$$

$$L = 180 [mm]$$

$$b = \frac{A_{rDE}}{0,75 \times L}$$

$$b = \frac{16215,35 [mm^2]}{0,75 \times 180 [mm]}$$

$$b = 120,11 [mm]$$

ii. Cálculo de la resistencia de diseño del hormigón

$$f_b = 1,7 \times \phi_c \times f_c'$$

Donde,

$$\phi_c = \begin{cases} 0,65 \rightarrow \text{sismo de diseño (DE)} \\ 0,9 \rightarrow \text{sismo máximo considerado (MCE)} \end{cases}$$

$$f'_c = 285 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \rightarrow \text{Resistencia a la compresión del concreto}$$

$$f_b = 1,7 \times 0,65 \times 285 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$f_b = 314,93 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

iii. Cálculo de la dimensión b_1 del área de concreto que soporta la carga

Figura 42

Geometría para el área reducida.



Nota. Especificaciones para el cálculo del espesor de las placas de anclaje. *Recuperado de*

(Constantinou & et al., 2011)

$$b_1 = \frac{P_{uDE}}{0,75 \times L \times f_b}$$

$$b_1 = \frac{17286,33 [Kg]}{0,75 \times 18 [cm] \times 314,93 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]}$$

	LOWER	UPPER	
b_1	4,07	4,24	[cm]

iv. Cálculo del brazo de carga

$$r_1 = \frac{b_1 - b}{2}$$

$$r_1 = \frac{4,99 [cm] - 12,01 [cm]}{2}$$

	LOWER	UPPER	
r_1	-3,97	-3,89	[cm]

v. Cálculo de la resistencia requerida por la placa al doblado por unidad de longitud

$$M_u = \frac{f_b \times r_1^2}{2}$$

$$M_u = \frac{314,93 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \times (-3,51 [cm])^2}{2}$$

	LOWER	UPPER	
M_u	2481,79	2382,78	[Kg-cm/cm]

vi. Cálculo del espesor requerido por las placas

$$t_{tpmin}, t_{bpmin} \geq \sqrt{\frac{4 \times M_u}{\phi_b \times f_y}}$$

Donde,

$$\phi_b = \begin{cases} 0,65 \rightarrow \text{sismo de diseño (DE)} \\ 0,9 \rightarrow \text{sismo máximo considerado (MCE)} \end{cases}$$

$$t_{tp_{min}}, t_{bp_{min}} = \sqrt{\frac{4 \times 2481,79 \left[\frac{Kg - cm}{cm} \right]}{0,65 \times 2549,29 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]}}$$

	LOWER	UPPER	
$t_{tp_{min}}, t_{bp_{min}}$	2,45	2,4	[cm]

En el dimensionamiento se usó un valor de 25 [mm], por lo que se está cumpliendo con este requisito.

Control de pandeo.

(Constantinou & et al., 2011 - LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators).

Chequeo por cargas de servicio.

- i. Cálculo de la carga de pandeo

$$P_{cr} = 0,218 \times \frac{G}{t_e} \times \frac{\Phi_{ais}^4}{T_r}$$

$$P_{cr} = 0,218 \times \frac{4,5 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]}{0,6 [mm]} \times \frac{(20 [cm])^4}{5,4 [cm]}$$

	LOWER	UPPER	
P_{cr}	48444,44	59209,88	[Kg]

- ii. Cálculo de la carga crítica de pandeo

$$P_{cr}' = P_{cr} \times \frac{A_r}{A_\phi}$$

$$P_{cr}' = 48444,44 [Kg] \times \frac{254,30 [cm^2]}{314,16 [cm^2]}$$

	LOWER	UPPER	
P_{cr}'	39213,3	47927,37	[Kg]

iii. Verificación

$$P_{cr}' > 0,15 P_{cr}$$

$$39213,3 > 0,15 \times (48444,44 \text{ [Kg]})$$

	$0,15 P_{cr}$	CUMPLE
LOWER	7266,67	SI
UPPER	8881,48	SI

iv. Factor de seguridad

$$\frac{P_{cr}'}{P_u} > 2$$

$$\frac{39213,3 \text{ [Kg]}}{14665,65 \text{ [Kg]}} > 2$$

	FACTOR DE SEGURIDAD	CUMPLE
LOWER	2,67	SI
UPPER	3,27	SI

Chequeo por sismo de diseño.

i. Cálculo de la carga de pandeo por sismo de diseño

$$P_{cr} = 0,218 \times \frac{G}{t_e} \times \frac{\phi_{ais}^4}{T_r}$$

$$P_{cr} = 0,218 \times \frac{4,5 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]}{0,6 \text{ [mm]}} \times \frac{(20 \text{ [cm]})^4}{5,4 \text{ [cm]}}$$

	LOWER	UPPER	
P_{cr}	48444,44	59209,88	[Kg]

- ii. Cálculo de la carga crítica de pandeo por sismo de diseño

$$P_{crDE}' = P_{cr} \times \frac{A_{rDE}}{A_{\phi}}$$

$$P_{crDE}' = 48444,44 \text{ [Kg]} \times \frac{162,15 \text{ [cm}^2\text{]}}{314,16 \text{ [cm}^2\text{]}}$$

	LOWER	UPPER	
P_{crDE}'	25004,63	30561,21	[Kg]

- iii. Verificación por sismo de diseño

$$P_{crDE}' > 0,15 P_{cr}$$

$$25004,63 > 0,15 \times (48444,44)$$

	$0,15 P_{cr}$	CUMPLE
LOWER	7266,67	SI
UPPER	8881,48	SI

- iv. Factor de seguridad por sismo de diseño

$$\frac{P_{crDE}'}{P_{uDE}} > 1,1$$

$$\frac{25004,63 \text{ [Kg]}}{17286,33 \text{ [Kg]}} > 1,1$$

	FACTOR DE SEGURIDAD	CUMPLE
LOWER	1,45	SI
UPPER	1,69	SI

Proceso de análisis dinámico

Sistema de aislación y elementos de la subestructura.

(American Society of Civil Engineers, 2016).

- El desplazamiento de diseño por análisis dinámico no debe ser menor que,

$$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_{EF}}\right)^2}}$$

$$D_D' = \frac{63 [mm]}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,36 [s]}{0,82 [s]}\right)^2}}$$

	LOWER	UPPER	
D_D'	58	51	[mm]

Esta ecuación considera la flexibilidad de la superestructura, lo cual tiene una relación con la reducción de la demanda de desplazamiento en el sistema de aislación.

- El desplazamiento total dinámico del sistema de aislación no deberá ser menor que el 90% del desplazamiento total estático calculado en el punto 3.5.5.1 literal xi.

$$D_{TD}' = 0,9 \times D_{TD}$$

$$D_{TD}' = 0,9 \times 69,3 [mm]$$

	LOWER	UPPER	
D_{TD}'	62,37	56,43	[mm]

- La fuerza lateral de diseño para el sistema de aislación y para la subestructura no debe ser menor que el 90% de la fuerza calculada en el punto 3.5.5.3 literal iv.

$$V_b' = V_b \times 0,90$$

$$V_b' = 21441,42 \times 0,90$$

	LOWER	UPPER	
V_b'	19297,28	21340,8	[Kg]

Elementos estructurales de la superestructura.

(American Society of Civil Engineers, 2016).

- La fuerza lateral de diseño de la superestructura en caso de que sea regular, idealmente no debe ser menor que el 80% de la calculada en el punto 3.5.5.3 literal iii. Si resulta que la fuerza lateral de diseño es menor al 80% se debe realizar un análisis de respuesta en el tiempo para demostrar que la superestructura tiene un comportamiento adecuado y que esta fuerza no sea menor al 60%.

$$V_s' = V_s \times 0,90$$

$$V_s' = 16367,5 \times 0,90$$

	LOWER	UPPER	
V_b'	13094	14480,61	[Kg]

- La fuerza lateral de diseño de la superestructura en caso de que sea irregular, idealmente no debe ser menor que la calculada en el punto 3.5.5.3 literal iii. Si resulta que la fuerza lateral de diseño es menor se debe realizar un análisis de respuesta en el tiempo para demostrar que la superestructura tiene un comportamiento adecuado y que esta fuerza no sea menor al 80%.

Espectro de diseño. El espectro de respuesta de aceleraciones se lo construyó de acuerdo a los lineamientos de (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015) y se especifica su procedimiento en el punto 3.5.5.3 literal i.

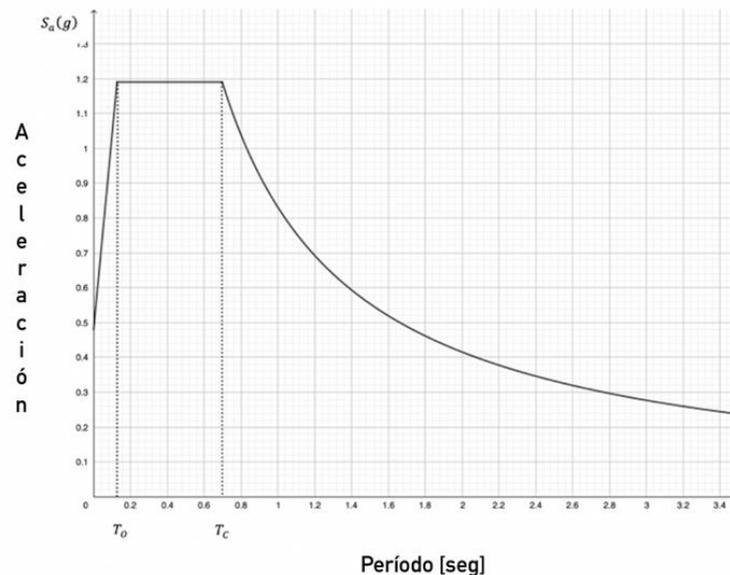
$$T_0 = 0,127 \text{ [seg]}$$

$$T_c = 0,6981 \text{ [seg]}$$

$$\left\{ \begin{array}{lll} Si, & T \leq 0,127, & S_a = 0,48 + 5,5937 T \\ Si, & 0,127 < T \leq 0,69, & S_a = 1,1904 \\ Si, & T > 0,69, & S_a = 1,1904 \left(\frac{0,6981}{T} \right)^r \end{array} \right.$$

Figura 43

Espectro de respuestas de aceleraciones.



Nota. Basado en los lineamientos de la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS, 2015)

Análisis de respuesta espectral. Mediante el análisis de respuesta espectral se puede indicar que la fracción de amortiguamiento modal β en los modos elementales de la edificación aislada, donde se encuentra el movimiento rotacional o traslacional del sistema de aislación es

mayor a la fracción de amortiguamiento de los modos que implican deformación en la estructura. Para estas frecuencias de vibración relacionadas a los modos elementales el espectro de diseño se lo debe dividir para el coeficiente B_D mientras que para los modos faltantes se debe usar factores de B_D relacionados con la fracción de amortiguamiento de la estructura anclada al suelo. Al análisis de respuesta espectral que se usa para determinar el desplazamiento de diseño y desplazamiento total máximo, se le debe incorporar el 100% de la excitación conforme con la dirección más crítica de movimiento sumado el 30% de la excitación según un eje ortogonal con respecto a la dirección más crítica de movimiento, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Requisitos generales para el sistema de aislación. Tanto la estructura como el sistema de aislación deben cumplir con ciertos requisitos que constan a continuación:

i. Condiciones medioambientales

Cada sistema de aislación debe ser diseñado teniendo en cuenta las condiciones ambientales tanto de envejecimiento, deformación permanente o plástica, temperatura de trabajo, fatiga, exposición a la humedad y exposición a químicos. Así mismo estos aisladores construidos en base a material elastomérico son muy sensibles a la radiación ultravioleta y al ozono, por lo que deben estar cubiertos con una lámina de protección que retrase el envejecimiento y deben estar ubicados en lugares donde no les llegue la luz solar, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

ii. Fuerzas de viento

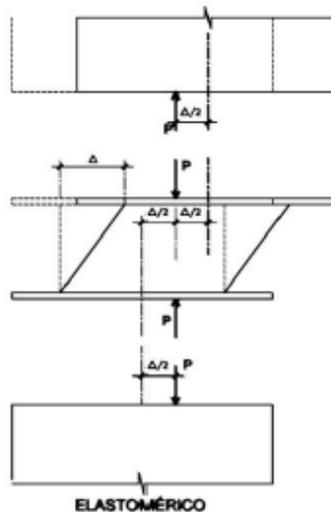
La estructura aislada debe soportar las cargas de viento en cada uno de los niveles por encima del interfaz de aislación, dicho interfaz debe contener un sistema que limite el desplazamiento lateral a condiciones normales de trabajo, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

iii. Estabilidad para cargas verticales

Cada uno de los elementos del sistema de aislación deben estar diseñados para soportar y mantenerse estables ante las cargas verticales máximas y mínimas de la estructura. Para los anclajes de los aisladores se debe considerar el efecto $P - \Delta$ de la Figura 44, producido sobre el aislador por el sismo de diseño, creando un momento debido al corte. Para aisladores elastoméricos, este momento debe ser considerado como P veces $\Delta/2$ siendo P la carga axial debido a sismo y Δ el desplazamiento total de diseño, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013)

Figura 44

Efecto $P - \Delta$ sobre aisladores elastomérico.



Nota. Recuperado de (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

iv. Volcamiento global

Se debe obtener un factor de seguridad contra volcamiento del sistema de aislación no menor a 1 para la combinación de cargas requerida, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

v. Inspección y reemplazo

Siempre se debe diseñar el sistema de aislación con ingresos para realizar cualquier inspección o reemplazo de componentes. El ingeniero encargado de la obra debe inspeccionar antes de emitir un certificado de uso para la edificación. La estructura con aislación sísmica debe tener un manual de control, inspección y mantenimiento periódico establecido por el profesional encargado del diseño, su objetivo es el de asegurar que todos los elementos cumplan con los niveles mínimos de diseño, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

vi. Control de calidad

a. Aisladores elastoméricos

Se deben realizar ensayos de control de calidad a cada uno de los aisladores sísmicos que serán instalados en la estructura, los ensayos deben ser realizados por un laboratorio internacional o nación que este certificado con la norma ASTM E4 y cada ensayo debe ser revisado por un propietario o representante de los aisladores sísmicos, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013). Los ensayos para realizar constan en el capítulo 4.

b. Para cualquier otro dispositivo

El ingeniero diseñador del sistema de aislación debe establecer los ensayos a realizar y el programa para ensayos tiene que ser aprobado por el revisor del cálculo estructural del proyecto, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

c. Criterio de aceptación

El ingeniero diseñador del sistema de aislación tiene que establecer los rangos de valores de aceptación entre los que deben estar las propiedades medidas en los ensayos, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Revisión del diseño y construcción.

i. Sistema de aislación

La revisión debe incluir lo siguiente, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013):

- Revisión del desarrollo de espectros y registros de movimientos del suelo del lugar.
- Chequeo del diseño preliminar, desplazamientos y fuerzas laterales.
- Supervisión del ensayo de los prototipos.
- Revisión final del sistema estructural completo.
- Revisión del protocolo con el que se realizará el control de calidad a los prototipos.
- El ingeniero responsable de los cálculos deberá presentar un informe final detallado con planos y cálculos de acuerdo al alcance del proyecto.

Elaboración del protocolo de fabricación

Materiales, equipos y herramientas.

Materiales.

- Treinta y dos placas o láminas de acero A36 con un espesor de 2 (mm) y una sección transversal circular de 180 (mm) de diámetro.
- Ocho placas de anclaje de acero A36 con sección cuadrada de 250 (mm) por lado.
- Un tubo de sección circular con un diámetro externo mayor a 200 (mm) y una longitud mayor a 70 (mm) para la fabricación del molde.
- Ocho topes de acero de 50 (mm) de largo, 20 (mm) de ancho y 8 (mm) de espesor aproximadamente.
- Cuatro abrazaderas con dos agujeros de $\frac{3}{4}$ (in) cada una.
- Cuatro pernos de $\frac{3}{4}$ (in).

- Una plancha de caucho natural virgen de aproximadamente 5 (mm) de espesor y 2 (kg) de masa, obtenida por laminación.
- Una plancha de caucho de 2,12 (kg), resultado de la combinación de caucho natural virgen y caucho reciclado NFU (de neumático) finamente molido, proporciones 40 a 60 respectivamente.
- Pegamento CHEMLOK 205.
- Aceite sintético SAE 15W40.

Herramientas.

- Un pie de rey.
- Un flexómetro.
- Una matriz de cartón con una sección circular de 180 (mm) de diámetro.
- Una tijera o un cuchillo.
- Una sierra de mano.
- Una amoladora con disco de desbaste.
- Una prensa de mano.
- Una cuchilla para tornear.
- Una broca de $\frac{3}{4}$ (in) de diámetro.
- Una broca de $\frac{1}{2}$ (in) de diámetro.
- Un destornillado plano.
- Una matriz para fabricar las probetas de ensayo.
- Una brocha.
- Un guaípe.

Equipos.

- Torno de taller.
- Taladro de banco.
- Balanza digital.
- Molino de rodillos.
- Máquina para ensayos universales.
- Computadora.
- Prensa hidráulica para la fabricación de las probetas.
- Prensa hidráulica para la vulcanización de los aisladores.

Procedimiento.***Matriz.***

1. Cortar una porción determinada de un tubo de acero redondo cuyo diámetro sea menor al de aislador, (Ver Figura 45).
2. Cortar la matriz por ambos lados en sentido longitudinal, (Ver Figura 46).
3. Unir con puntos de soldadura la matriz cortada, (Ver Figura 47).
4. Refrentar el diámetro interior hasta conseguir el diámetro del aislador requerido, (Ver Figura 48).
5. En los extremos cortados colocar abrazaderas de modo que se pueda desmontar la matriz para que los cuatro prototipos se construyan con la misma, (Ver Figura 49).
6. Soldar cuatro topes en la matriz en la cara externa, éstos deben estar ubicados equidistantes para que las placas de anclaje estén alineadas, (Ver Figura 50).

Placas de anclaje.

1. De una plancha de acero ASTM A36 de espesor 25 [mm], cortar en las dimensiones requeridas para las placas de anclaje, (Ver Figura 51).
2. En cada placa de anclaje, perforar 4 agujeros de 3/4 [in] en los extremos (como se indicará en la parte de la construcción). Estos agujeros servirán para anclar los aisladores a sus apoyos, (Ver Figura 52).
3. Realizar agujeros pasantes en las placas de anclaje en la parte central para que el elastómero al momento de vulcanizar tenga mayor resistencia a las fuerzas de corte, (Ver Figura 53).
4. Finalmente esmerilar una de las caras de cada placa de anclaje para obtener una rugosidad necesaria para que el elastómero se adhiera mejor al acero, (Ver Figura 54).

Placas de refuerzo.

1. De planchas de acero ASTM A36 de espesor 2 [mm], cortar láminas con un diámetro de 180 [mm], (Ver Figura 55).
2. Esmerilar ambas caras de estas láminas por obtener una rugosidad deseada, de tal manera que el elastómero vulcanizado se adhiera con mayor eficacia al acero, (Ver Figura 56).

Elastómero virgen.

1. Formulación del elastómero de acuerdo a las propiedades que se desean, (Ver Figura 57).
(Proceso propio de la empresa Grupo Vikingo)
2. Obtener una muestra del elastómero para verificar sus propiedades mecánicas, (Ver Figura 58).
3. Elaborar las probetas para los ensayos de tracción y dureza. Esto se lo debe hacer a 150 [°C] por 10 minutos con una presión de 2000 [psi], (Ver Figura 59).

NOTA: Es recomendable dejar enfriar las probetas al menos de dos a tres días antes de realizar los ensayos.

4. Realizar los ensayos en los equipos apropiados, (Ver Figura 60).
5. Comprobar si las propiedades mecánicas obtenidas son las deseadas para cumplir con el diseño propuesto, (Ver Figura 61).

Elastómero reciclado.

1. Formulación del elastómero, (Ver Figura 62). (Proceso propio de la empresa Grupo Vikingo)
2. Mezcla del elastómero reciclado con elastómero virgen en proporciones 60-40 respectivamente, (Ver Figura 63).
3. Sacar una muestra del elastómero para verificar sus propiedades mecánicas, (Ver Figura 64).
4. Elaborar las probetas para los ensayos de tracción y dureza. Esto se lo debe hacer a 150 [°C] por 10 minutos con una presión de 2000 [psi], (Ver Figura 65).

NOTA: Es recomendable dejar enfriar las probetas al menos de dos a tres días antes de realizar los ensayos.

5. Ensayo de tracción en las probetas, (Ver Figura 66).
6. Observar las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos para esta mezcla de elastómeros, (Ver Figura 67).

NOTA: Como es una mezcla entre elastómero reciclado y elastómero virgen, las propiedades mecánicas que se obtienen son menores que para un elastómero virgen. Aquí únicamente se observaría cual es el rendimiento de esta mezcla frente al “diseño ideal” con elastómero virgen.

Montaje del aislador sísmico.

NOTA: El procedimiento descrito a continuación es el mismo tanto para aisladores sísmicos con elastómero 100 % virgen como para aisladores sísmicos con elastómero reciclado y virgen con una proporción 60-40 % respectivamente.

1. Laminación del elastómero hasta un espesor menor al deseado por capa, esto se debe a que en el proceso de vulcanización el elastómero crece por efectos de dilatación, (Ver Figura 68).
2. Corte de la capa de elastómero de acuerdo a las dimensiones y forma deseada, (Ver Figura 69).
3. Calentar el molde a una temperatura de 135 [°C] de 20 a 30 minutos, (Ver Figura 70).
4. Cubrir con el pegamento CHEMLOK 205 usado en la empresa, ambas superficies de las láminas de refuerzo de acero A36, así como de las placas de anclaje que vayan a tener contacto con el elastómero. Este pegamento es usado para que el elastómero se adhiera al acero, (Ver Figura 71).
5. Aceitar la cara interna de la matriz para facilitar el desmolde del aislador una vez finalizado el proceso, (Ver Figura 72).
6. Montar el aislador intercalando las láminas de acero con las capas de elastómero. Se rellena la parte lateral para la cubierta del aislador, este proceso se lo conocer como taquear, (Ver Figura 73).
7. Una vez montado el aislador, se lo debe comprimir en la prensa por 1 minuto para comprobar que no existan vacíos en el interior. En caso de existir vacíos, rellenar con pedazos del elastómero usado y volver a taquear, (Ver Figura 74).
8. Una vez comprobado que no existan vacíos, cubrir el aislador con la placa de anclaje superior. Empieza la vulcanización del aislador en la prensa a una temperatura entre 135 -

140 [°C], una presión de $100 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$, por un tiempo entre dos horas y media a tres horas. Una vez finalizado el proceso de vulcanización hay que dejar enfriar el aislador por tres horas antes de desmoldar. Posterior al desmolde, dejar enfriar el aislador de dos a tres días antes de realizar cualquier ensayo, (Ver Figura 75).

Fabricación de los aisladores

Para conocer el detalle de las actividades en cada paso, dirigirse al punto 3.7 correspondiente al protocolo de fabricación.

Matriz.

Figura 45

Paso 1 de la construcción de la matriz.



Nota. Tuberías de acero de sección circular, utilizadas para la matriz.

Figura 46

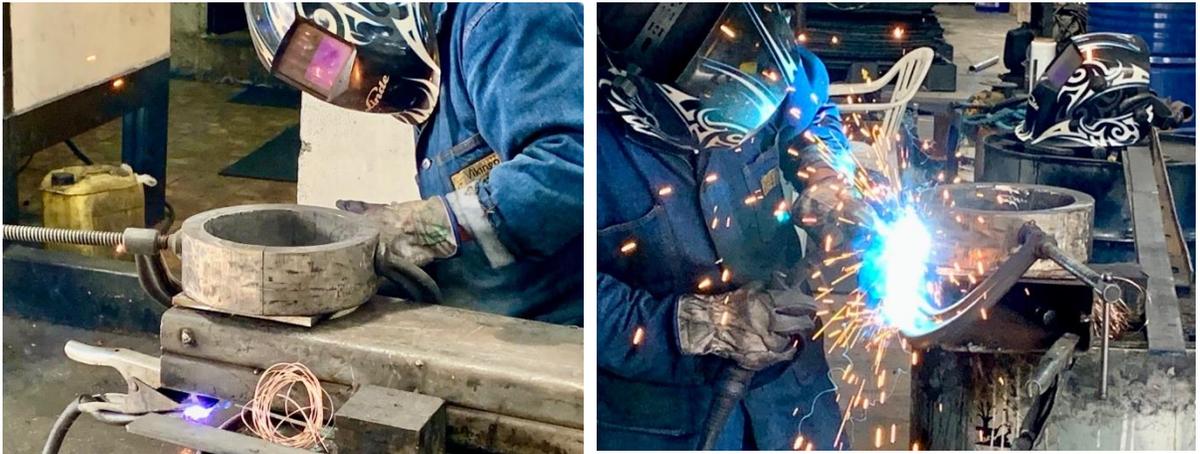
Paso 2 de la construcción de la matriz.



Nota. Corte longitudinal de la matriz, una vez obtenida del paso anterior, para mayor facilidad al momento de desmoldar.

Figura 47

Paso 3 de la construcción de la matriz.



Nota. Unión de la matriz mediante soldadura.

Figura 48

Paso 4 de la construcción de la matriz.



Nota. Torneado interior de la matriz.

Figura 49

Paso 5 de la construcción de la matriz.



Nota. Montaje de las abrazaderas para el desmontaje.

Figura 50

Paso 6 de la construcción de la matriz.



Nota. Ubicación y soldadura de 4 topes.

Placas de anclaje.

Figura 51

Paso 1 de la construcción de las placas de anclaje.



Nota. Obtención de 8 placas de anclaje en acero A36.

Figura 52

Paso 2 de la construcción de las placas de anclaje.



Nota. Placa de anclaje con 4 perforaciones de $\frac{3}{4}$ (in) cada una.

Figura 53

Paso 3 de la construcción de las placas de anclaje.



Nota. Perforación de agujeros en la parte central.

Figura 54

Paso 4 de la construcción de las placas de anclaje.



Nota. Placas de anclaje esmeriladas con el disco de desbaste.

Placas de refuerzo.

Figura 55

Paso 1 de la construcción de las placas de refuerzo.



Nota. Láminas interiores de acero con un diámetro de 180 (mm) y 2 (mm) de espesor.

Figura 56

Paso 2 de la construcción de las placas de refuerzo.

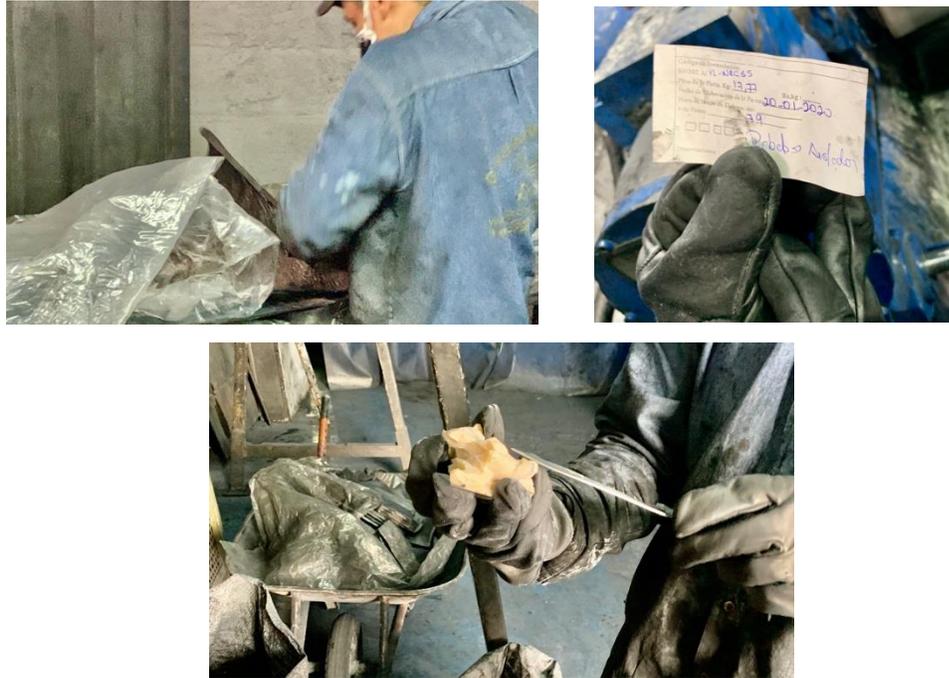


Nota. Láminas de acero esmeriladas con el disco de desbaste.

Elastómero virgen.

Figura 57

Paso 1 de la elaboración del elastómero virgen.



Nota. Preparación del elastómero de acuerdo con la formulación requerida.

Figura 58

Paso 2 de la elaboración del elastómero virgen.



Nota. Obtención de muestras para verificar las propiedades mecánicas.

Figura 59

Paso 3 de la elaboración del elastómero virgen.





Nota. Elaboración de las probetas para los ensayos con ayuda de una matriz y una prensa (FINEBILT) establecidas para dicho procedimiento.

Figura 60

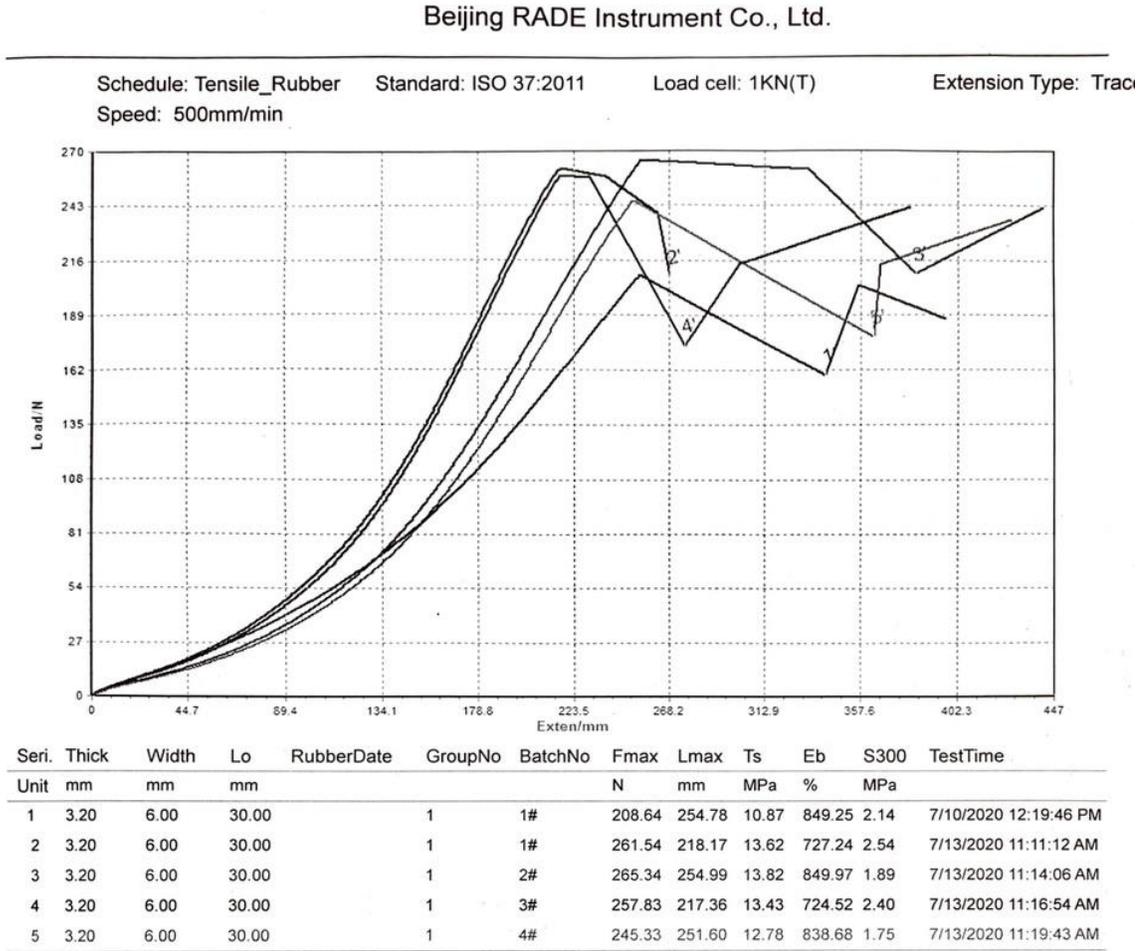
Paso 4 de la elaboración del elastómero virgen.



Nota. Ensayo de tracción hasta la rotura de las probetas elaboradas.

Figura 61

Paso 5 de la elaboración del elastómero virgen.



Nota. Según un análisis realizado por la empresa Grupo Vikingo, para obtener el módulo de corte que se requiere (entre $4,5 - 5,5 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$), el elastómero debe tener una resistencia a la tracción entre 12 – 14 (MPa) como se puede evidenciar en los resultados obtenidos en la columna T_s .

Elastómero mixto.

Figura 62

Paso 1 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).

TIPO DE CAUCHO:		BAYPREN-NATURAL-RECICLADO			Código general
PRODUCTO DE REFERENCIA:					Código dureza
DUREZA DE REFERENCIA:		CARACTERÍSTICAS/OBSERVACIONES:			
CÓDIGO DE FORMULACIÓN					
№	Ingrediente Químico	PHR	Peso. (Kg)	Peso. (Kg)	OBSERVACIONES
10	CAUCHO NATURAL	70.098	2.132	1.066	0,500
	CAUCHO NRU	0.000	0.000	1.000	1,250
	BAYPREN	29.902	0.899	0.450	
	ACEITE QUEMADO	18.924	0.576	0.276	
	40 MS	0.968	0.029	0.029	
	AZUFRE	4.531	0.138	0.138	
	INOX EF EMULSION	0.968	0.029	0.029	
	ACIDO ESTEARICO	1.360	0.041	0.041	
	CAOLIN	0.000	0.000	0.000	
	NEGRO DENIMADO	25.160	0.755	0.300	
	OXIDO DE Zn	1.511	0.046	0.046	
	WB16	1.268	0.039	0.039	
	MBTS	0.603	0.018	0.018	
	THURAM	0.754	0.023	0.023	
	AB6	0.324	0.010	0.010	
	RUBBERSIL	8.037	0.241	0.200	
PESO TOTAL		184.408	5.000	4.290	
CONDICIONES DE TRABAJO					
Temperatura de trabajo °C		18			
Humedad %		56			



Nota. Pesaje y formulación del elastómero reciclado con el elastómero virgen.

Figura 63

Paso 2 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).



Nota. Mezcla del elastómero reciclado con el virgen con ayuda de una laminadora.

Figura 64

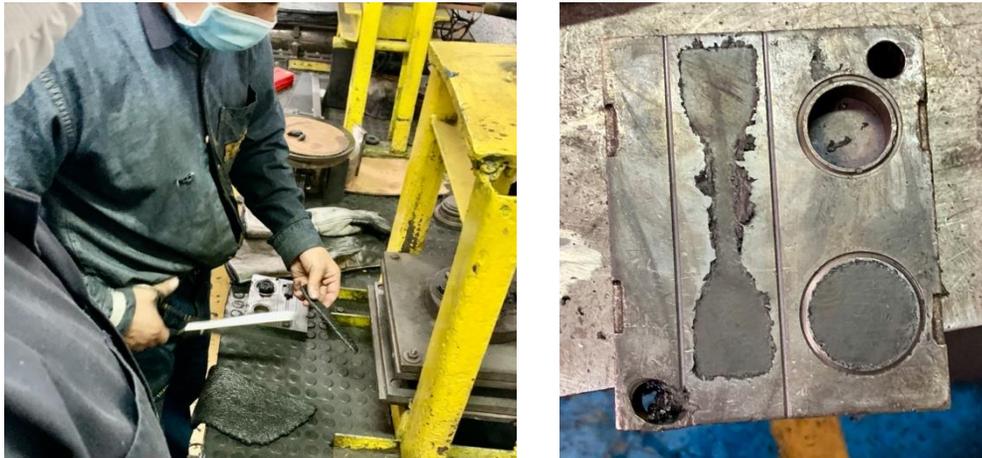
Paso 3 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).



Nota. Extracción de muestras para la elaboración de probetas.

Figura 65

Paso 4 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).



Nota 1. Elaboración de muestras para los ensayos de tracción.

Nota 2. Diferencia de apariencia entre la muestra de material 100% virgen y la muestra de material mezclado.

Figura 66

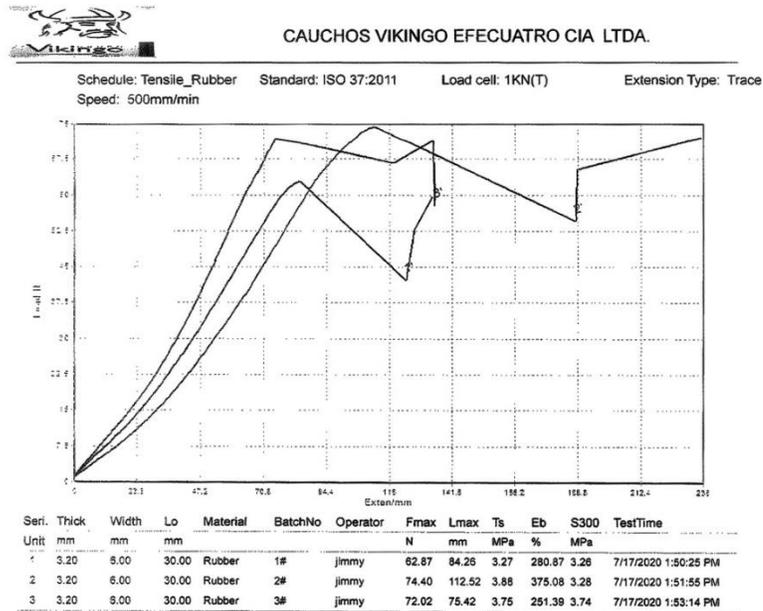
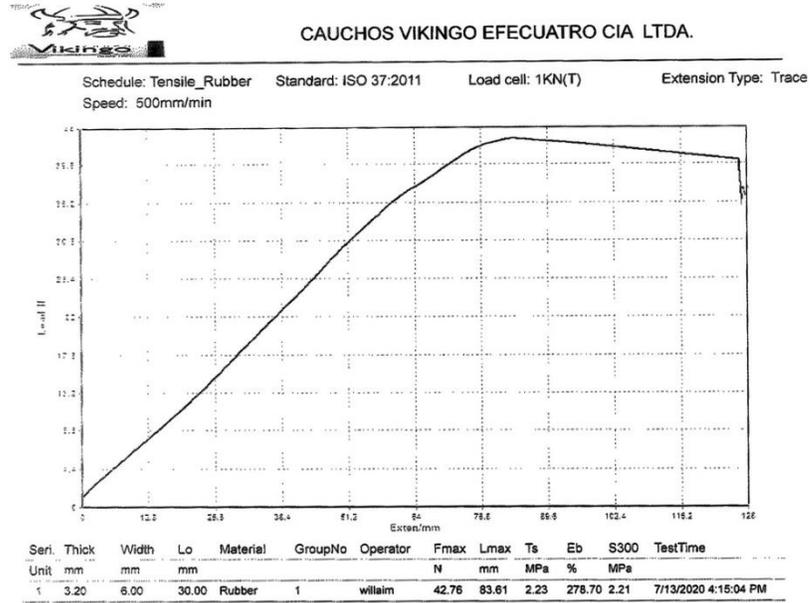
Paso 5 de la elaboración del elastómero mixto (40% virgen – 60% reciclado).



Nota. Ensayos de tracción de las probetas obtenidas con el elastómero mezclado.

Figura 67

Resultados del ensayo de tracción material reciclado.



Nota. En estas probetas no se puede controlar la resistencia a la tracción. Por lo que los resultados que se presentan servirán para comparar su capacidad frente al material virgen.

Montaje del aislador sísmico.

Figura 68

Paso 1 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Laminación de las planchas de elastómero.

Figura 69

Paso 2 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Corte del elastómero en círculos de 180 (mm) de diámetro.

Figura 70

Paso 3 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Pre calentamiento del molde a 135°C

Figura 71

Paso 4 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Recubrimiento de las placas de anclaje y láminas de acero con el pegamento CHEMLOK

205.

Figura 72

Paso 5 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Se aceita el interior de la matriz para facilitar el desmontaje.

Figura 73

Paso 6 del montaje de los aisladores sísmicos.





Nota. Montaje del aislador mediante la intercalación de las laminas de acero y el caucho.

Figura 74

Paso 7 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Compresión del aislador en la prensa para la verificación y relleno de vacíos.

Figura 75

Paso 8 del montaje de los aisladores sísmicos.



Nota. Desmontaje de los aisladores después del proceso de vulcanizado.

Figura 76

Resultados finales de la construcción.



Nota. Finalización de la construcción y ensayos respectivos.

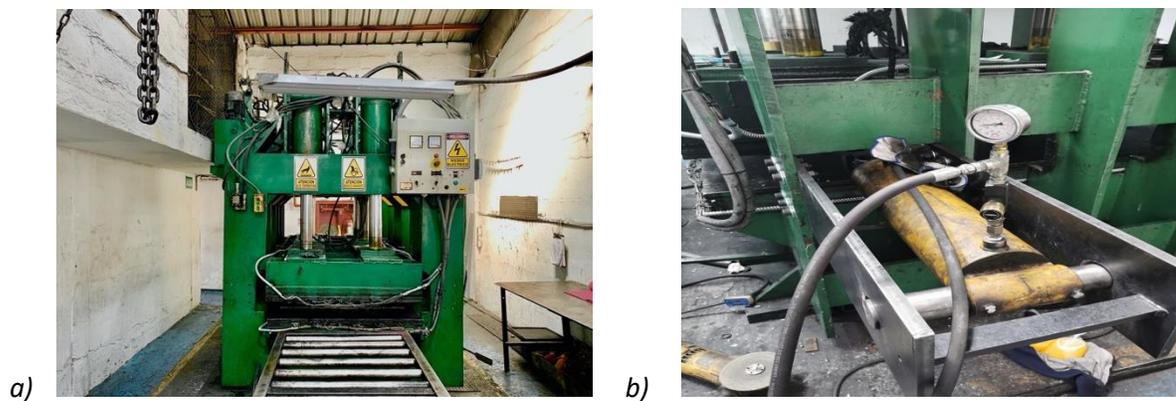
Capítulo IV

Ensayos y resultados

Descripción de la máquina

Figura 77

Prensa hidráulica.



Nota. a) Prensa utilizada por la compañía “Grupo Vikingo” para diferentes trabajos industriales, b) cilindro hidráulico lateral adaptado para proveer las cargas laterales de sismo.

La prensa utilizada para los ensayos es de construcción nacional, consta de 6 cilindros hidráulicos verticales los cuales proveen las cargas de compresión con una presión máxima de $282 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$. A esta prensa, la compañía “Grupo Vikingo” le adaptó un cilindro hidráulico lateral, el cual simula las cargas laterales de un sismo con una presión máxima de $211 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$. Cabe destacar que tanto los cilindros verticales como el cilindro lateral tienen su unidad hidráulica independiente. A esta prensa también se le adaptó unos accionadores que proveen el cambio de sentido (carga invertida) cuando se llega al máximo desplazamiento requerido. Con esta adaptación se llevaron a cabo los ensayos en los 4 aisladores sísmicos elastoméricos.

Generalidades para los ensayos

Registro.

Para cada ensayo se debe registrar el comportamiento fuerza-deformación del prototipo ensayado.

Secuencia y ciclos.

Se especifica en el punto 4.3 Protocolo para el ensayo de los prototipos de aisladores sísmicos elastoméricos.

Cargas verticales máximas y mínimas.

Si los aisladores sísmicos forman parte del sistema estructural que transmite cargas verticales, deben ser ensayados estáticamente para las cargas verticales máximas y mínimas, así como para el desplazamiento total de diseño, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

La carga máxima se debe considerar la siguiente:

$$\text{Carga axial} = 1,2 D + 1,0 L + E_{axial},$$

La carga mínima se debe considerar la siguiente:

$$\text{Carga axial} = 0,8 D + E_{axial}$$

Ensayo de unidades similares.

Es decisión de un comité previamente establecido, si se requieren o no ensayar todos los dispositivos que correspondan a un mismo tipo y tamaño, ó se acojan los resultados que se obtengan del ensayo de cualquiera de estos prototipos. Se establece que cualquier dispositivo que presente un cambio mínimo en las propiedades mecánicas de los materiales no sería aceptado y tendría que aplicarse los ensayos respectivos en este prototipo. Es responsabilidad del ingeniero que diseña los prototipos, así como del comité establecer si todos los dispositivos

tienen formas, tamaños y propiedades iguales, (Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745, 2013).

Protocolo para el ensayo de los prototipos de aisladores sísmicos elastoméricos

El protocolo establecido para realizar los ensayos en los prototipos de aisladores sísmicos elastoméricos están basados en la norma chilena prNCh2745 de octubre del 2013.

Ensayo de compresión.

Para el ensayo de compresión se deberá aplicar la siguiente carga axial,

$$\text{Carga axial} = 1,2 D + L + E_{\text{axial}},$$

esta carga representa el peso propio promedio de la estructura más una sobre carga correspondiente al sismo de diseño.

Una vez logrado la carga total de compresión en el prototipo, se debe mantener por un tiempo no menor a cinco minutos. Una vez culminado este tiempo se deberá revisar el aislador sísmico elastomérico por posibles fallas antes de quitar la carga de compresión. La carga de compresión no debe variar en más de 20%.

Ensayos combinados de corte y compresión.

Para la ejecución de estos ensayos, se debe tener en cuenta el número de ciclos necesarios, así como la carga axial de compresión a la cual debe estar sometido el prototipo de aislador sísmico elastomérico. Esta carga de compresión no debe variar en más de un 20% del total.

- Tres ciclos completos con inversión de carga para los desplazamientos: $0,2D_D$, $0,5D_D$ y $1,0 D_D$.

$$\text{Carga axial} = D + 0,5 L$$

- Tres ciclos completos con inversión de carga para los desplazamientos: $0,2D_D$, $0,5D_D$ y $1,0 D_D$.

$$\text{Carga axial} = 0,8 D - E_{\text{axial}}$$

- Tres ciclos completos con inversión de carga para los desplazamientos: $0,2D_D$, $0,5D_D$ y $1,0 D_D$.

$$\text{Carga axial} = 1,2 D + 0,5L + E_{\text{axial}}$$

- Al menos 10 ciclos completos con inversión de carga para el desplazamiento de diseño total: $1,0 D_{TD}$.

$$\text{Carga axial} = 1,2 D + 0,5L + E_{\text{axial}}$$

Ejecución de los ensayos

NOTA: Los ensayos están basados en el protocolo establecido en el punto 4.2

Tabla 4

Cargas y desplazamientos necesarios para los ensayos.

DENOMINACIÓN	VALOR	UNIDAD
Carga Muerta (D)	67,37	[KN]
Carga Viva (L)	34,09	[KN]
Carga axial (E_{axial})	10,91	[KN]
Desplazamiento por sismo de diseño (D_D)	63	[mm]
Desplazamiento total de diseño (D_{TD})	69	[mm]

Ensayo de compresión.

Para el ensayo de compresión se deberá aplicar la siguiente carga axial.

$$\text{Carga axial} = 1,2 D + L + E_{axial},$$

$$\text{Carga axial} = 125,84 \text{ [KN]}, 12,83 \text{ [ton]}$$

La carga axial debe estar en un rango entre (10 a 15 [ton]) para cumplir con el 20 % de variación que se indica en el protocolo. La prensa hidráulica en la que se realizaron los ensayos trabaja bajo presiones altas alrededor de los 4000 [psi], para establecer la carga axial necesaria se necesitan presiones bajas en comparación a las de trabajo de la prensa. Esto representa limitaciones para poder establecer esta carga axial con exactitud, para solucionar este problema se utilizó un método alternativo descrito a continuación:

Se utilizó una prensa hidráulica alternativa, en la cual se conocía el diámetro del pistón y la cantidad de carga exacta que daba esta prensa que es de 30 [ton]. Se colocó un reloj comparador en la superficie superior del aislador, posterior a esto, se aplicó carga de 10 toneladas mientras se verifica cuanto marcaba el reloj comparador, (Ver Figura 78). De esta manera se puede conocer que para una determinada carga axial el aislador va a descender una determinada distancia, con lo cual se obtuvo lo siguiente:

Tabla 5

Desplazamiento según la carga axial aplicada.

AISLADOR	CARGA	DISTANCIA
ELASTOMÉRICO VIRGEN	10 [ton]	1,70 [mm]
	15 [ton]	2,46 [mm]
ELASTOMÉRICO RECICLADO	10 [ton]	1,48 [mm]
	15 [ton]	1,80 [mm]

Figura 78

Ensayo de compresión en los aisladores sísmicos.



Ensayos combinados de corte y compresión.

- Tres ciclos completos con inversión de carga para los desplazamientos: $0,2D_D$, $0,5D_D$ y $1,0 D_D$.

Tabla 6

Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 1.

DENOMINACIÓN	VALOR	UNIDAD
Carga axial	84,42	[KN]
	$0,2D_D = 12,6$	[mm]
Desplazamientos	$0,5D_D = 31,5$	[mm]
	$1,0D_D = 63$	[mm]

- Tres ciclos completos con inversión de carga para los desplazamientos: $0,2D_D$, $0,5D_D$ y $1,0 D_D$.

Tabla 7

Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 2.

DENOMINACIÓN	VALOR	UNIDAD
Carga axial	42,99	[KN]
	$0,2D_D = 12,6$	[mm]
Desplazamientos	$0,5D_D = 31,5$	[mm]
	$1,0D_D = 63$	[mm]

- Tres ciclos completos con inversión de carga para los desplazamientos: $0,2D_D$, $0,5D_D$ y $1,0 D_D$.

Tabla 8

Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 3.

DENOMINACIÓN	VALOR	UNIDAD
Carga axial	108,80	[KN]
	$0,2D_D = 12,6$	[mm]
Desplazamientos	$0,5D_D = 31,5$	[mm]
	$1,0D_D = 63$	[mm]

- Al menos 10 ciclos completos con inversión de carga para el desplazamiento de diseño total: $1,0 D_{TD}$.

Tabla 9

Cargas y desplazamientos para el ensayo combinado 4.

DENOMINACIÓN	VALOR	UNIDAD
Carga axial	108,8	[KN]
Desplazamiento	$1,0D_{TD} = 69$	[mm]

Debido a la dificultad de colocar cargas axiales pequeñas en la prensa hidráulica por lo antes explicado, los ensayos combinados se los realizó con una carga axial similar a la de los ensayos de compresión entre 10 y 12 toneladas. Otra dificultad que se presentó en estos

ensayos, es que los desplazamientos muy pequeños no pudieron ser ensayados, por lo que los desplazamientos mínimos ensayados fueron al 50 % del desplazamiento de diseño. Estas dificultades que se presentaron se deben a que en nuestro país no existe la tecnología adecuada para estos ensayos, por lo que, se debe adaptar ciertas máquinas para estos propósitos. Cabe recalcar que a pesar de no ensayar con las cargas axiales que se requiere y con el desplazamiento al 20 %, esto no afecta los resultados que se presentarán en los puntos siguientes ya que al soportar desplazamientos más grandes y con mayores cargas, queda entendido que estos desplazamientos y cargas que no fueron ensayados se satisfacen automáticamente. Desde la figura 79 a la 92 se pueden observar los distintos desplazamientos de los cuatro aisladores sísmicos.

Aislador sísmico elastomérico con material virgen 1.

CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 79

Desplazamiento $0,5D_D$ aislador elastomérico virgen 1.



CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 80

Desplazamiento $1,0 D_D$ aislador elastomérico virgen 1.



CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 81

Desplazamiento 1,1 D_D aislador elastomérico virgen 1.



Aislador sísmico elastomérico con material virgen 2.

CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 82

Desplazamiento 0,5 D_D aislador elastomérico virgen 2.



CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 83

Desplazamiento 1,0 D_D aislador elastomérico virgen 2.

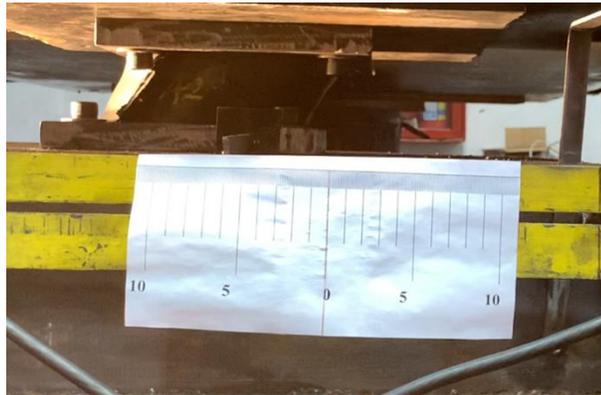


CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 84

Desplazamiento 1,1 D_D aislador elastomérico virgen 2.



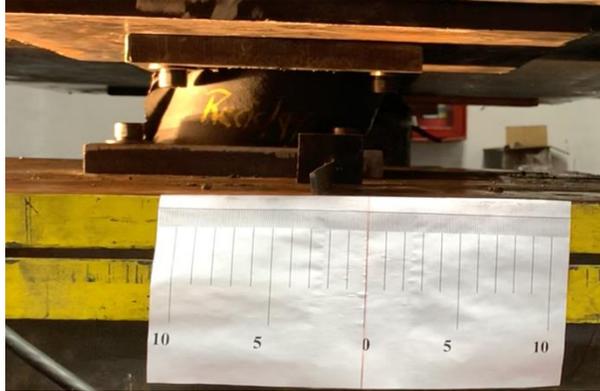
Aislador sísmico elastomérico con material mixto 1 (virgen 40 % - reciclado 60 %).

CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 85

Desplazamiento $0,5 D_D$ aislador elastomérico reciclado 1.



CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 86

Desplazamiento $1,0 D_D$ aislador elastomérico reciclado 1.



CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 87

Desplazamiento 1,1 D_D aislador elastomérico reciclado 1.



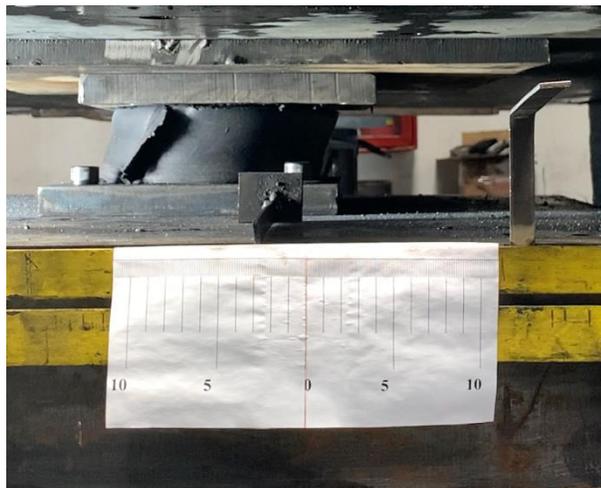
Aislador sísmico elastomérico con material mixto 2 (virgen 40 % - reciclado 60 %).

CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 88

Desplazamiento 0,5 D_D aislador elastomérico reciclado 2.

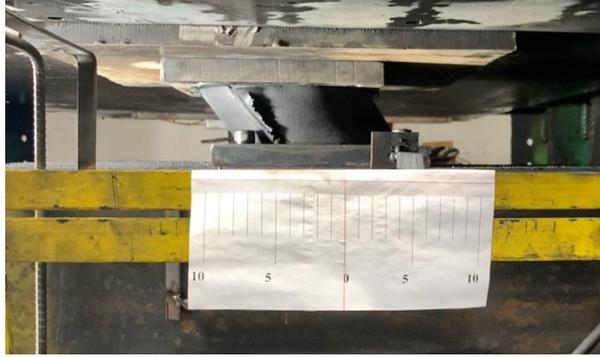


CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 89

Desplazamiento 1,0 D_D aislador elastomérico reciclado 2.

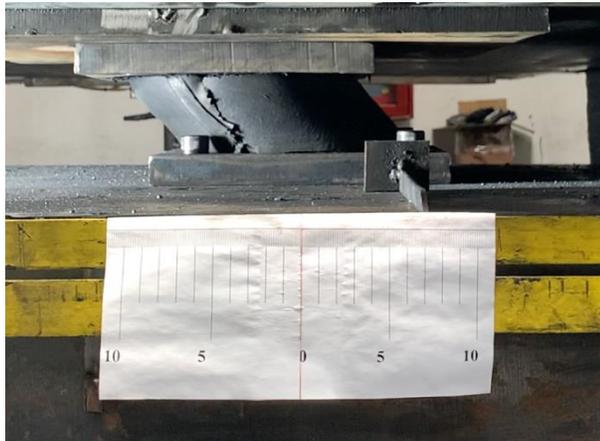


CARGA AXIAL: 10 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 90

Desplazamiento 1,1 D_D aislador elastomérico reciclado 2.



Ensayos realizados al 140% del desplazamiento de diseño.

CARGA AXIAL: 15 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 91

Desplazamiento $1,4 D_D$ aislador elastomérico virgen.



CARGA AXIAL: 15 toneladas

CARGA LATERAL: 8 - 11 toneladas

Figura 92

Desplazamiento $1,4 D_D$ aislador elastomérico reciclado.



Análisis de resultados

Inspección visual de los prototipos.

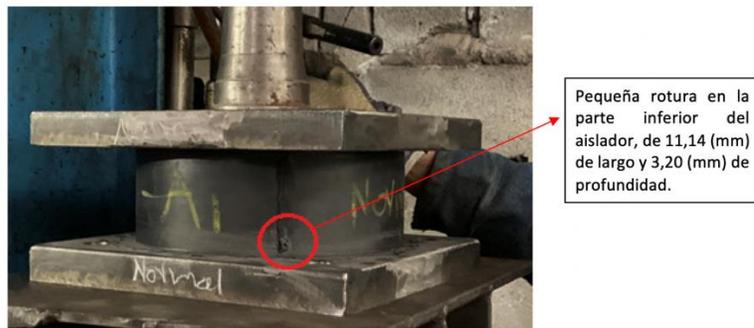
Ensayos de compresión.

i. Aisladores sísmicos elastoméricos con material virgen

Al ser comprimido el aislador virgen 1 con una carga de 10 toneladas durante cinco minutos éste no sufrió ningún tipo de falla, mientras que al aplicar 15 toneladas durante el mismo tiempo se puede apreciar en la Figura 93 una pequeña abertura de 11,14 (mm) de largo y 3,20 (mm) de profundidad en la parte inferior de la costura, ésta se formó al momento de retirar la rebaba formada por el molde en la fabricación. El aislador virgen 2 no tuvo ninguna observación en el ensayo de compresión.

Figura 93

Falla encontrada en el A.E.V.1 a 15 toneladas de compresión.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

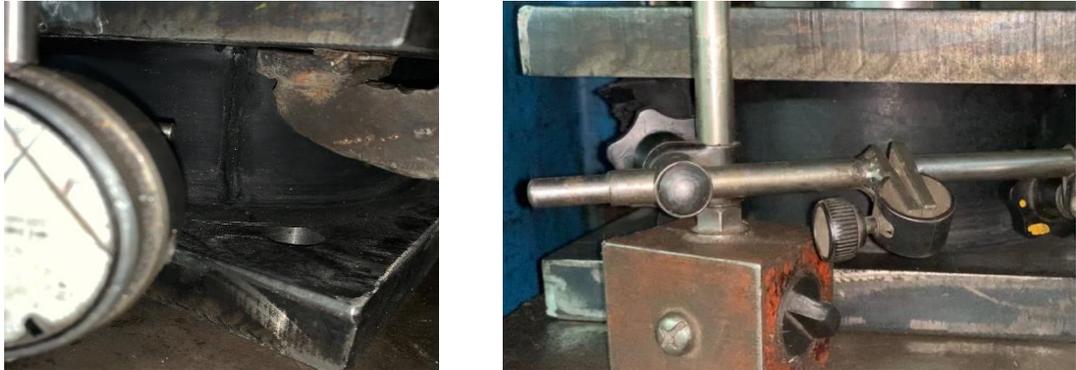
ii. Aisladores sísmicos elastoméricos con material mixto

Como se observa en la Figura 94, el aislador elastomérico fabricado con un porcentaje de material reciclado no sufrió ninguna falla con 10 o 15 toneladas carga después de 5 minutos.

Cabe recalcar que este tipo de aislador recupera su altura y diámetro originales después de 10 minutos retirada la carga y terminado el ensayo, mientras que el elastómero virgen se recupera inmediatamente en menos de 1 minuto.

Figura 94

Aislador de elastómero mezclado durante la compresión.



Nota. Ensayo sobre los aisladores vírgenes al a) 50%, b) 100% y c) 110% del desplazamiento de diseño.

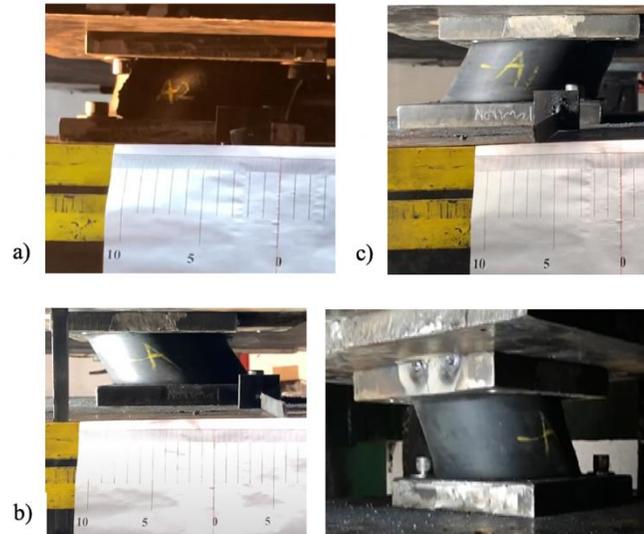
Ensayos combinados de compresión y corte.

- i. Aisladores sísmicos elastoméricos con material virgen
 - o *Ensayo al 50%, 100% y 110% del desplazamiento de diseño y con una carga axial de 10 toneladas*

En los ensayos, como se distingue en la Figura 95, no existe la presencia de ningún tipo de falla al momento del ensayo ni después del mismo. Los aisladores se conservaron intactos para cada uno de los desplazamientos. Se usó una fuerza lateral con un rango entre 8 y 11 toneladas, siendo la mayor carga cuando el aislador presenta el mayor desplazamiento en el ensayo.

Figura 95

Ensayo al 50%, 100% y 110% con 10 toneladas de compresión.



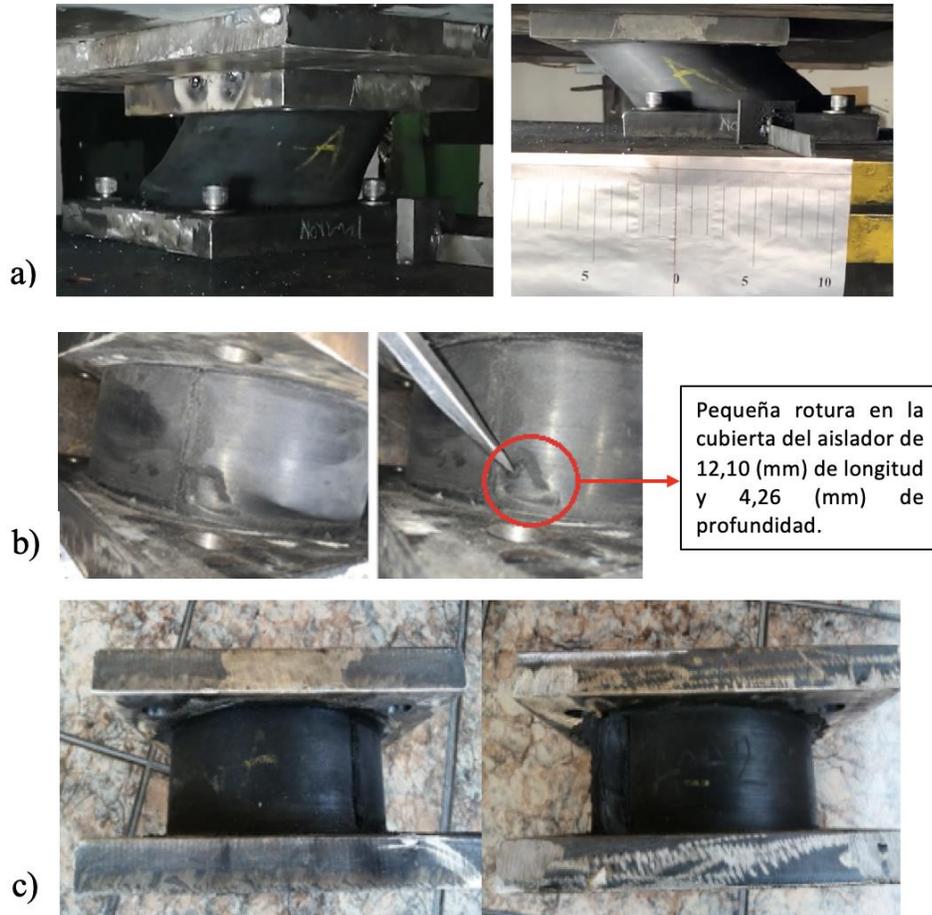
Nota. Ensayo sobre los aisladores vírgenes al a) 50%, b) 100% y c) 110% del desplazamiento de diseño.

- *Ensayo al 140% del desplazamiento de diseño y con una carga axial de 10 toneladas*

En los ensayos al 140% del desplazamiento de diseño y con una carga axial de 15 toneladas, cabe mencionar que este desplazamiento es mayor al indicado por la norma, presentó una pequeña rotura externa en la cubierta de elastómero del aislador como se presenta en la Figura 96b de 12,10 (mm) de longitud y 4,26 (mm) de profundidad, falla que no representa ningún peligro, (Ver Figura 96).

Figura 96

Ensayo al 140% del desplazamiento de diseño y 15 toneladas de compresión.



Nota. Ensayo sobre los aisladores vírgenes al a) 140% del desplazamiento de diseño. b) Pequeña rotura. c) Aisladores de elastómero virgen después del ensayo.

ii. Aisladores sísmicos elastoméricos con material mixto

- *Ensayo al 50% del desplazamiento de diseño con una carga axial de 10 toneladas.*

Durante los 3 ciclos de ensayo, el aislador fabricado con un porcentaje de 60% de material reciclado de neumático, no mostró ninguna señal de falla como se puede observar en la

Figura 97, el ensayo se realizó con una fuerza lateral entre 8 y 11 toneladas al momento que el aislador presenta 31 (mm) de desplazamiento.

Figura 97

Ensayo al 50% del desplazamiento de diseño y 10 toneladas de compresión.



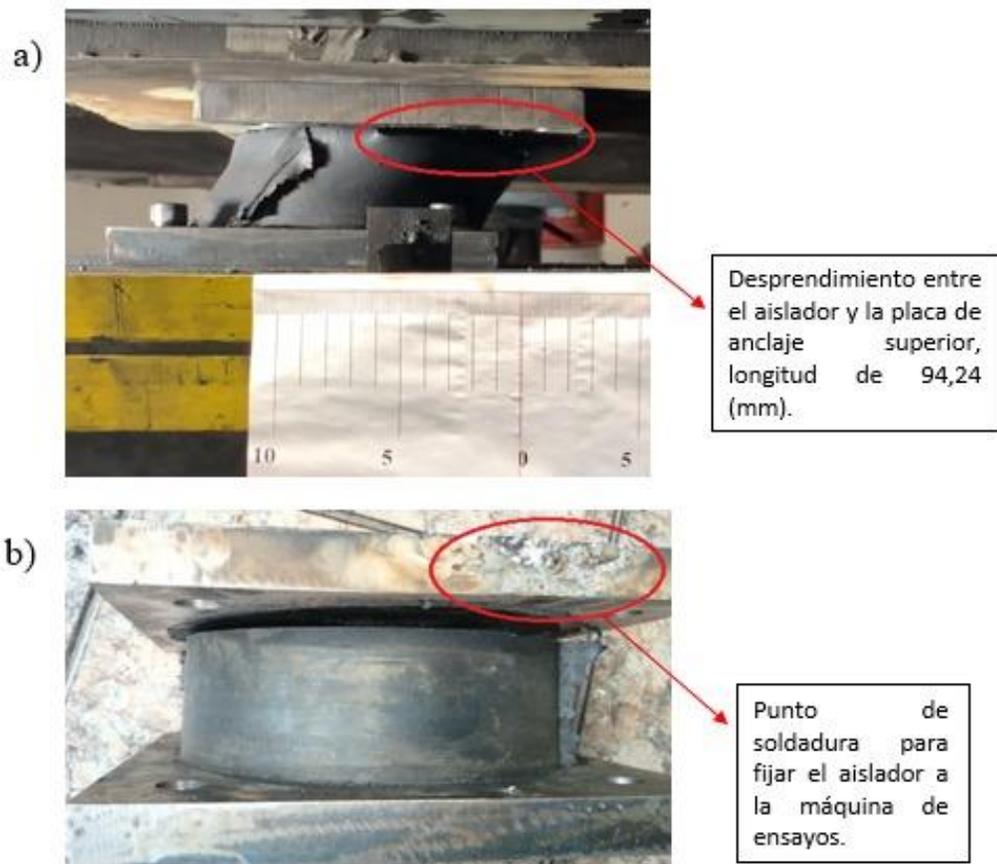
Nota. Ensayo sobre los aisladores reciclados al 50% del desplazamiento de diseño.

- *Ensayo al 100% del desplazamiento de diseño con una carga axial de 10 toneladas.*

Como se puede ver en la Figura 98a, a un desplazamiento mayor de ensayo se presenta un desprendimiento al segundo ciclo en la parte superior entre el aislador con respecto a la placa de anclaje, como se puede ver en la Figura 98a la longitud de desprendimiento es de 94,24 (mm) en el lado derecho de la imagen. Esta falla se puede deber a que la placa de anclaje fue soldada (Figura 98b) a la máquina para poder fijar el aislador, debilitando así el pegamento aplicado antes de la vulcanización debido a la transferencia de calor.

Figura 98

Ensayo al 100% del desplazamiento de diseño y 10 toneladas de compresión.



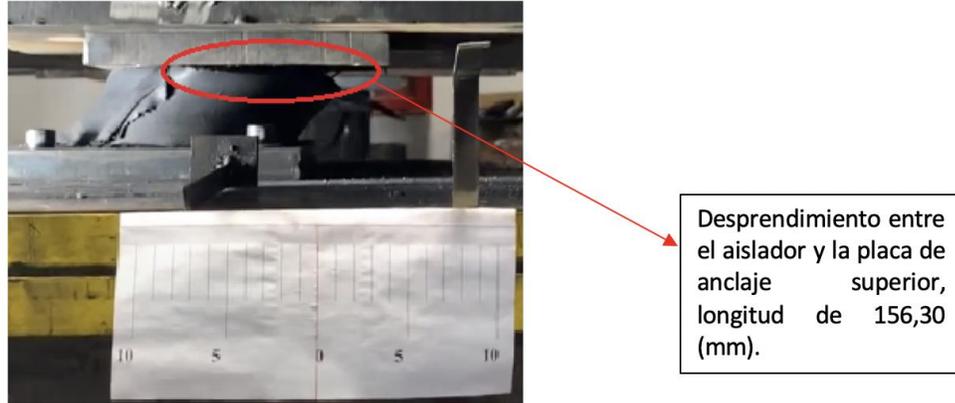
Nota. a) Ensayo sobre los aisladores reciclados al 100% del desplazamiento de diseño. b) Punto de soldadura usado para fijar el aislador a la máquina.

- *Ensayo al 110% del desplazamiento de diseño con una carga axial de 10 toneladas.*

Al aumentar el desplazamiento, el desprendimiento en el aislador afectado aumentó de 94,24 (mm) a 156,30 (mm) como se aprecia en la Figura 99.

Figura 99

Ensayo al 110% del desplazamiento de diseño y 10 toneladas de compresión.



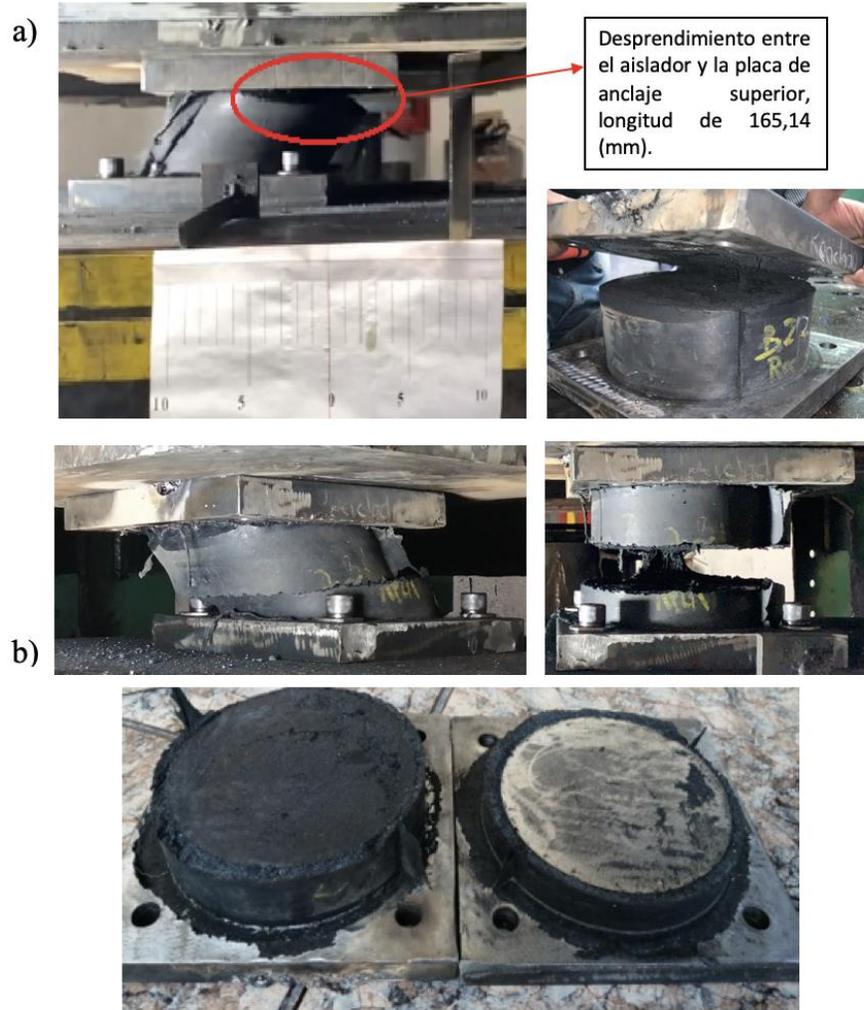
Nota. Ensayo sobre los aisladores reciclados al 110% del desplazamiento de diseño.

- *Ensayo al 140% del desplazamiento de diseño con una carga axial de 10 toneladas.*

Al someter a los aisladores a un desplazamiento mayor al indicado por la norma, una sobrecarga en la compresión de 15 toneladas y la carga lateral entre 8 a 11 toneladas, se dieron dos diferentes casos de falla. En el caso del aislador que tenía una falla debido a los ensayos previos, el desprendimiento existente aumentó de 156,30 (mm) a 165,14 (mm), mientras que en el otro aislador se presentó una rotura total en la parte media del mismo como se aprecia en la Figura 100b, esto debido al material combinado utilizado para su construcción que no tiene la suficiente capacidad de elongación, (Ver Figura 100).

Figura 100

Ensayo al 140% del desplazamiento de diseño y 15 toneladas de compresión.



Nota. Ensayo sobre los aisladores reciclados al 140% del desplazamiento de diseño. a) Aislador uno con desprendimiento entre aislador y la placa de anclaje. b) Aislador dos con una rotura longitudinal total en el aislador.

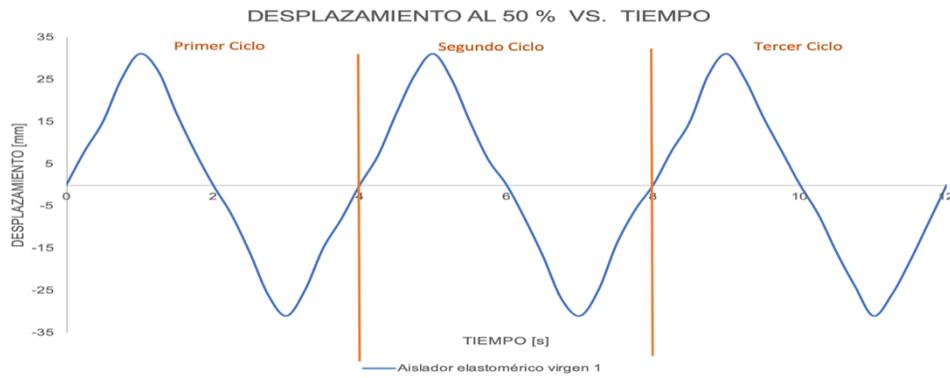
Gráficas obtenidas de los ensayos.

Las siguientes gráficas desde la 101 hasta la 132 han sido obtenidas a partir de cálculos realizados.

Aislador sísmico elastomérico con material virgen 1.

Figura 101

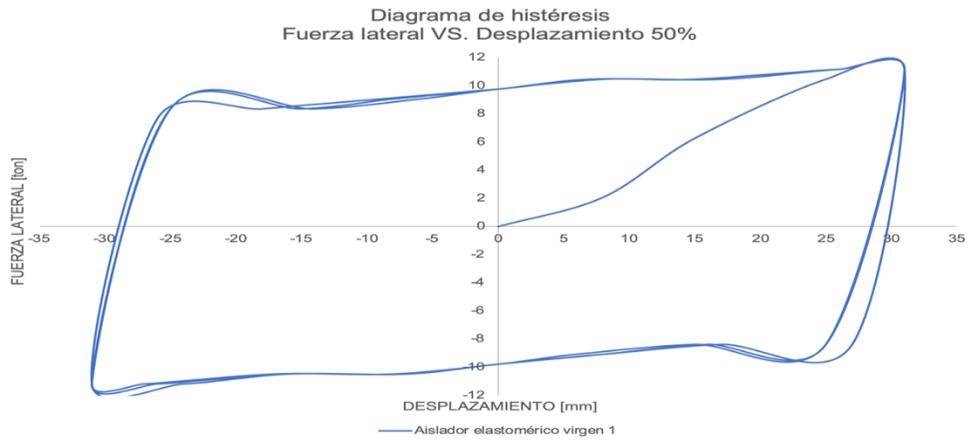
Desplazamiento 0,5 D_D A.E.V.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 102

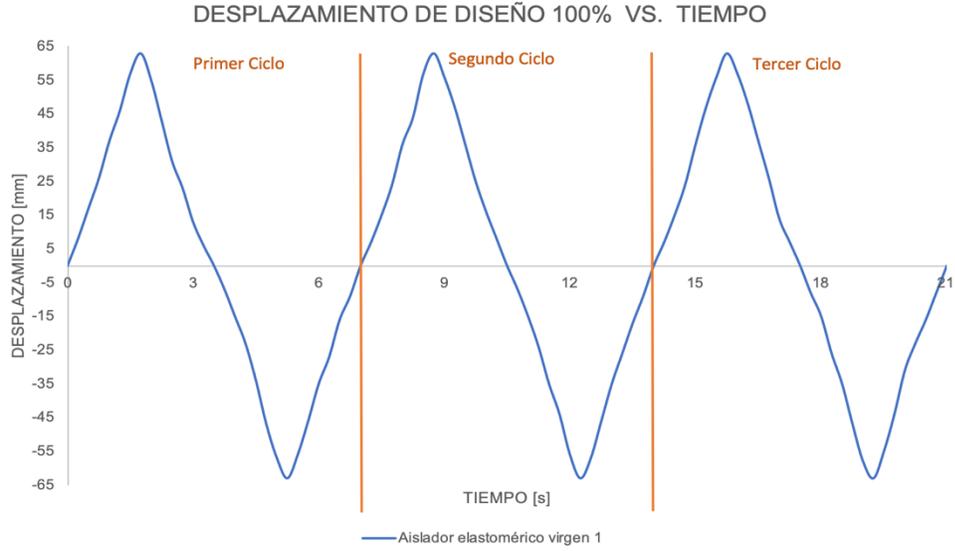
Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 0,5 D_D.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 103

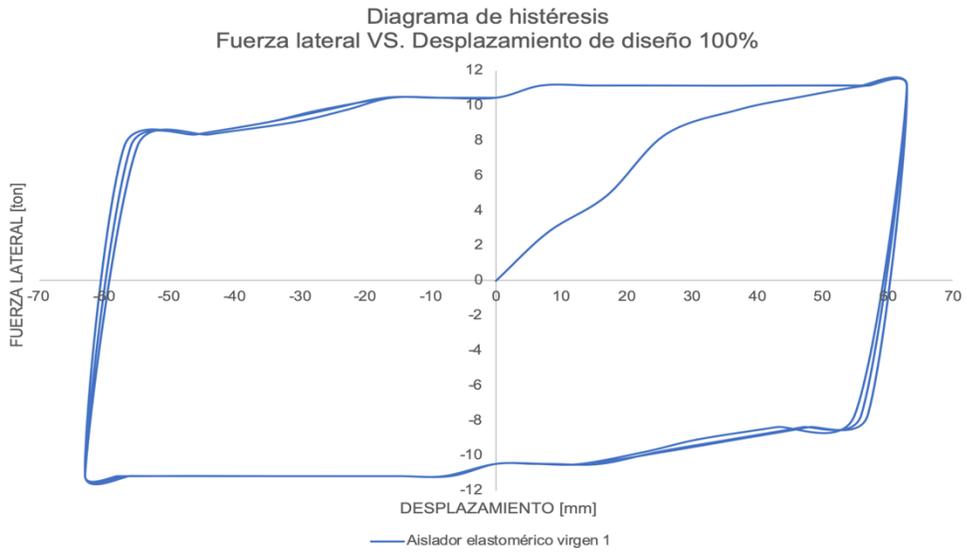
Desplazamiento 1,0 D_D A.E.V.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 104

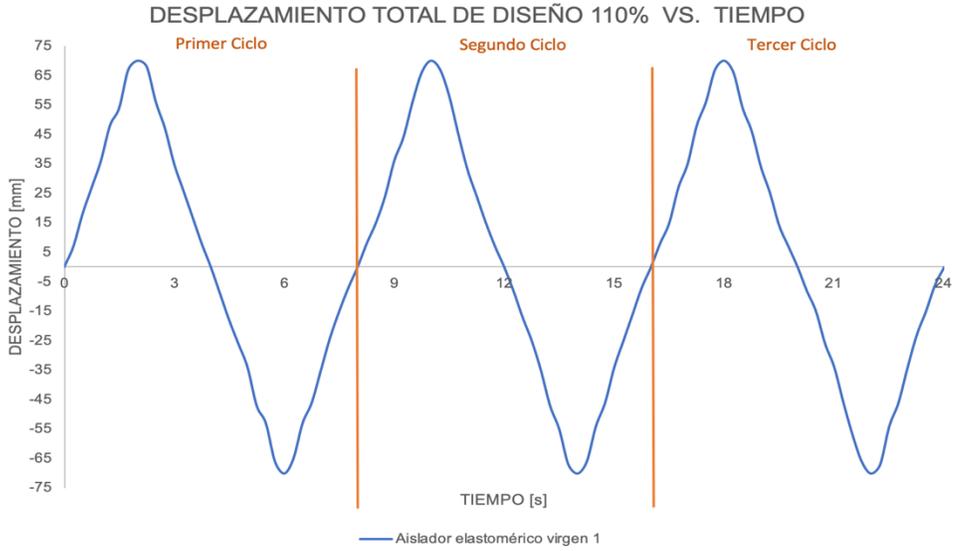
Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 1,0 D_D.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 105

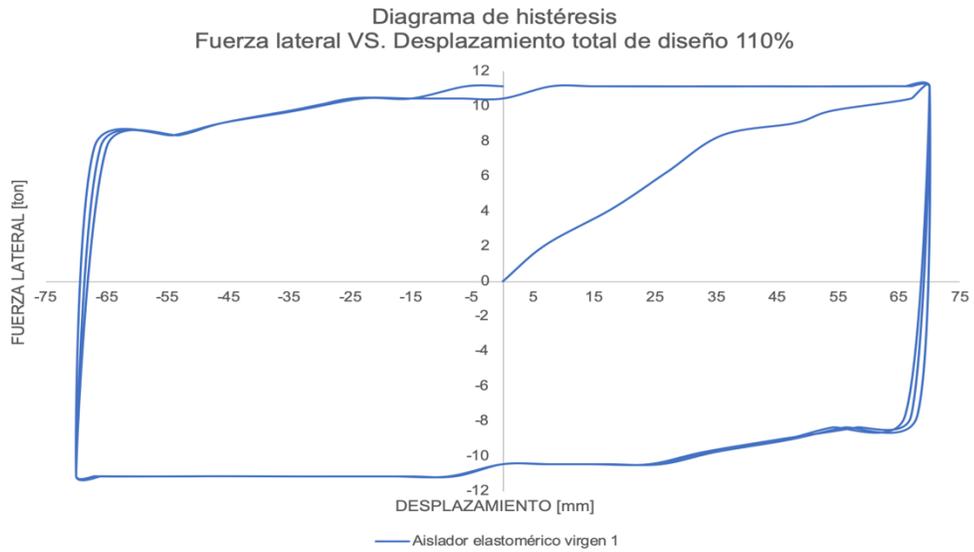
Desplazamiento 1,1 D_D A.E.V.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 106

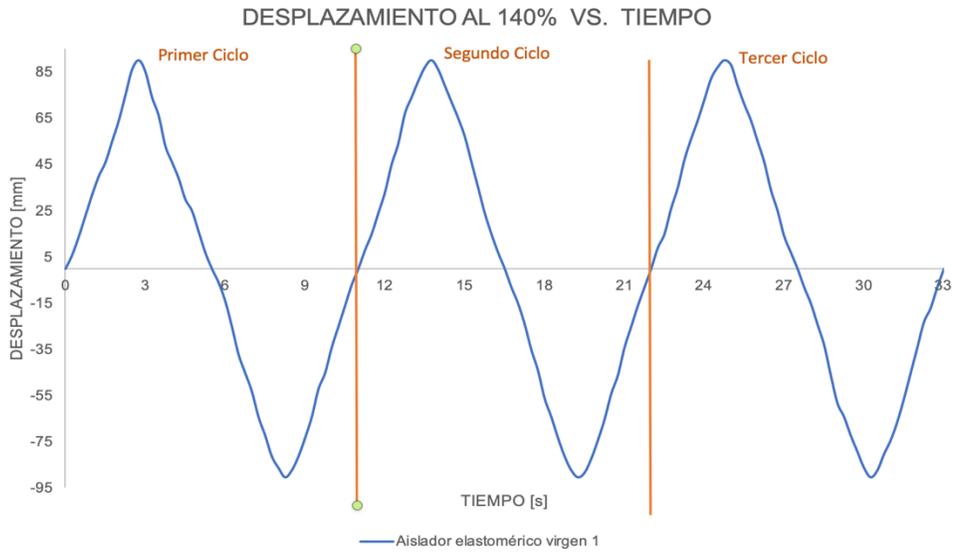
Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 1,1 D_D.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 107

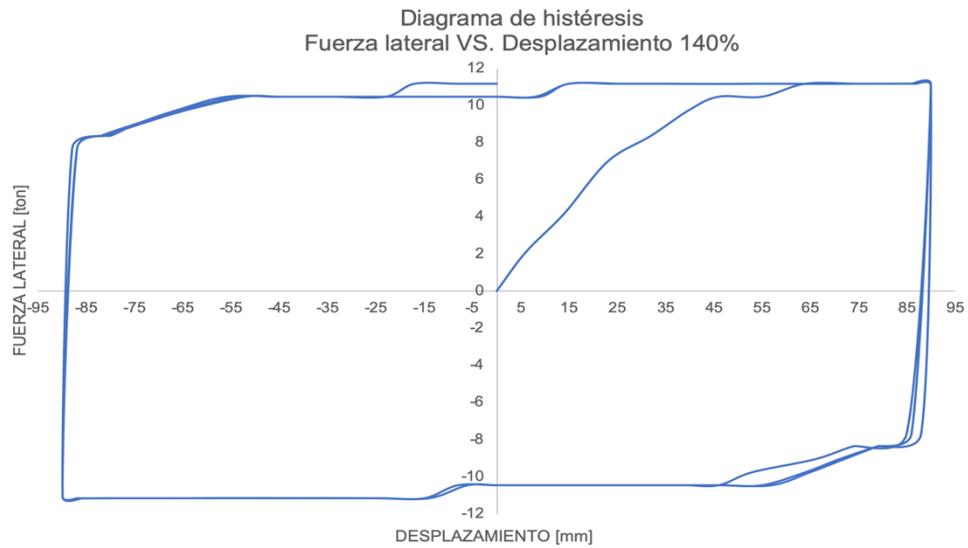
Desplazamiento 1,4 D_D A.E.V.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Figura 108

Diagrama de histéresis A.E.V.1 - desplazamiento 1,4 D_D

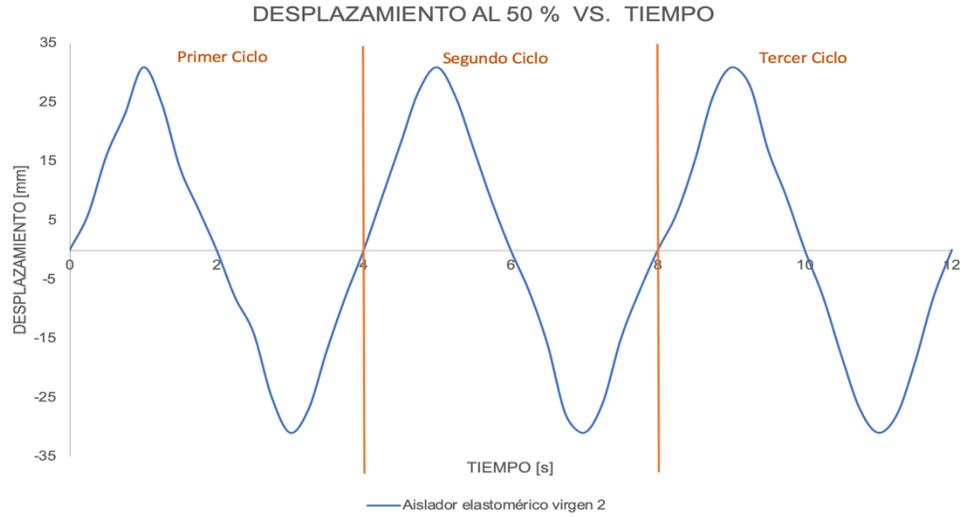


Nota. A.E.V.1 = Aislador elastomérico virgen 1.

Aislador sísmico elastomérico con material virgen 2.

Figura 109

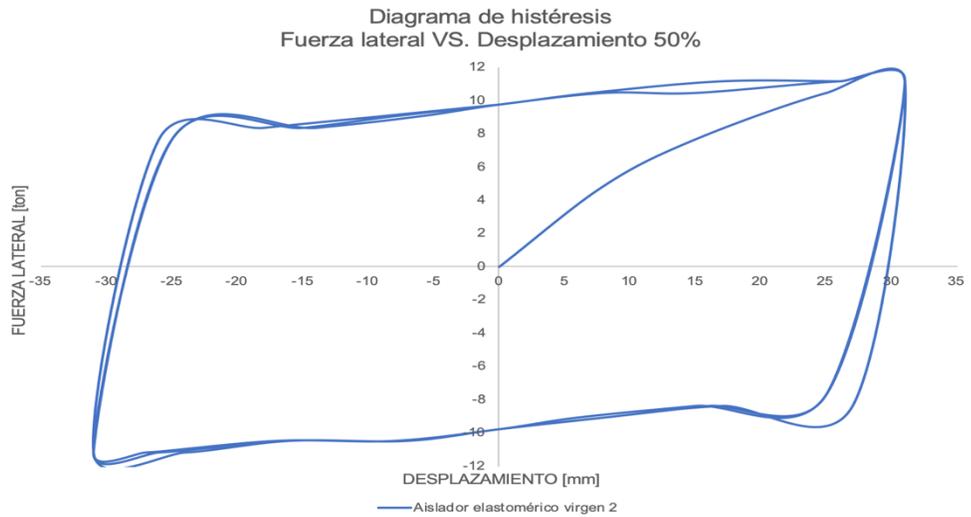
Desplazamiento 0,5 D_D A.E.V.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 110

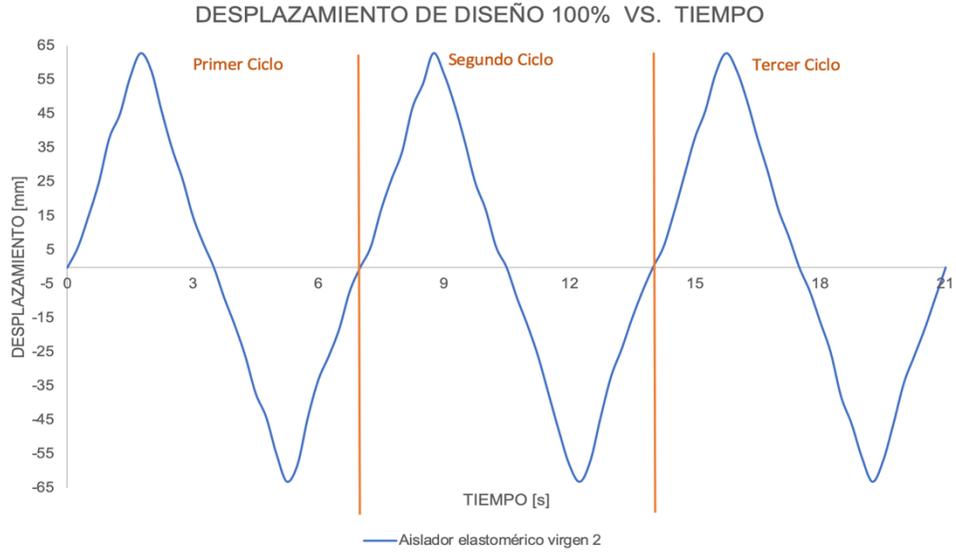
diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 0,5 D_D .



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 111

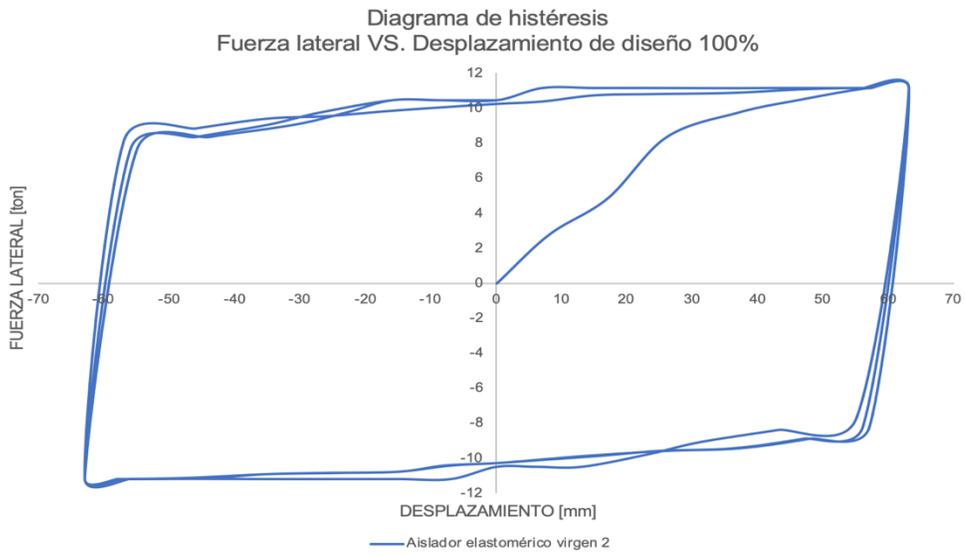
Desplazamiento 1,0 D_D A.E.V.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 112

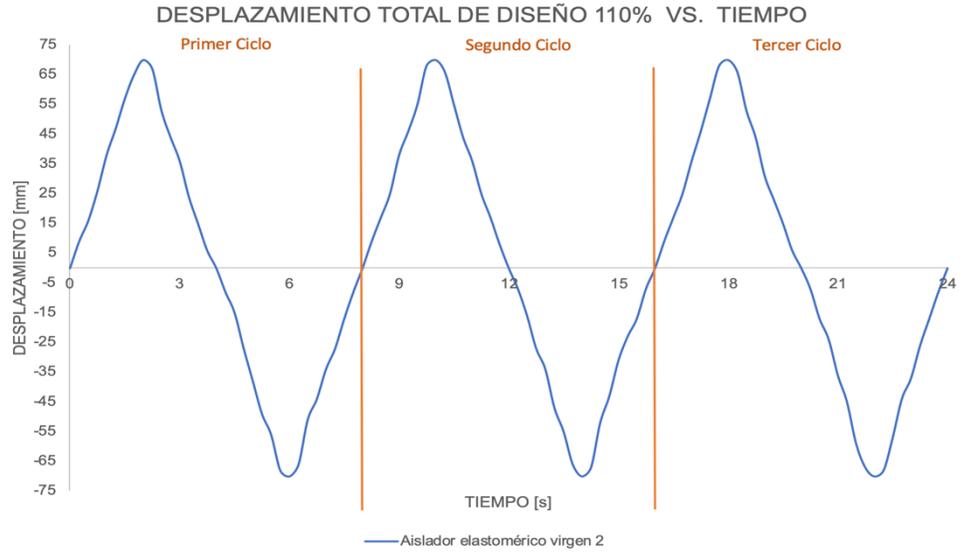
Diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 1,0 D_D.



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 113

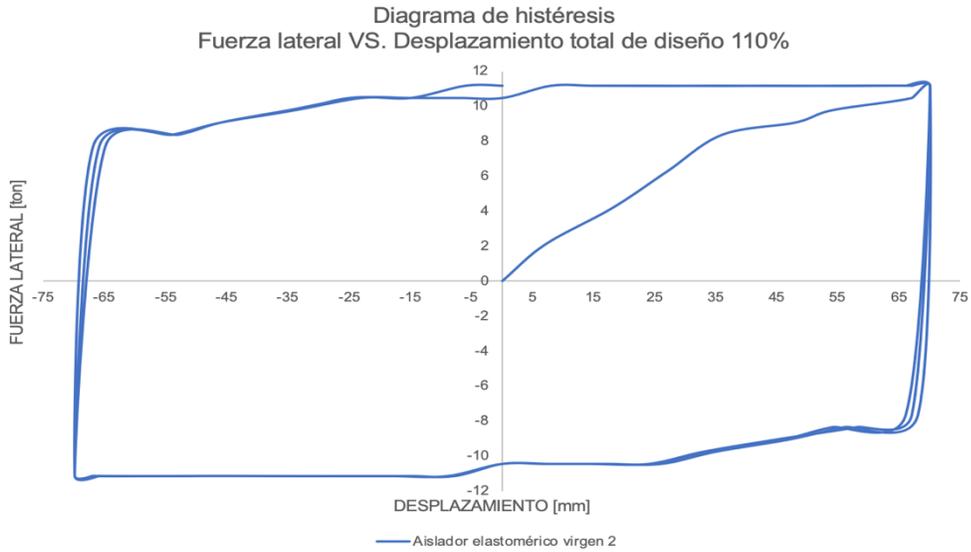
Desplazamiento 1,1 D_D A.E.V.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 114

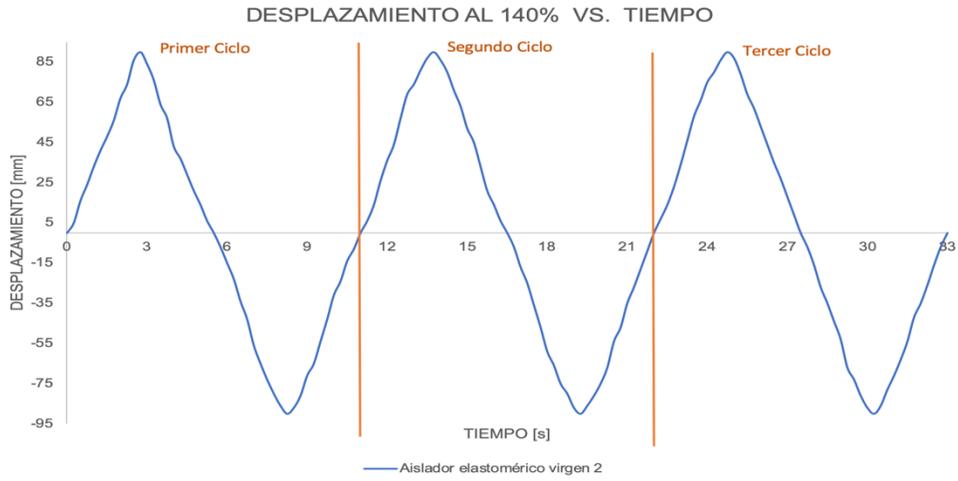
Diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 1,1 D_D.



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 115

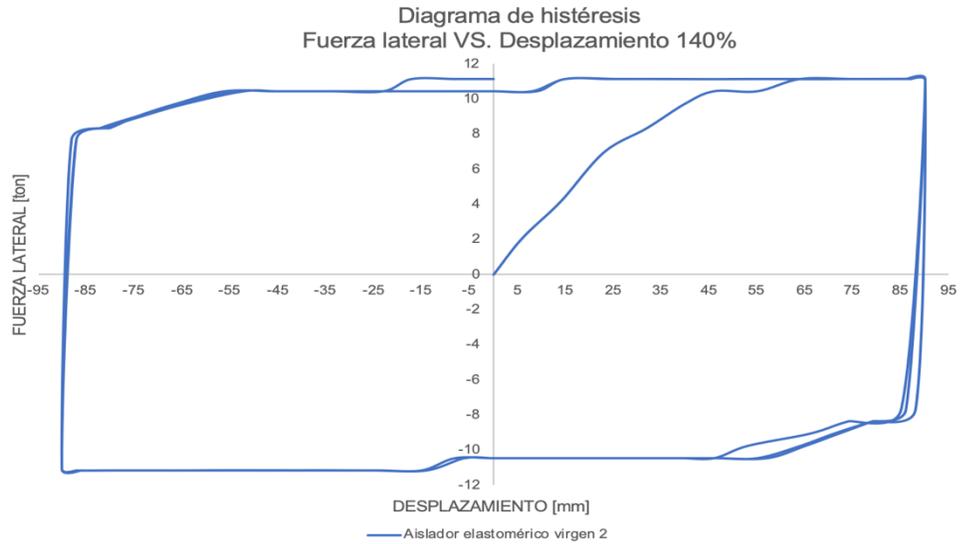
Desplazamiento 1,4 D_D A.E.V.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Figura 116

Diagrama de histéresis A.E.V.2 - desplazamiento 1,4 D_D.

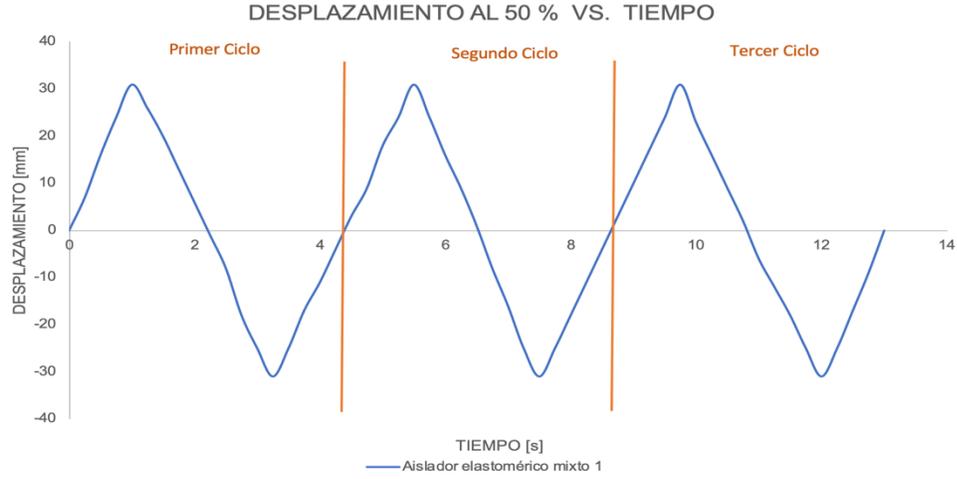


Nota. A.E.V.2 = Aislador elastomérico virgen 2.

Aislador sísmico elastomérico con material mixto 1 (virgen 40 % - reciclado 60 %).

Figura 117

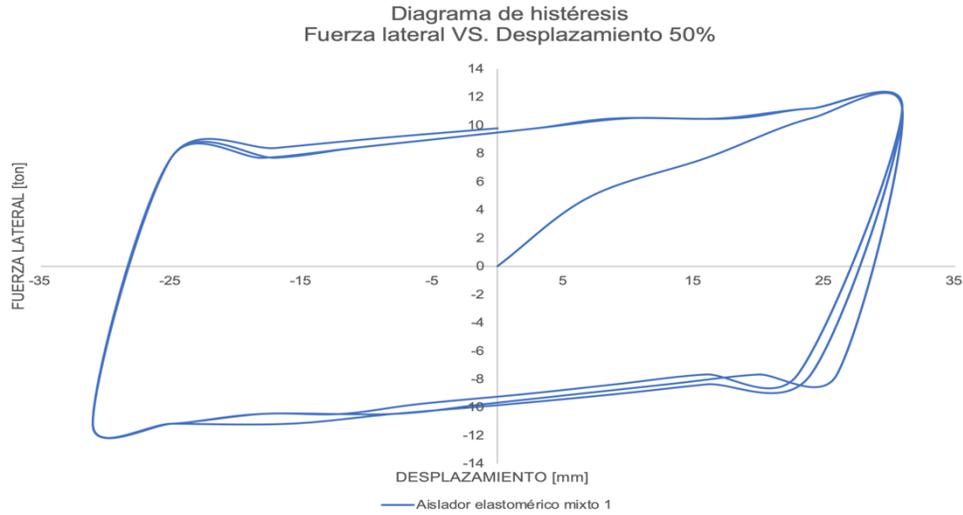
Desplazamiento 0,5 D_D A.E.M.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 118

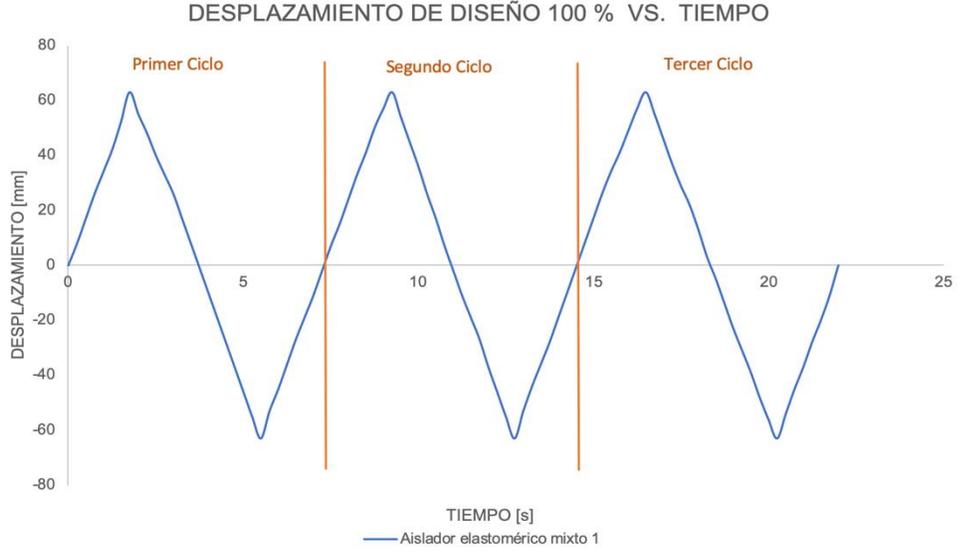
Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 0,5 D_D .



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 119

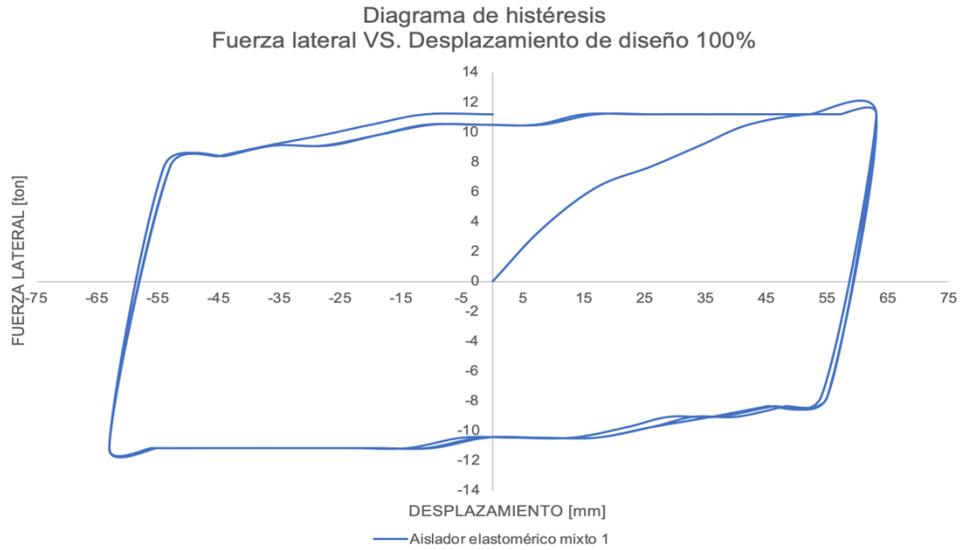
Desplazamiento 1,0 D_D A.E.M.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 120

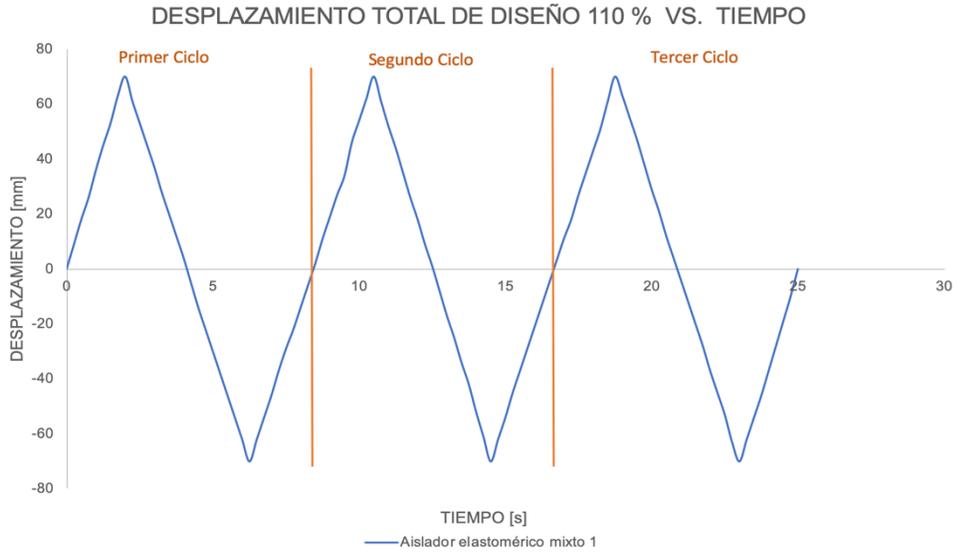
Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 1,0 D_D.



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 121

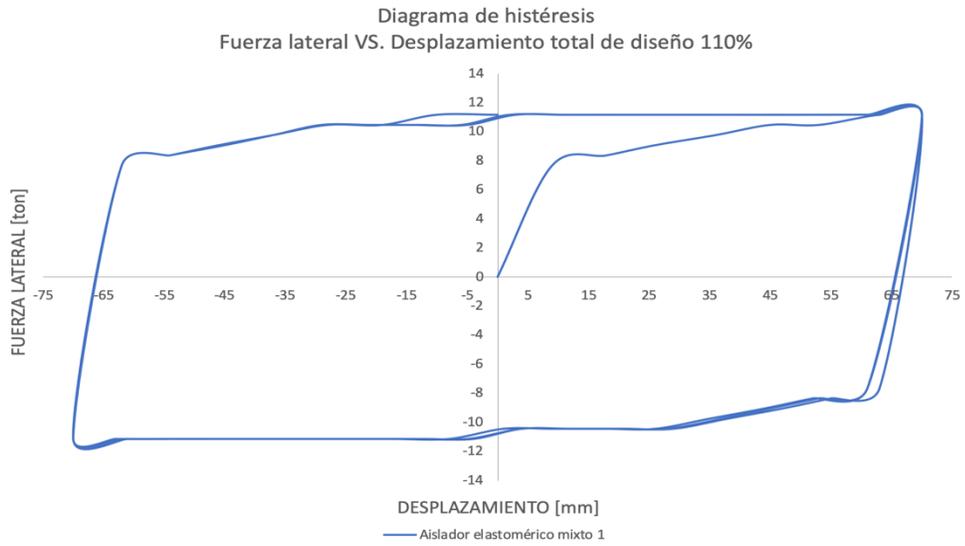
Desplazamiento 1,1 D_D A.E.M.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 122

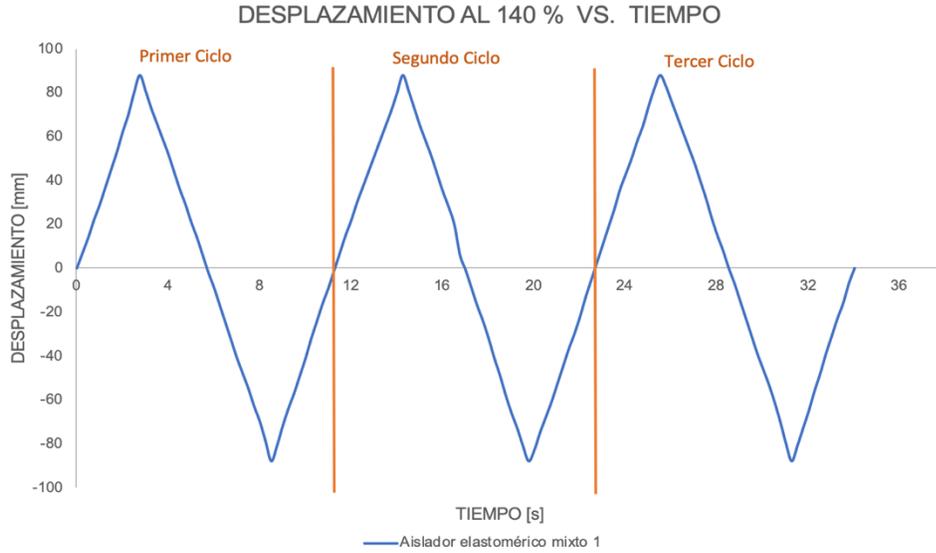
Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 1,1 D_D .



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 123

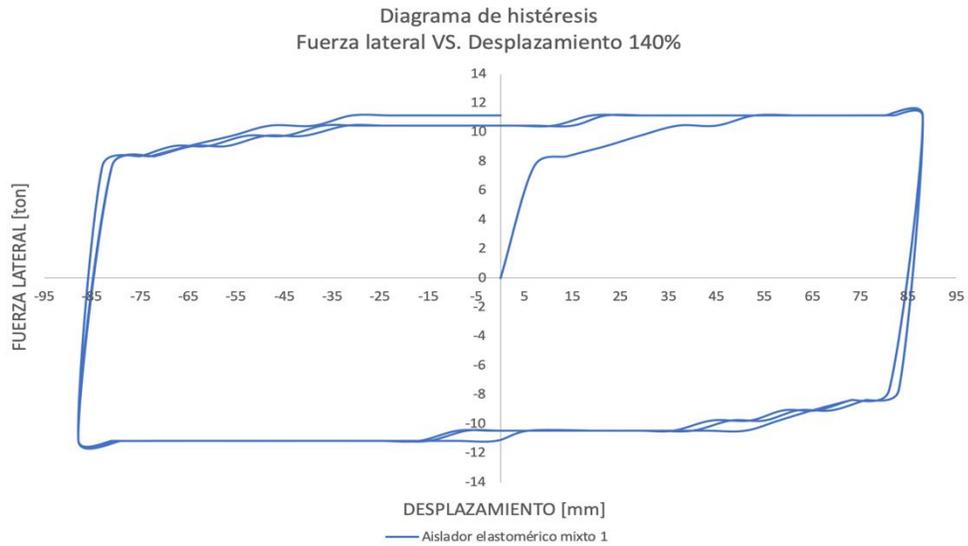
Desplazamiento 1,4 D_D A.E.M.1 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Figura 124

Diagrama de histéresis A.E.M.1 - desplazamiento 1,4 D_D .

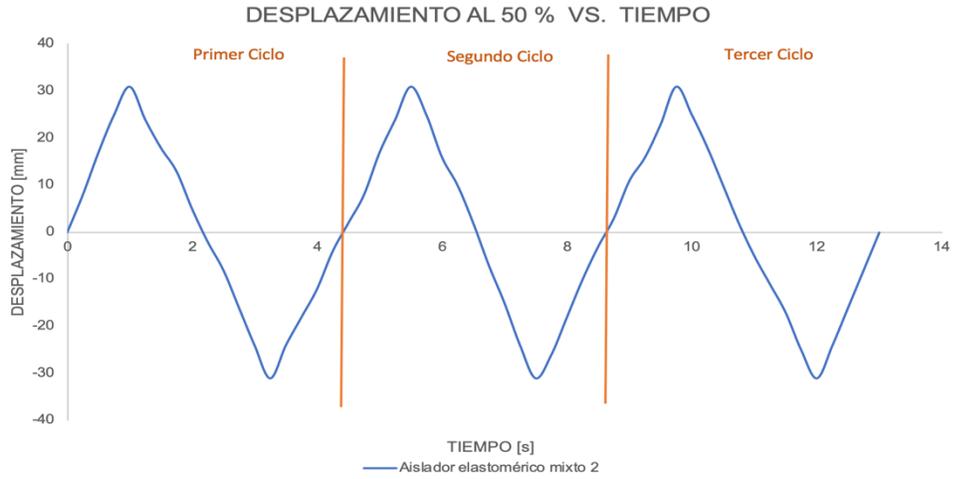


Nota. A.E.M.1 = Aislador elastomérico mixto 1.

Aislador sísmico elastomérico con material mixto 2 (virgen 40 % - reciclado 60 %).

Figura 125

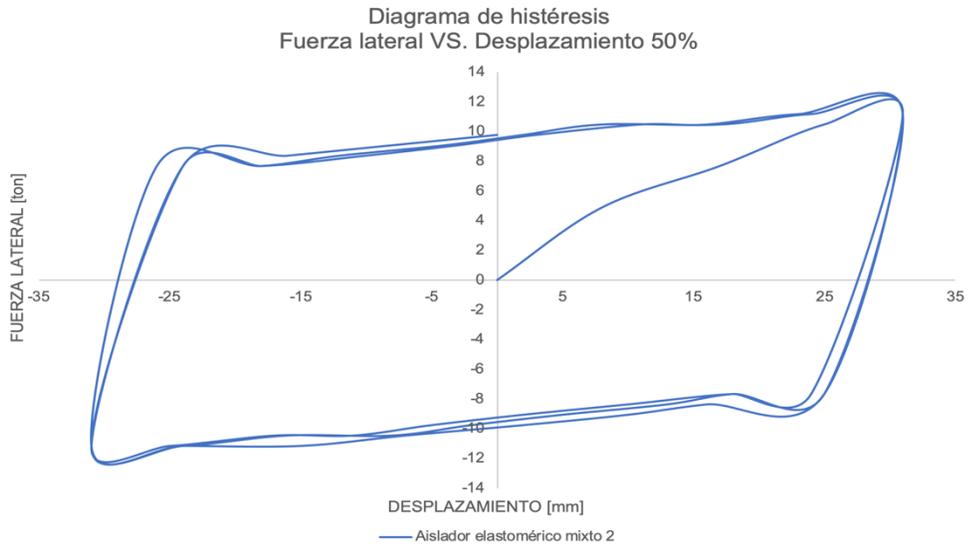
Desplazamiento 0,5 D_D A.E.M.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 126

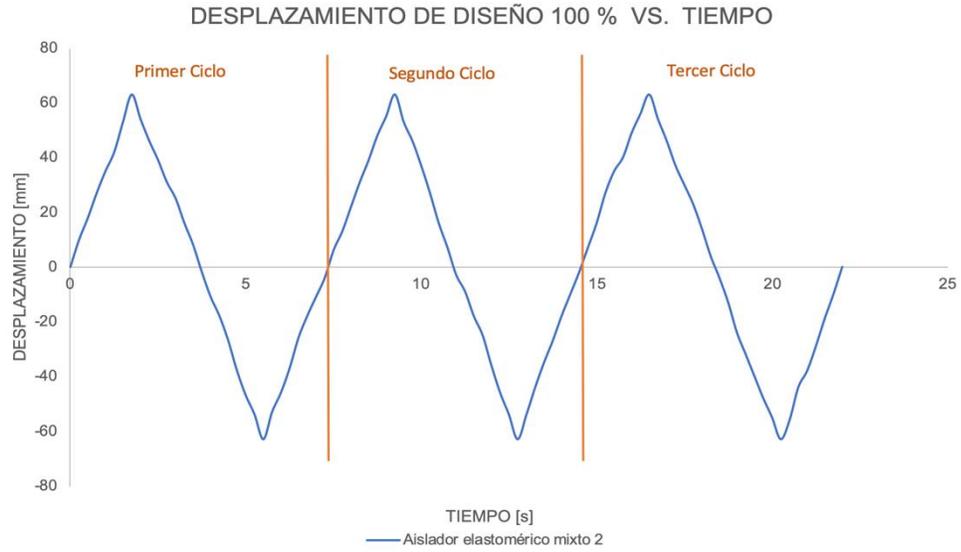
Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 0,5 D_D .



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 127

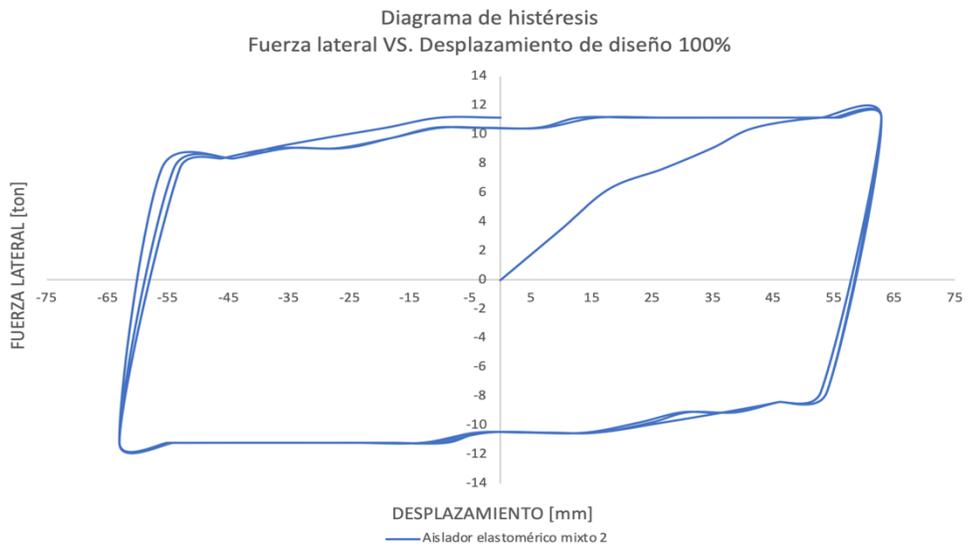
Desplazamiento 1,0 D_D A.E.M.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 128

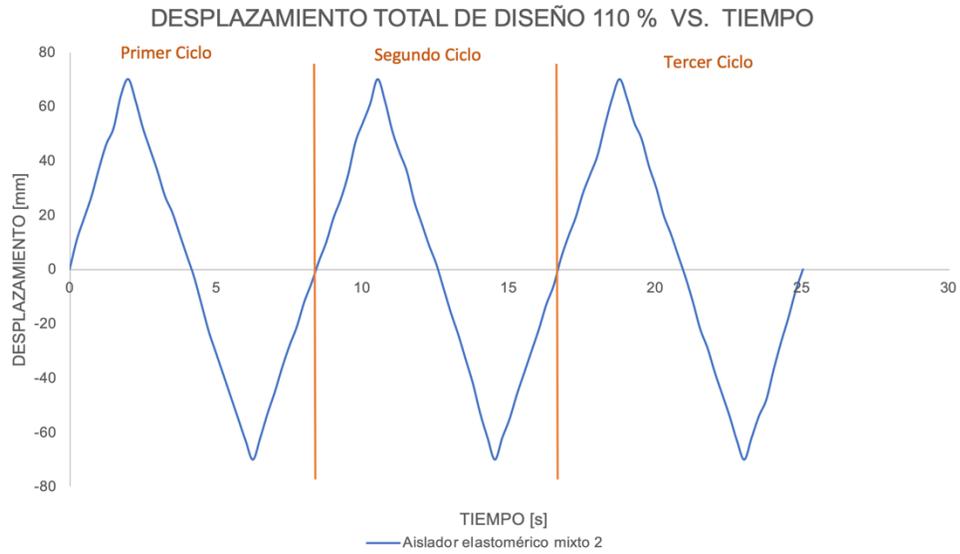
Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 1,0 D_D.



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 129

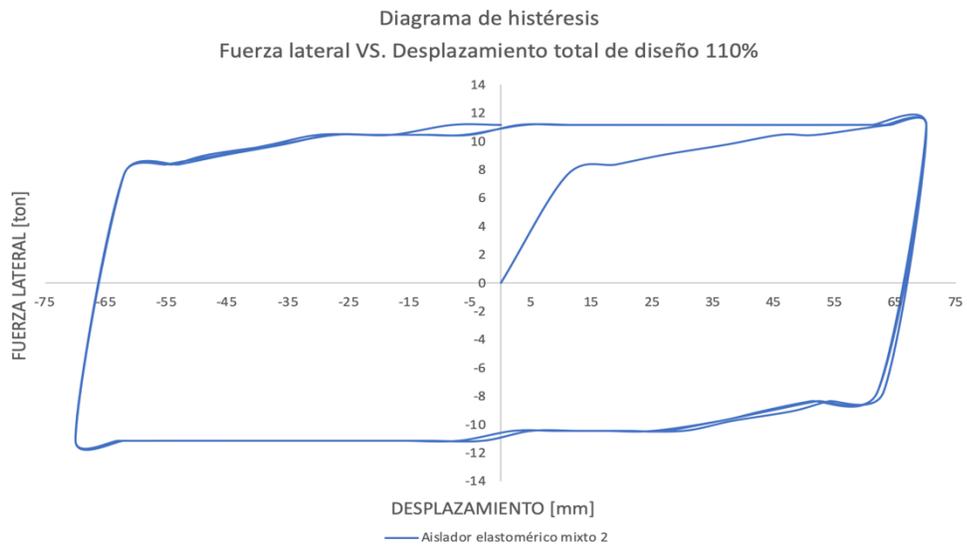
Desplazamiento 1,1 D_D A.E.M.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 130

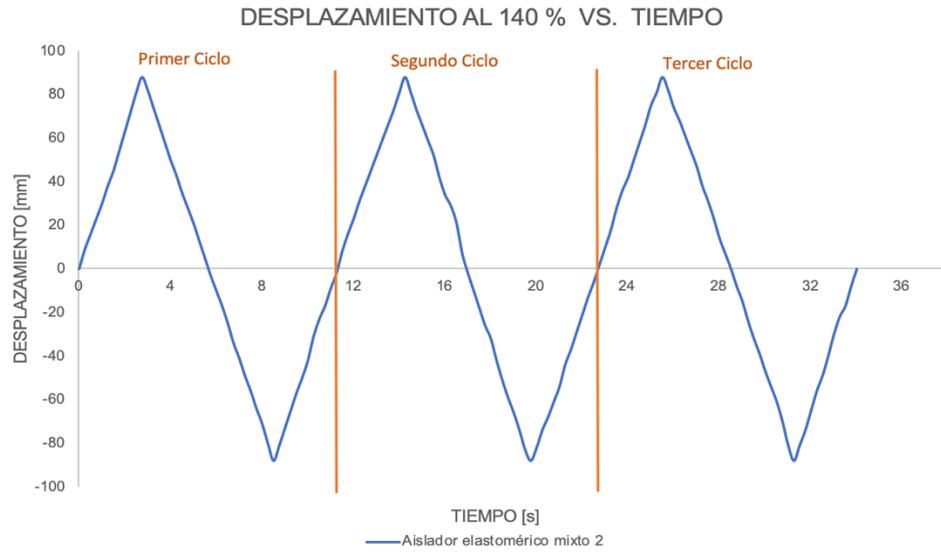
Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 1,1 D_D .



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 131

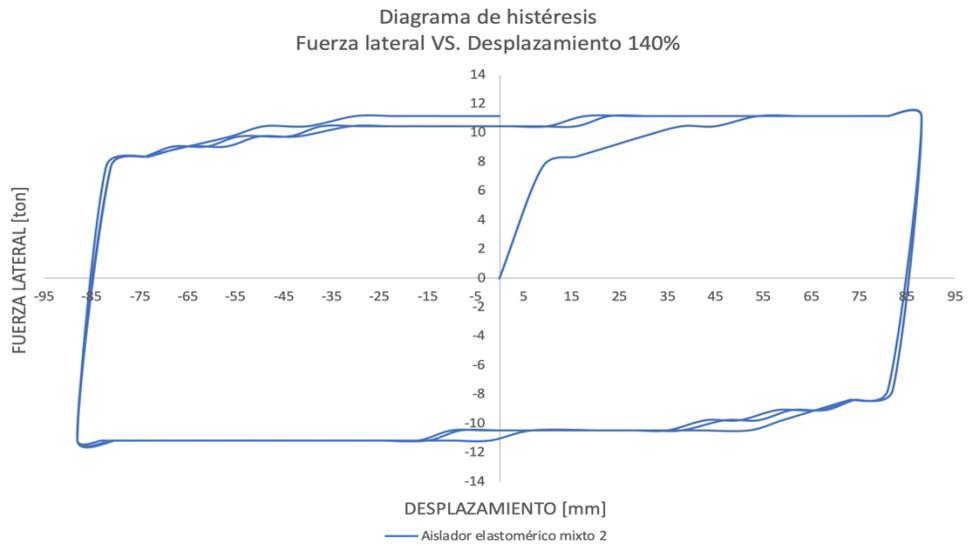
Desplazamiento 1,4 D_D A.E.M.2 vs. Tiempo.



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Figura 132

Diagrama de histéresis A.E.M.2 - desplazamiento 1,4 D_D.



Nota. A.E.M.2 = Aislador elastomérico mixto 2.

Análisis de las gráficas desplazamiento vs. tiempo.

Las gráficas fueron realizadas para los tres primeros ciclos de ensayo y se demuestra con la curva sinusoidal, la inversión de carga. De estas imágenes, además se puede observar que a medida que aumenta el desplazamiento de ensayo, mayor es el tiempo que se demora el aislador sísmico en producir un ciclo.

Para un determinado desplazamiento, el tiempo que requieren los aisladores sísmicos para cumplir un ciclo sin importar si son con material virgen o material mixto, es similar con una variación de segundos entre el uno y el otro. La diferencia de segundos en completar un ciclo, se debe a que el material mixto se demora más tiempo en recuperar su estado original y por ende presenta mayor resistencia al desplazamiento, como se pudo evidenciar en los ensayos de compresión.

Análisis de las gráficas fuerza lateral vs. desplazamiento.

Las gráficas fueron realizadas para los tres primeros ciclos de ensayo. La fuerza obtenida en el eje Y, es la fuerza lateral absorbida por el aislador en cada punto de desplazamiento. Esta fuerza hidráulica fue obtenida de la siguiente manera: Se obtuvo la fuerza marcada en la carátula del manómetro de la unidad hidráulica, a ésta se le resto la fuerza producida cada 0,25 segundos de desplazamiento más la fuerza de rozamiento que tiene el bloque que contiene a los aisladores, el resultado de este cálculo es la fuerza lateral que absorbe el aislador sísmico cada cierto desplazamiento.

Como se puede observar las imágenes son muy similares, ya que se hicieron bajo las mismas condiciones de fuerza latera donde el aislador absorbió fuerzas lateral ente 8 y 11 toneladas para conseguir los desplazamientos máximos. La diferencia que existe en cada ensayo es que, a mayor desplazamiento mayor es la energía absorbida por el aislador en cada ciclo. Esto

se puede observar en la Figura 112 y la Figura 114 donde el aislador A.E.V.2 absorbe más energía en el ensayo al 110 % del desplazamiento de diseño que al 100 %, esto se a que al 110 % el aislador se desplazó 140 (mm) en un ciclo, mientras que al 100 % se desplazó 126 (mm).

Simulación por elementos finitos

En la máquina INSTRON 8801 del laboratorio de mecánica de materiales, se realizó un ensayo aplicando carga lateral y no carga axial sobre un aislador elastomérico virgen (Ver Figura 133). En este ensayo se obtuvo una gráfica Carga Vs. Extensión como se puede observar en la Figura 134 con sus respectivos puntos (Ver Tabla 10).

Figura 133

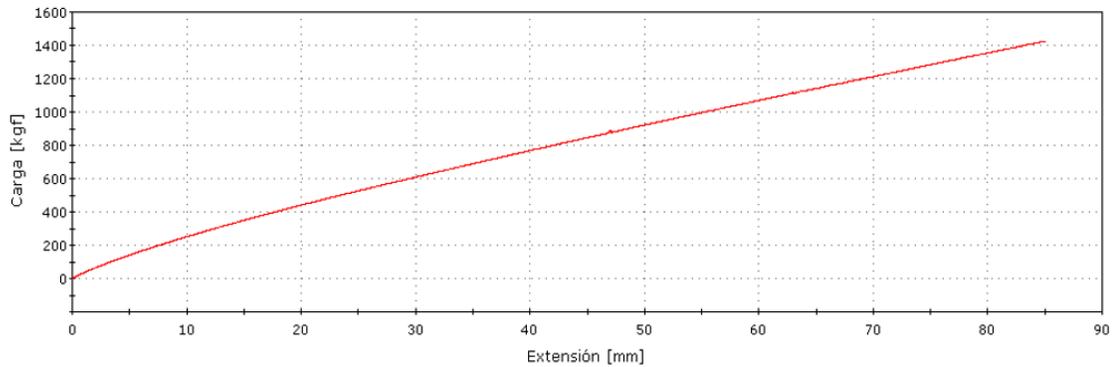
Ensayo de extensión del aislador elastomérico virgen 1.



Nota. Ensayo del AEV1 sin carga a compresión en la máquina INSTRON 8801

Figura 134

Carga vs extensión del aislador elastomérico virgen 1.

**Tabla 10**

Datos obtenidos del ensayo *carga vs extensión del AEV1.*

Extensión [mm]	Carga [Kgf]	Carga [N]
0	0	0
5	150	1471,5
10	250	2452,5
15	350	3433,5
20	450	4414,5
25	550	5395,5
30	600	5886
35	700	6867
40	775	7602,75
45	850	8338,5
50	925	9074,25

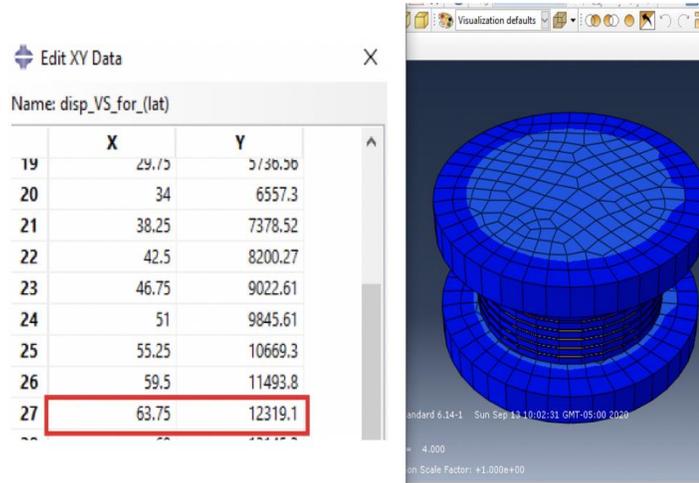
Extensión [mm]	Carga [Kgf]	Carga [N]
55	1000	9810
60	1100	10791
65	1150	11281,5
70	1200	11772
75	1300	12753
80	1375	13488,75
85	1425	13979,25

Como se puede observar en los datos de la Tabla 10, a una extensión de 60 [mm] se tiene una fuerza lateral de 10791 [N], mientras que en la simulación por elementos finitos a una extensión de 63,75 [mm] se tiene una fuerza lateral de 12319 [N] como se puede apreciar en la Figura 135. Los valores obtenidos en la simulación por elementos finitos del AEV1 son similares a los obtenidos en el ensayo de laboratorio, 1,1 [ton] a 60(mm) y en la simulación se obtuvo 1,25 [ton] a 63,75 [mm].

De la Figura 135 a la 137, se puede observar los tres tipos de ensayos que se realizaron por elementos finitos.

Figura 135

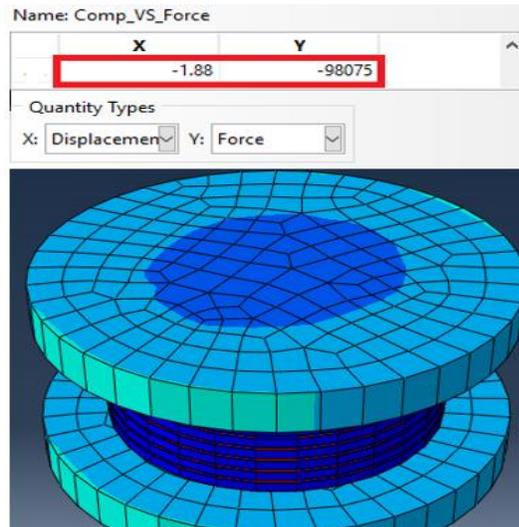
Carga vs extensión del A.E.V.1 por elementos finitos.



Nota. Ensayo con carga lateral y sin carga axial.

Figura 136

Carga vs extensión del aislador elastomérico virgen 1.

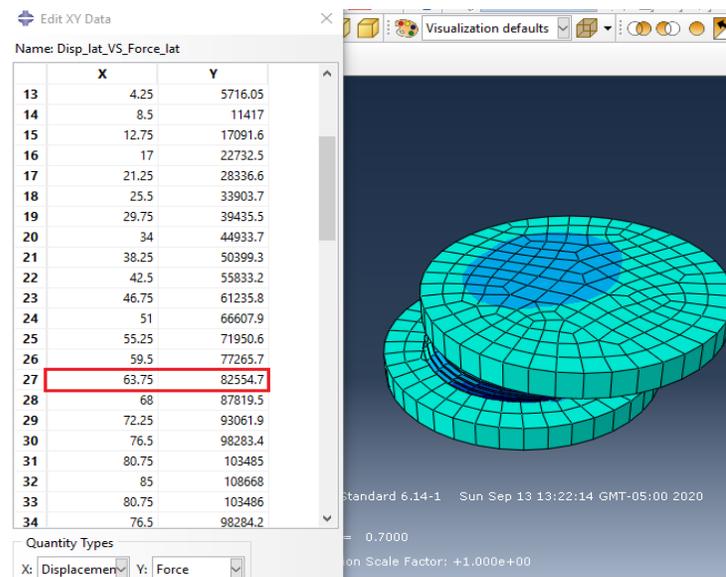


Nota. Ensayo con carga axial y sin carga lateral.

Como se puede observar en la Figura 136, al ser el modelo ensayado con una fuerza de compresión de 98100 [N], es decir 10 [ton]. se puede tener la mayor compresión de 1,88 [mm], valor cercano al obtenido en la Tabla 5 donde al ser ensayado el aislador en la prensa con la misma carga se obtuvo un valor de 1,70 [mm].

Figura 137

Carga vs extensión del aislador elastomérico virgen 1.



Nota. Ensayo combinado de carga axial y carga lateral.

Como se observa en la Figura 137 se obtuvo una fuerza lateral de 82554,7 [N], es decir 8,42 [ton] a una extensión de 63,75 [mm], valor comparable con el de la Figura 116 en el ensayo a un desplazamiento del 140% donde se obtuvo que a 63 [mm] de extensión se tiene una carga lateral de 10,5 [ton].

Capítulo V

Desarrollo del programa computacional

Una vez culminados los ensayos se pudo verificar la eficacia del procedimiento de diseño usado para la construcción de los aisladores sísmicos elastoméricos. Como se puede evidenciar en el desarrollo de este proyecto, este procedimiento de diseño es bastante largo, por lo que, se ha generado un programa para automatizar este procedimiento. El programa de diseño se lo ha desarrollado en Google Sheets, una plataforma gratuita y de fácil manejo para cualquier usuario.

NOTA: El usuario tendrá que solicitar autorización a los autores del programa para poder acceder al mismo.

Objetivo del programa

Introducir un programa de cálculo de aisladores sísmicos elastoméricos amigable con el usuario para facilitar y agilizar el diseño de éstos.

Descripción del programa y guía de uso

- Para poder tener un acceso correcto al programa, la cuenta con permiso para acceder al documento debe ser la única que se encuentre asociada en Google, de lo contrario se presentan problemas para introducir datos.
- El programa constará de 14 pestañas que englobarán todo el proceso de diseño, mismas que estarán enumeradas y con su respectivo nombre en la parte inferior.
- Cada pestaña representa un rol fundamental en el diseño de un aislador sísmico elastomérico y se las debe seguir de izquierda a derecha sin saltarse ninguna.

- Algunas pestañas constan de verificaciones y comprobaciones de acuerdo al paso en el que se encuentre el diseño, es importante que antes de continuar a la siguiente pestaña, todas las comprobaciones se encuentren con VERDADERO.
- En cada celda que se haya realizado un cálculo, en la parte derecha de la misma se encontrará la fórmula que se utilizó.
- Para facilitar el uso del programa y que el usuario sea capaz de navegar a través de éste, se ha establecido un sistema de colores que tendrán las celdas en el que cada color indicará lo que se debe realizar (Ver Figura 138), las indicaciones de los colores es la siguiente:

Figura 138

Colores por celda en el programa computacional.

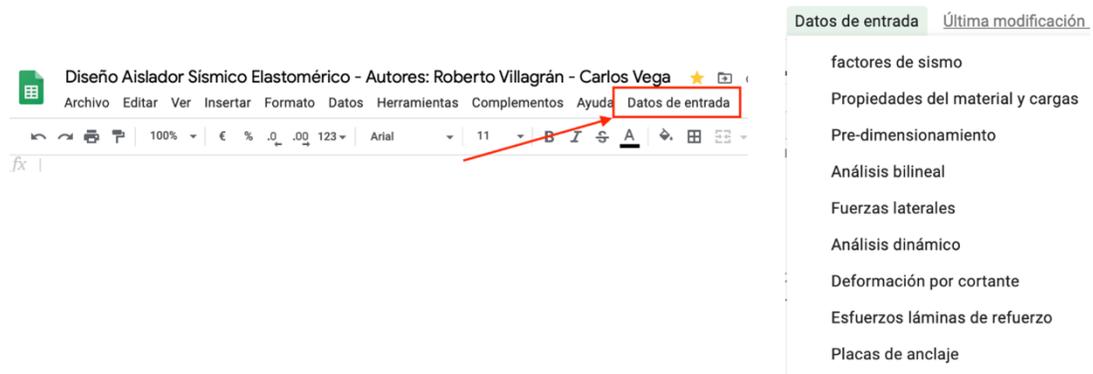
	DATO INTRODUCIDO POR EL USUARIO
	DATO CALCULADO POR EL PROGRAMA
	DATO QUE YA SE COLOCÓ ANTERIORMENTE

- Para introducir los datos en las celdas de color tomate, hay que dirigirse a la barra de herramientas "Datos de entrada" y seleccionar la opción que corresponda a cada pestaña (Ver Figura 139), aquí se desplegará un cuadro de texto con los datos necesarios que se deben introducir.

NOTA: Se deben introducir todos los datos en un mismo paso, caso contrario solo se añade un dato.

Figura 139

Datos de entrada para el programa computacional.



Vista previa del programa

En la Figura 140, se puede observar la última pestaña del programa en la cual se especifica las propiedades que tendrán los aisladores elastoméricos. Estas tablas se encuentran acompañadas de un gráfico, en el que se muestra la simbología utilizada para despejar cualquier duda.

Figura 140

Pestaña de resumen del programa computacional generado.

RESUMEN DEL DISEÑO

Una vez finalizado el diseño, superadas todas las condiciones y verificaciones correspondientes, se presenta a continuación las tablas respectivas de resumen del diseño del aislador sísmico elastomérico

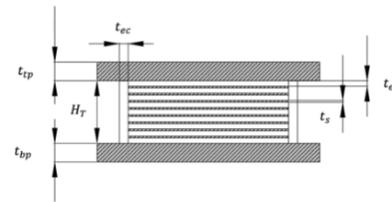
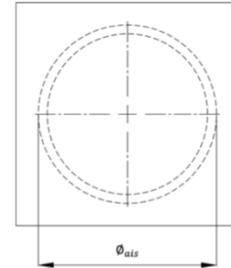
Dimensiones geométricas

SIMBOLOGÍA	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
ϕ_{ais}	200	[mm]	Diámetro del aislador
t_g	6	[mm]	Espesor de la capa de elastómero
t_s	2	[mm]	Espesor de la lámina de acero
t_{tp}, t_{dp}	25	[mm]	Espesor de las placas de anclaje
t_{ec}	10	[mm]	Espesor de la cubierta lateral
T_r	54	[mm]	Altura real de las capas de elastómero
H_r	70	[mm]	Altura del cuerpo del aislador sísmico
N_e	9	---	Número de capas de elastómero
N_l	8	---	Número de láminas de acero

Propiedades del aislador sísmico elastomérico

SIMBOLOGÍA	VALOR		UNIDAD	DESCRIPCIÓN
	LOWER	UPPER		
K_p	26,18	32	[Kg/mm]	Rigidez de post-fluencia
Q_s	270,12	330,17	[Kg]	Fuerza característica
F_y	924,62	1130,17	[Kg]	Fuerza de fluencia
K_e	36,96	45,21	[Kg/mm]	Rigidez elástica
K_{EP}	29,56	36,13	[Kg/mm]	Rigidez efectiva
E_D	59426,4	72637,4	[Kg * mm]	Energía disipada en un ciclo
E_C	1362,9	1570,64	[Kg/cm ²]	Módulo de elasticidad
K_v	7929,03	9137,61	[Kg/mm]	Rigidez vertical
K_H	29,73	36,5	[Kg/mm]	Rigidez horizontal
f_H	1,22	1,35	[hertz]	Frecuencia horizontal
f_v	21,23	22,81	[hertz]	Frecuencia vertical
T_{EP}	0,82	0,74	[seg]	Periodo efectivo
β_{wv}	5	5	[%]	Amortiguamiento efectivo
D_D	63	57	[mm]	Desplazamiento de diseño
D_{TP}	69,3	62,7	[mm]	Desplazamiento total de diseño

PLANO DE UN AISLADOR SÍSMICO ELASTOMÉRICO



ENLACE WEB DEL PROGRAMA

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1xzd2qYI-cptYEirbrTXP56XMIINd2iN_r11Zjna1tTY/edit?usp=sharing

Capítulo VI

Análisis económico

Tabla 11

Costo aproximado de construcción de la estructura con aislamiento sísmico.

DETALLES	COSTO	CANTIDAD	COSTO TOTAL	PORCENTAJE
Estructura y montaje (vigas, columnas, etc.) de acero A 572 Gr 50 con anticorrosivo. Cumpliendo un peso 33,5 (kg/m ²) de acero.	2,80 (\$/kg)	7266,39 (kg)	\$20.345,89	31,52%
Mampostería, bloque estándar de 40x20x15 (cm).	0,76 (\$/Ud)	3492 (Ud)	\$2.653,92	4,11%
Ventanas, pasamanos y puertas de aluminio y vidrio.	115 (\$/m ²)	47,168 (m ²)	\$5.424,32	8,40%
Deck metálico de 0,76 (mm) de espesor para la planta baja.	39,05 (\$/m ²)	61.61 (m ²)	\$2.405,87	3,72%
Deck metálico de 0,65 (mm) de espesor para la planta superior.	37,18 (\$/m ²)	62,64 (m ²)	\$2.328,96	3,61%
Deck metálico de 0,65 (mm) de espesor para la planta balcones.	37,18 (\$/m ²)	15,04 (m ²)	\$559,19	0,87%

DETALLES	COSTO	CANTIDAD	COSTO TOTAL	PORCENTAJE
Deck metálico de 1 (mm) de espesor para techo.	42,16 (\$/m ²)	67,61 (m ²)	\$2.850,44	4,42%
Hormigón armado y montaje con un volumen de 0.075 (m ³ /m ²)	100 (\$/m ²)	205,91 (m ²)	\$20.591,00	31,90%
Hidrosanitario (Agua fría, agua caliente y desfuegos de agua).	25 (\$/punto)	24 (puntos)	\$600,00	0,93%
Instalaciones eléctricas (Focos, tomacorrientes e interruptores).	20 (\$/punto)	38 (puntos)	\$760,00	1,18%
Baldosas de cerámica marca ECUACERAMICA de 31x31 (cm).	6,75 (\$/m ²)	139,29 (m ²)	\$940,21	1,46%
Cielo raso blanco acanalado mate marca KEBO.	14 (\$/m ²)	131,56 (m ²)	\$1.841,84	2,85%
Aisladores sísmicos de caucho natural con dureza 55 de 200 (mm) de diámetro.	250 (\$/Ud)	13 (Ud)	\$3.250,00	5,03%
TOTAL			\$64.551,64	100%

Nota. Estos precios fueron cotizados de acuerdo con el mercado local.

Tabla 12

Costo aproximado de construcción de la estructura sin aislamiento sísmico.

DETALLES	COSTO	CANTIDAD	COSTO TOTAL	PORCENTAJE
Estructura y montaje (vigas, columnas, etc.) de acero A 572 Gr 50 con anticorrosivo. Cumpliendo un peso 70 (kg/m ²) de acero.	2,80 (\$/kg)	15183,50 (kg)	\$42.387,80	50,77%
Mampostería, bloque estándar de 40x20x15 (cm).	0,76 (\$/Ud)	3492 (Ud)	\$2.653,92	3,18%
Ventanas, pasamanos y puertas de aluminio y vidrio.	115 (\$/m ²)	47,168 (m ²)	\$5.424,32	6,50%
Deck metálico de 0,76 (mm) de espesor para la planta baja.	39,05 (\$/m ²)	61.61 (m ²)	\$2.405,87	2,88%
Deck metálico de 0,76 (mm) de espesor para la planta superior.	39,05 (\$/m ²)	62,64 (m ²)	\$2.446,09	2,93%
Deck metálico de 0,76 (mm) de espesor para la planta balcones.	39,05 (\$/m ²)	15,04 (m ²)	\$587,31	0,70%
Deck metálico de 1 (mm) de espesor para techo.	42,16 (\$/m ²)	67,61 (m ²)	\$2.850,44	3,41%

DETALLES	COSTO	CANTIDAD	COSTO TOTAL	PORCENTAJE
Hormigón armado y montaje con un volumen de 0.075 (m ³ /m ²)	100 (\$/m ²)	205,91 (m ²)	\$20.591,00	24,66%
Hidrosanitario (Agua fría, agua caliente y desfuegos de agua).	25 (\$/punto)	24 (puntos)	\$600,00	0,72%
Instalaciones eléctricas (Focos, tomacorrientes e interruptores).	20 (\$/punto)	38 (puntos)	\$760,00	0,91%
Baldosas de cerámica marca ECUACERAMICA de 31x31 (cm).	6,75 (\$/m ²)	139,29 (m ²)	\$940,21	1,13%
Cielo raso blanco acanalado mate marca KEBO.	14 (\$/m ²)	131,56 (m ²)	\$1.841,84	2,21%
TOTAL			\$83.488,80	100%

Nota. Estos precios fueron cotizados de acuerdo con el mercado local.

Análisis de los costos

Como se puede diferenciar entre la Tabla 11 y la Tabla 12, la estructura unifamiliar diseñada sin un sistema de aislación sísmico tiene un costo mucho mayor al de la casa aislada sísmicamente, dicha diferencia de costo es exactamente de 23%. Esta diferencia se debe a la cantidad de acero que debe tener una estructura sin aislación para que sea más rígida y tenga un comportamiento mejor ante sismos. En la estructura aislada es posible disminuir la cantidad de

acero ya que no se necesita tanta rigidez para absorber la energía de sismos, ya que, este trabajo lo hará el sistema de aislación. Cabe destacar que la construcción de los 13 aisladores para esta estructura de dos pisos, representa únicamente el 5 % del costo total de la construcción. La evaluación mediante costos también nos indica que es mejor invertir en un sistema de aislación, que en rigidez de la estructura.

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Una vez finalizadas todas las etapas del proyecto, se pueden llegar a varias conclusiones con ayuda de los resultados que se obtuvieron.

- Se diseñaron aisladores sísmicos elastoméricos de acuerdo a la carga axial más crítica en la estructura que estuvo en un rango de 10 a 15 toneladas. Se consideró un desplazamiento de diseño de 63 [mm] que se espera que tenga la estructura en un evento sísmico con período de retorno de 475 años. Para conseguir este diseño se tuvo que realizar una recopilación de información de varios autores y normas, ya que, no es posible encontrar un procedimiento detallado como el que se presenta en este proyecto.
- Se construyeron cuatro aisladores sísmicos elastoméricos, dos con material virgen y dos con material mixto (60 % reciclado de neumático - 40 % virgen), bajo un mismo protocolo de fabricación previamente establecido. El propósito de este protocolo fue que todos los aisladores sean construidos bajo las mismas condiciones, de tal manera que los resultados se puedan comparar entre sí.
- Se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos los cuales se presentan a continuación:
 - El primer aislador sísmico fabricado con caucho natural 100% virgen durante el ensayo de compresión presentó una pequeña abertura de 11,14 [mm] de largo y 3,20 [mm] de profundidad en la parte inferior de la costura, mientras que el segundo aislador no presentó ninguna falla. Durante el ensayo combinado de corte y compresión hasta un desplazamiento del 110%, ninguno de los dos aisladores presentó falla alguna. Para un desplazamiento del 140 %, se presentó en uno de los aisladores una rotura externa en la

cubierta de 12,10 [mm] de longitud y 4,26 [mm] de profundidad, falla que no significa una amenaza para el correcto funcionamiento de los aisladores.

- Los dos aisladores sísmicos fabricados con material mixto durante el ensayo de compresión no presentaron ninguna falla, sin embargo, es importante recalcar que estos recuperan su geometría inicial después de algunos minutos retirada la carga a diferencia de los de material virgen que recuperan su forma instantáneamente. Durante el ensayo combinado de corte y compresión a un desplazamiento del 140%, el un aislador falló completamente al sexto ciclo rompiéndose en la mitad, mientras que el otro falló al quinto ciclo cuando la cubierta superior presentó un desprendimiento casi total del cuerpo del aislador de 165,14 [mm] de los 200 [mm] de diámetro, este desprendimiento se había empezado a formar en los ensayos anteriores.
- Los aisladores sísmicos fabricados con caucho natural 100% virgen fueron capaces de soportar una mayor carga axial (15 toneladas) y un mayor desplazamiento (140 % del desplazamiento de diseño) sin presentar fallas que terminen instantáneamente con la vida útil de éstos, mientras que los aisladores con material mixto sí fallaron completamente al ser sometidos a estas condiciones de sobre carga y sobre desplazamiento como se pudo evidenciar en el Capítulo IV. Esto se debe a que en su micro estructura el material virgen tiene menor porosidad lo cual permite una mejor vulcanización del elastómero con el acero sin afectar su capacidad de elongación ante grandes desplazamientos.
- Los aisladores elastoméricos mixtos mostraron un comportamiento similar a los de material virgen para estructuras de bajo peso sísmico y para condiciones de diseño. Con estos resultados se puede buscar un estudio más profundo sobre los diferentes porcentajes de mezcla, entre materiales reciclados y vírgenes, que se pueden usar en la

construcción, para así encontrar una composición que permita a este tipo de aisladores acercarse a la capacidad que presentan los construidos con material virgen para condiciones de sobre carga, esto ayudará no solamente en la conservación del planeta sino en costos de fabricación.

- Una vez verificado la eficiencia del diseño, se realizó un programa computacional en la plataforma gratuita de Google Sheets, que permitirá agilizar el proceso de diseño, ya que, como se puede observar en el Capítulo III es un procedimiento bastante largo donde se involucran múltiples ecuaciones y variables.

Recomendaciones

Las dificultades que se fueron presentando en el desarrollo del proyecto permiten realizar las siguientes recomendaciones:

- Adaptar el proceso de diseño que se propone en este proyecto de acuerdo al sector donde va a estar ubicada la estructura. Para esto se debe tener en cuenta que varios factores deberán cambiar, así como las propiedades del elastómero y el acero que se emplearán en la construcción de los aisladores.
- Construir más prototipos de aisladores sísmicos elastoméricos, en especial los de material mixto. De esta forma se podrá experimentar con varias composiciones, se recomienda 65 % reciclado – 35 % virgen y 75 % reciclado – 25 % virgen, para definir la influencia que tiene el material virgen sobre el material reciclado y como disminuye o aumenta la capacidad de absorber energía de los aisladores elastoméricos.
- Promover a las empresas locales la compra o automatización de equipos que permitan realizar estos ensayos con mayor precisión y que permitan reafirmar el proceso de diseño.

En la región no se dispone de equipos adecuados para realizar estos ensayos, es por esto que las gráficas características de los aisladores se debieron realizar mediante cálculo de fuerzas y con varias cámaras para ver el desplazamiento cada cierto tiempo.

- Continuar con el estudio de materiales reciclados para su uso en aisladores sísmicos de base para estructuras de bajo peso sísmico y así incentivar a la industria ecuatoriana el desarrollo del área sísmica para estructuras familiares que son las construcciones más comunes en el Ecuador.

Capítulo VIII

Referencias bibliográficas

- Anaya, G., & et al. (2016). *Análisis y diseño sísmico de edificaciones: Desarrollo histórico del aislamiento sísmico*. Universidad tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia. .
- Araya, M. (1994). *Desarrollo y fabricación de aisladores sísmicos para Edificio Habitacional*. Universidad de Chile, Chile.
- Cárdenas, P., & Aníbal, H. (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador Continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Charleson, P., & Guisasola, A. (2016). *Aislamiento sísmico para arquitectos*. Santiago de Chile, Chile. : Editorial Routledge.
- Constantinou, M., & et al. (2011). *LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators*. University at Buffalo. Buffalo, USA: Editorial MCEER.
- Correa, E. (2011). *Análisis de los elementos elastómeros utilizados en aisladores y neoprenos*. Universidad de las Fuerza Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, Sangolquí, Ecuador.
- Cámara Chilena de la Construcción. (2011). *Proteccion sismica de estructuras-sistemas de aislacion y disipacion de energia*. Corporacion de desarrollo tecnologico, Santiago de Chile, Chile.
- Espín, M. (2018). *Simulación y análisis experimental de un sistema híbrido de aislamiento de base para un prototipo a escala de una vivienda unifamiliar*. Universidad de las Fuerza Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Sangolquí, Ecuador.

- Federal Emergency Management Agency. (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. FEMA.
- Garcia, M., & et al. (2014). *Severity related changes of bronchial microbiome in chronic obstructive pulmonary disease*. *Journal of clinical microbiology*, 52(12), 4217-4223.
- Guaygua, B. (2015). *Análisis experimental y analítico de aisladores elastoméricos*. Universidad Central del Ecuador, Instituto de Investigación y Posgrado, Quito, Ecuador.
- Guevara, A., & et al. (2017). *Estructuras especiales: Aisladores sísmicos y disipadores de energía*. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Hassan, A., & Billah, A. (2020). *Influence of ground motion duration and isolation bearings on the seismic response of base-isolated bridges*. *Journal Engineering Structures*, 222, 111-129.
- Instituto Nacional de Normalización, Código: NCh2745. (2013). *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*. Chile.
- Kalpakidis, Y., & Constantinou, M. (2007). *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading*. University at Buffalo. Buffalo, USA: Editorial MCEER.
- Khan, B., & et al. (2019). *Effect of near and far field earthquakes on performance of various base isolation systems*. *Journal ScienceDirect*, 18, 108-118.
- Korswagen, P., Arias, J., & Huringa, P. (2012). *Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú*. Pontificia Universidad Católica, Lima, Perú.
- McVitty, W., & Constantinou, M. (2015). *Property modification factors for seismic isolators: design guidance for buildings*. University at Buffalo. Buffalo, USA: Editorial MCEER.
- Mei, R., & et al. (2020). *Evaluation of the vibration response of third generation nuclear power plants with isolation technology under large commercial aircraft impact*. *Journal Progress in Nuclear Energy*, 120, 103-230.

- Oviedo, J., & Duque, M. (2006). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. Revista EIA, (6), 105-120.
- Paolacci, F., Giannini, R., & De Angelis, M. (2013). *Mitigación de respuesta sísmica de componentes de plantas químicas mediante técnicas de control pasivo*. Revista de prevención de pérdidas en las industrias de procesos, 26 (5), 924-935.
- Parra, A., & Vinicio, M. (2010). *Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, Sangolquí, Ecuador.
- Salomón, O., Oller, S., & Barbat, A. (2000). *Modelo numérico de elastómeros multi-fase y su aplicación al análisis de estructuras con aislamiento sísmico*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- Theurer, M., & et al. (2017). *Terremotos mayores a 6.5 en escala Richter ocurridos en Ecuador desde 1900 hasta 1970*. Ingeniería Revista Académica, 21(2), 55-64.
- Varón, D., & et al. (2012). *Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos*. Revista 3Ciencias, 1-22.
- Villavicencio, E. (2015). *Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Agrawal, A., & Amjadian, M. (2016). *Diseño de puentes innovadores: Dispositivos de componentes sísmicos*. Universidad de New York, New York, USA.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures*,. ASCE, USA.
- Theurer, M., Velasco, G., & et al. (2017). *Terremotos mayores a 6.5 en escala Richter ocurridos en Ecuador desde 1900 hasta 1970*. Ingeniería, 21(2), 55-64.

- Falconi, & Aguiar, R. (2013). *Microzonificación sísmica de Quito*. Centro de Investigaciones Científicas.
- Aguiar, R., & et al. (2014). *Microzonificación sísmica del centro norte de Quito*. Segunda Jornada de Investigación científica desde las aulas, 1-39.
- Vega , L. (2015). *Los principales terremotos que han sacudido el mundo en la última década*. ABC Sociedad.
- Ye, K., Xiao, Y., & et al. (2019). *A direct displacement-based design procedure for base-isolated building structures with lead rubber bearings (LRBs)*. Engineering Structures, 197, 109402.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-DS. (2015). *Peligro Sísmico/Diseño Sismo Resistente*. Quito, Ecuador.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, Código: NEC-SE-CG. (2015). *Cargas (No Sísmicas)*. Quito, Ecuador.

Anexos

ANEXO A: AISLADOR SÍSMICO TIPO LDRB, AS - 2020 - 01 - 01 - 00

ANEXO B: PLACA DE ANCLAJE, AS - 2020 - 01 - 01 - 02

ANEXO C: PLACA INTERIOR (SHIM), AS - 2020 - 01 - 01 - 03

ANEXO D: CUBIERTA DE ELASTÓMERO, AS - 2020 - 01 - 01 - 04

ANEXO E: CAPA DE ELASTÓMERO, AS - 2020 - 01 - 01 - 05