

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA
HÍBRIDO DE AISLAMIENTO DE BASE PARA UN PROTOTIPO A
ESCALA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR

AUTOR: ESPÍN JÁCOME, MAURICIO GERARDO

DIRECTOR: MSC: NARVÁEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación "SIMULACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE AISLAMIENTO DE BASE PARA UN PROTOTIPO A ESCALA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR", fue realizado en su totalidad por el estudiante Espín Jácome Mauricio Gerardo el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí 10 de septiembre del 2018

M\$C. Christian Narváez.

C.C. 1720037165

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente trabajo de titulación "SIMULACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE AISLAMIENTO DE BASE PARA UN PROTOTIPO A ESCALA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

Espín Jácome Mauricio Gerardo

C.C. 1715954150



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo Espín Jácome Mauricio Gerardo , autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" publicar el trabajo de titulación: "SIMULACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE AISLAMIENTO DE BASE PARA UN PROTOTIPO A ESCALA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR", en el repositorio institucional cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí 10 de Septiembre del 2018

Espín Jácome Mauricio Gerardo

C.C. 1715954150

DEDICATORIA

Lleno de alegría dedico este objetivo a cada uno de mis seres queridos en especial a mis padres que siempre dieron lo mejor para que sus hijos seamos personas de bien y lleguemos a tener una profesión a base de mucho esfuerzo y dedicación, con la seguridad de que este logro los llenará de orgullo. A mis amigos y compañeros de esta prestigiosa Universidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios que me ha permitido cumplir este objetivo de vida. A mi padre Mauricio Espín Cobos que siempre fue un hombre ejemplar en quien pude guiarme y me apoyó en todo momento de mi vida, especialmente en esta etapa, doy gracias a mi madre Redy Jácome que siempre fue incondicional en muchos ámbitos para haber logrado este objetivo, agradezco a mi hermana Daniela y a mi abuela Alba Cobos que siempre me brindaron mucho amor y alegría para que pueda salir adelante en cada obstáculo que se presente en mi camino. Tengo mucha gratitud a todos los docentes que formaron parte de mi formación universitaria. Al Tcrn Enrique Morales PhD que supo guiarme en la elaboración de este proyecto, a mis amigos Juan Carlos y Andrés por la entrañable amistad que formamos en este transcurso y finalmente un gran agradecimiento a la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a la Carrera de Ingeniería Mecánica que me abrieron las puertas para formarme como profesional y principalmente como un hombre de bien.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xxii
ABSTRAC	xxiii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos específicos	1
1.2. Generalidades	1
1.3. Alcance del proyecto	5
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE	
2.1. Introducción	8
2.2. Principios básicos del aislamiento sísmico	9

2.2.1. Ingeniería Sísmica basada en el rendimiento de la estructura	9
2.2.2. Sistemas de protección Sísmica	13
2.3. Clasificación de los aisladores sísmicos	16
2.3.1. Aisladores sísmicos elastoméricos	18
2.3.2. Aisladores sísmicos de goma con núcleo de plomo	19
2.3.3. Aisladores sísmicos de fricción	20
2.3.4. Aisladores tipo EQS (Eradiquake Bearings)	22
2.4. Sistemas híbridos	23
2.5. Resumen.	25
CAPÍTULO III VIBRACIONES	
3.1. Introducción	27
3.2. Tipos de vibraciones	29
3.2.1. Vibraciones libres	29
3.2.2. Vibraciones forzadas	33
3.3. Resonancia	37
3.4. Modelación de sistemas mecánicos	38
3.5. Aislamiento de vibraciones	40
3.6. Resumen	44
CAPÍTULO IV PROPIEDADES Y METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICO Y FRICCIONALES	
4.1. Introducción	47
4.2. Propiedades mecánicas del caucho natural	48

4.2.1. Vulcanización	48
4.2.2. Propiedades mecánicas básicas del caucho natural	48
4.2.3. Construcción y fabricación de aisladores elastoméricos	
4.3. Propiedades mecánicas de los aisladores elastoméricos	53
4.3.1. Rigidez efectiva	53
4.3.2. Módulo de corte Efectivo	54
4.3.3. Amortiguamiento efectivo	54
4.4. Análisis de esfuerzos, deformaciones y estabilidad de los aisladores elastoméricos	54
4.4.1. Análisis de compresión de los aisladores elastoméricos	55
4.4.2. Análisis de rotación de los aisladores elastoméricos	61
4.4.3. Análisis de cortante en los aisladores elastoméricos	63
4.4.4. Estabilidad en aisladores elastoméricos	64
4.4.5. Cálculo de desplazamientos críticos	67
4.5. Fricción en superficies deslizantes	69
4.5.1.Fricción	70
4.5.2. Mecanismos básicos de fricción	70
4.5.2.1.Adhesión	71
4.5.2.2.Arado	72
4.5.2.3. Efectos Viscoelásticos	72
4.5.3. Fricción estática y cinética	72
4.5.4. Comportamiento Stick-Slip (Adhesión-Deslizamiento)	74
4.5.5. Fricción entre superficies de acero inoxidable pulido y PTFE	75
4.6. Propiedades friccionales de las interfaces de acero inoxidable pulido y PTFE	80
4.6.1. Efecto de temperatura.	83
4.7. Factores relevantes para el diseño de los aisladores de fricción de superficie plana	84
4.8.Resumen 87	

CAPÍTULO V

DETERMINACIÓN DE CARGAS Y PROPIEDADES DEL SISTEMA

5.1. Introducción	89
5.2. Determinación de la metodología para determinar la configuración del sistema SHAB.	89
5.3. Carga sísmica del caso de estudio	91
5.3.1. Descripción general del caso de estudio	91
5.3.2. Determinación de cargas	92
5.3.2.1. Cargas muertas	92
5.3.2.2. Cargas vivas	95
5.3.2.3. Cálculo de la carga sísmica reactiva W	96
5.4. Determinación del período objetivo y desplazamiento del caso de estudio	96
5.4.1. Zonificación sísmica y factor de zona Z	96
5.4.2. Perfil de suelo	98
5.4.3. Tipo de Fuerzas sísmicas A, B Y C	99
5.4.4. Coeficientes de perfil de suelo	99
5.4.5. Espectro elástico de diseño en aceleraciones	101
5.4.7. Espectro elástico de desplazamientos	106
5.4.8. Desplazamientos para diseño	109
5.5. Cálculo de la rigidez efectiva del sistema	109
5.6. Distribución de los aisladores	110
5.7. Resumen	111
CAPÍTULO VI DIMENSIONAMIENTO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS HÍBRIDOS	
6.1. Introducción	112
6.2. Dimensionamiento de los aisladores elastoméricos híbridos	112
6.2.1. Rigidez horizontal	113
6.2.2. Cálculo de la fuerza cortante basal o fuerza horizontal	114
6.2.3. Valor del módulo de corte	114
6.2.4 Pre dimensionamiento de la altura del aislador	114

6.2.5. Verificación de esbeltez	114
6.3.Dimensionamiento de los aisladores friccionales	115
6.4Resumen	116
CAPÍTULO VII ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MESA VIBRATORIA SIMULADO:	RA DE SISMOS
7.1. INTRODUCCIÓN	117
7.2. Programa de prueba	118
7.2.1. Descripción del modelo de muestra	118
7.2.2. Mesa simuladora de sismos	124
7.2.3. Instrumentación	125
7.2.4. Descripción del prototipo	126
7.3. Instrumentación	127
7.3.1. Acelerómetros	127
7.3.2. Adquisición de datos + flujo de datos esquemáticos	128
7.3.3. Archivo de datos	129
7.3.4. Grabación de video y ubicación de las cámaras	130
7.4. Sistema de identificación (SI)	131
7.4.1. Test de ruido blanco (White Noise Test)	131
7.5. Protocolo y resultados de la prueba de cuantificación sísmica	135
7.5.1. Ingreso de registros sísmicos	135
7.5.2. Resultados de la Prueba	139
7.5.2.1. Resultados Terremoto de Northridge	139
7.5.2.2. Resultados Terremoto de Pedernales	143
7.5.2.3. Resultados terremoto de El Centro (California)	146
7.6. Resumen	149

CAPÍTULO VII	I
SIMULACIÓN	COMPUTACIONAL DEL SISTEMA HÍBRIDO DE AISLAMIENTO DE
BASE (SHAB)	

8.1. Introducción	150
8.2. Análisis modal espectral	151
8.3. Análisis Tiempo - Historia	151
8.4. Dimensionamiento del sistema	151
8.5Obtención e ingreso de propiedades de aisladores al software	152
8.5.1Propiedades del aislador elastomérico	152
8.5.2. Ingreso de propiedades del aislador elastomérico	154
8.5.3. Propiedades del aislador friccional	157
8.5.4. Ingreso de propiedades del aislador friccional	158
8.6. Ingreso de los registros Tiempo-Historia	161
8.7. Definición de casos de carga	162
8.7.1. Análisis modal	162
8.7.2. Carga muerta	163
8.7.3. Terremoto	163
8.8. Ejecución del modelamiento y obtención de resultados	165
8.8.1. Ejecución del modelamiento	165
8.8.2. Resultados del modelamiento	167
8.8.2.1. Análisis de resultados del terremoto de Northridge	168
8.8.2.2. Análisis de Resultados del Terremoto de Pedernales	171
8.8.2.3. Análisis de resultados del terremoto de El Centro (California)	174
8.9. Comparación entre los resultados experimentales y la simulación computacional	176
8.10. Resumen	180
CAPÍTULO	IV
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	

9.1. Conclusiones	.181
9.2. Recomendaciones y trabajos futuros	.183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.184

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de las partes del sistema híbrido	5
Tabla 2 Proceso de fabricación de los aisladores elastoméricos	53
Tabla 3 Ecuaciones para calcular los factores de forma de los aisladores de goma	59
Tabla 4 Expresiones del módulo de compresión, esfuerzo cortante y el máximo esfuerzo de	
compresión en una lámina de goma para un aislador elastomérico	60
Tabla 5 Valores del factor de corrección k	61
Tabla 6 Expresiones para el módulo de rotación y módulo de corte para un aislador de gomo	a . 64
Tabla 7 Resultados de la prueba sobre el efecto de la permanencia de la carga en la fricción	
estática del PTFE sin llenar en contacto con acero inoxidable pulido a una presión	
aparente de 6,9 MPa	83
Tabla 8 Efecto de la temperatura en la ruptura y el coeficiente de fricción deslizante ($v = 1$	
mm/s) de PTFE sin llenar en contacto con acero inoxidable altamente pulido a una	
presión aparente de 20.7 MPa	84
Tabla 9 Cargas muertas típicas comunes para edificios	93
Tabla 10 Cargas muertas estimadas en la vivienda unifamiliar	94
Tabla 11 Cargas vivas uniformes mínimas comunes para el diseño de edificios	95
Tabla 12 Peso sísmico del caso de estudio	96
Tabla 13 Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada	98
Tabla 14 Clasificación de los perfiles de suelo	98
Tabla 15 Tipos de fuentes sísmicas	99
Tabla 16 Coeficiente de amplificación del suelo en zona de período corto	
(NEC-SE-DS, 2015)	.100
Tabla 17 Desplazamientos para diseño en roca.	.100
Tabla 18 Factores de comportamiento no lineal de los suelos	.101
Tabla 19 Coeficientes de perfil de suelo y períodos límites para las localidades de: Bahía de	
Caráquez, Pedernales y Muisne.	.104
Tabla 20 Períodos efectivos para un espectro sísmico de 0.4 G para las localidades de Bahía	ı
de Caráquez, Pedernales, y Muisne	.106
Tabla 21 Desplazamientos obtenidos a partir del espectro de desplazamientos.	.109

Tabla 22 Distribución de cargas que soporta los aisladores	113
Tabla 23 Dimensiones de los aisladores friccionales	115
Tabla 24 Descripción de las partes del prototipo de prueba	122
Tabla 25 Características generales de mesa de vibraciones utilizada	125
Tabla 26 Factores geométricos y físicos del prototipo	126
Tabla 27 Resumen de instrumentación en el modelo de prueba	128
Tabla 28 Frecuencia, período y coeficiente de amortiguamiento por excitación White-Nois	e135
Tabla 29 Terremotos utilizados en la simulación	136
Tabla 30 Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Northridge	142
Tabla 31 Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de pedernales.	146
Tabla 32 Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de El Centro.	149
Tabla 33 Tabla de propiedades del aislador elastomérico para el ingreso al software	154
Tabla 34 Tabla de propiedades del aislador friccional para el ingreso al software	158
Tabla 35 Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Northridge entre	
datos de ingreso y los resultados obtenidos del software	170
Tabla 36 Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Pedernales entre	
datos de ingreso y los resultados obtenidos del software	173
Tabla 37 Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de El Centro entre	
datos de ingreso y los resultados obtenidos del software	176
Tabla 38 Comparación de las aceleraciones máximas	180

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Esquema del sistema híbrido de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar	5
Figura 2 Niveles cualitativos de rendimiento de la FEMA 273/274/356	11
Figura 3 Diagrama de flujo para la predicción de rendimiento	12
Figura 4 Metodología estadística basada en el rendimiento	13
Figura 5 Instalación típica de un aislador sísmico en un puente	14
Figura 6 Principios del aislamiento sísmico.	15
Figura 7 Disipadores histeréticos metálicos tipo tadas y tipo panel.	16
Figura 8 Representación de la curva de Histéresis en los aisladores sísmicos	17
Figura 9 Técnicas de aislamiento sísmico de base	17
Figura 10 Aislador sísmico elastomérico	19
Figura 11 Aislador de goma con núcleo de plomo	20
Figura 12 Vistas de un aislador sísmico de péndulo de fricción	22
Figura 13 Construcción interna de un aislador sísmico tipo EQS.	23
Figura 14 Sistema híbrido de aislamiento de base.	25
Figura 15 Ilustración de un movimiento vibratorio de péndulo simple	27
Figura 16 Representación gráfica de las variables que componen un sistema de vibraciones	28
Figura 17 Sistema masa resorte libre y sin amortiguamiento	29
Figura 18 Vibración libre sin amortiguamiento	31
Figura 19 Representación gráfica de los efectos de amortiguación libre	33
Figura 20 Esquema de un sistema masa-resorte con excitación armónica sin amortiguamiento	. 33
Figura 21 Sistema no amortiguado con carga armónica.	34
Figura 22 Sistema amortiguado con carga armónica.	36
Figura 23 Respuesta de un sistema amortiguado cuando la frecuencia del sistema es igual	
a su frecuencia natural.	36
Figura 24 Fenómeno de resonancia, producido cuando se iguala la frecuencia natural del	
sistema con la frecuencia de la fuerza externa	38
Figura 25 Disco rodante	39
Figura 26 Sistema de transmisibilidad de desplazamientos y fuerzas.	41
Figura 27 Razón de transmisibilidad respecto al coeficiente de amortiguamiento	43

Figura 28 Ejemplo de tensión uniaxial esfuerzo-deformación para el caucho	50
Figura 29 Esquema de un aislador elastomérico	
Figura 30 Construcción interna de un aislador elastomérico	
Figura 31 Definición de rigidez.54	32
	<i>E</i>
Figura 32 Comportamiento de aisladores elastoméricos a compresión y cortante	,55
Figura 33 Representación de la relación entre la carga y desplazamiento vertical de un	
aislador elastomérico sometido a compresión (1 kip = 4.45 Kn, 1 In = 25.4 mm)	
Figura 34 Representación de capas de goma individuales	
Figura 35 Compresión en una capa individual constreñida.	
Figura 36 Esfuerzo cortante producido por la compresión	61
Figura 37 Rotación de una lámina de goma	63
Figura 38 Representación de los diferentes tipos de uniones de aisladores elastoméricos	65
Figura 39 Área Reducida Para un Aislador Elastomérico Circular.	67
Figura 40 Volcamiento de un aislador sísmico y relación entre desplazamiento y fuerza late	eral 68
Figura 41 Ilustración de las áreas de contacto aparente y real.	71
Figura 42 Curva fuerza desplazamiento entre superficies de PTFE y acero inoxidable	73
Figura 43 Ilustración de un ejemplo básico del comportamiento Stick-Slip	75
Figura 44 Dependencia del coeficiente de fricción de la superficie de acero inoxidable puli	do
con PTFE sobre la velocidad de deslizamiento y la carga normal	77
Figura 45 Variación del área real de contacto, presión en el área de contacto y coeficiente d	le
fricción con una carga normal creciente	
Figura 46 Maquina de pruebas utilizada en dispositivos de fricción	
Figura 47 Ciclo de histéresis de un aislador de deslizamiento plano	
Figura 48 Aislador friccional de superficies planas	
Figura 49 Efecto del parámetro a en la variación del coeficiente de fricción con velocidad.	
Figura 50 Vivienda unifamiliar de 36 metros cuadrados	
Figura 51 Arquitectura de vivienda unifamiliar de 36 metros cuadrados	
Figura 52 Esquema estructural de la vivienda unifamiliar	
Figura 53 Ecuador, factor Z para propósitos de diseño	
Figura 54 Espectro horizontal de diseño en aceleraciones	
P 12 11 IL 24 ESDECTIO HOLIZOHIAI DE DISCHO EN ACCIEFACIONES	[[]]

Figura 55 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño para	
Pedernales.	104
Figura 56 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño, para	,
Bahía de Caráquez	105
Figura 57 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño para	
Muisne.	105
Figura 58 Espectro sísmico elástico de desplazamientos para Pedernales	107
Figura 59 Espectro sísmico elástico de desplazamientos para Bahía de Caráquez	108
Figura 60 Espectro sísmico elástico de desplazamientos para Muisne.	108
Figura 61 Sistema híbrido de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar	110
Figura 62 Distribución de aisladores sísmicos	113
Figura 63 Componentes del aislador friccional plano y comparación de alturas con el aislado	r
elastomérico	116
Figura 64 Base de tabla triplex del prototipo SHAB	118
Figura 65 Dimensiones del aislador elastomérico	119
Figura 66 Aislador elastomérico para el prototipo SHAB	119
Figura 67 Dimensiones del aislador friccional para el SHAB	120
Figura 68 Aislador sísmico friccional para el prototipo SHAB	120
Figura 69 Esquema del modelo a escala del SHAB.	121
Figura 70 Esquema final del prototipo SHAB	123
Figura 71 Prototipo SHAB con masa sísmica	123
Figura 72 Mesa de vibraciones Shake Table III	124
Figura 73 Configuración del sistema de prueba	126
Figura 74 Acelerómetro en mesa vibratoria	127
Figura 75 Acelerómetros colocados en el prototipo	128
Figura 76 sistema de adquisición de datos	129
Figura 77 Sistema de adquisición de datos	130
Figura 78 Cámara frontal para testificar el sistema	130
Figura 79 Test Dinámicos de carga: (a) Ruido blanco (b) Barrido sinusoidal (c) Impulso	131
Figura 80 White-Noise en X	132
Figura 81 White-Noise en Y	132

Figura 82 Frecuencias obtenidas del White Noise test	133
Figura 83 Respuesta de frecuencia típica para determinar las características de amortigu	ación.
	134
Figura 84 Tiempo-Historia del terremoto de Northridge (1994) sentido Este - Oeste	136
Figura 85 Tiempo-Historia del terremoto de Northridge (1994) sentido Norte - Sur	137
Figura 86 Tiempo - Historia del terremoto de Pedernales (2016) sentido Este - Oeste	137
Figura 87 Tiempo - Historia del terremoto de Pedernales (2016) sentido Norte - Sur	138
Figura 88 Tiempo - Historia del terremoto de El Centro (California, 1940), sentido	
Este - Oeste.	138
Figura 89 Tiempo - Historia del terremoto de El Centro (California, 1940), sentido	
Norte - Sur.	139
Figura 90 Tiempo - Historia del terremoto de Northridge previo a la prueba experiment	tal140
Figura 91 Acelerograma Tiempo - Historia en dirección X (Este - Oeste) para el terremo	oto de
Northridge obtenido de la prueba experimental	140
Figura 92 Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Y (Norte - Sur) para el terremo	to de
Northridge. obtenido de la prueba experimental	141
Figura 93 Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro	
experimental para el terremoto de Northridge. obtenido de la prueba experim	nental 141
Figura 94 Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro	
experimental para el terremoto de Northridge.	142
Figura 95 Tiempo - Historia del terremoto de pedernales previo a la prueba experimenta	al143
Figura 96 Acelerograma Tiempo - Historia en dirección X (Este - Oeste) para el terremo	oto de
Pedernales obtenido de la prueba experimental.	144
Figura 97 Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Y (Norte - Sur) para el terremo	to de
Pedernales obtenido de la prueba experimental	144
Figura 98 Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro	
experimental para el terremoto de Pedernales	145
Figura 99 Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro	
experimental para el terremoto de Pedernales	145
Figura 100 Tiempo - Historia del terremoto de El Centro previo a la prueba experiment	tal 146

Figura	<i>101</i>	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección X (Este - Oeste) para el terremoto	
		de El Centro obtenido de la prueba experimental	147
Figura	102	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Y (Norte - Sur) para el terremoto	
		de El Centro obtenido de la prueba experimental.	147
Figura	103	Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro	
		experimental para el terremoto de EL Centro	148
Figura	104	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro	
		experimental para el terremoto de El Centro	148
Figura	105	Modelo lineal y no lineal Fuente: (Proaño, 2014)	150
Figura	106	Dimensionamiento de base aislada	152
Figura	107	Porcentaje de peso que soporta cada aislador	153
Figura	108	Ingreso de datos del aislador elastomérico	155
Figura	109	Propiedades en dirección U1 del aislador elastomérico	156
Figura	110	Propiedades en dirección U2 del aislador elastomérico	156
Figura	111	Ingreso de datos para el aislador friccional	159
Figura	112	Propiedades en dirección U1 del aislador friccional	160
Figura	113	Propiedades en direcciones U2 Y U3 del aislador friccional	160
Figura	114	Cuerpo rígido con aisladores sísmicos híbridos	161
Figura	115	Ingreso de datos Tiempo-Historia del sismo de Nordrige de la componente E	161
Figura	116	Datos Tiempo-Historia de los registros sísmicos ingresados al software	162
Figura	117	Datos para el análisis modal	162
Figura	118	Definición de carga muerta	163
Figura	119	Definición del terremoto	164
Figura	120	Verificación de los casos de carga	164
Figura	121	Establecimiento de casos de carga para ejecutar el modelo.	165
Figura	122	Movimiento de estructura después de ser sometida al terremoto	165
Figura	123	Acelerograma Tiempo - Historia en X del terremoto de Northridge obtenidos del	
		modelamiento en el software	166
Figura	124	Acelerograma Tiempo - Historia en X del terremoto de Pedernales obtenidos del	
		modelamiento en el software	167

Figura 125	Acelerograma Tiempo - Historia en X del terremoto de El Centro obtenidos del	
	modelamiento en el software	167
Figura 126	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Este – Oeste (X) para el terremoto	
	de Northridge obtenido del software.	168
Figura 127	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Norte - Sur (Y) para el terremoto	
	de Northridge obtenido del software.	169
Figura 128	Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro del	
	software para el terremoto de Northridge	169
Figura 129	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro del	
	software para el terremoto de Northridge	170
Figura 130	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Este – Oeste (X) para el terremoto	
	de Pedernales obtenido del software.	171
Figura 131	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Norte - Sur (Y) para el terremoto	
	de pedernales obtenido del software	172
Figura 132	Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro del	
	software para el terremoto de Pedernales.	172
Figura 133	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro del	
	software para el terremoto de Pedernales.	173
Figura 134	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Este – Oeste (X) para el terremoto	
	de El Centro obtenido del software.	174
Figura 135	Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Norte – Sur (Y) para el terremoto	
	de El Centro obtenido del software.	175
Figura 136	Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro del	
	software para el terremoto de El Centro.	175
Figura 137	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro del	
	software para el terremoto de El Centro.	176
Figura 138	Comparación Tiempo - Historia en X del registro de la prueba experimental con	
	el registro del software para el terremoto de Northridge	177
Figura 139	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro de la prueba experimental con	
	el registro del software para el terremoto de Northridge	177

Figura 140	Comparación Tiempo - Historia en X del registro de la prueba experimental con	
	el registro del software para el terremoto de Pedernales.	.178
Figura 141	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro de la prueba experimental con	
	el registro del software para el terremoto de Pedernales.	.178
Figura 142	Comparación Tiempo - Historia en X del registro de la prueba experimental con	
	el registro del software para el terremoto de El Centro.	.179
Figura 143	Comparación Tiempo - Historia en Y del registro de la prueba experimental con	
	el registro del software para el terremoto de El Centro	.179

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento de un sistema de aislamiento de base utilizando dos tipos de aisladores sísmicos distintos, la idea fue planteada con el fin de implementar dispositivos de aislamiento sísmico en viviendas y en estructuras pequeñas. Se estudió y se identificó la clasificación de las vibraciones y con qué tipo de vibración trabaja un sistema de aislamiento de base. Se investigó acerca de los diferentes tipos de aisladores sísmicos para conformar un sistema híbrido fácil de construir. Las dimensiones de los aisladores sísmicos híbridos se determinaron de acuerdo a la combinación de cargas más desfavorable a la que puede estar sometida la vivienda, a los factores de zona y a las propiedades de los materiales que conforman el sistema híbrido de aislamiento de base (SHAB), se realizó una simulación sísmica experimental a escala 10:1 en la mesa de vibraciones del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos de la Universidad Central del Ecuador donde se validó el prototipo experimental junto con una simulación computacional desarrollada en un software de elementos finitos teniendo resultados favorables en ambos casos con reducción de aceleración en secciones del acelerograma (Tiempo – Historia) original de los terremotos estudiados donde se tiene aceleraciones superiores a 0.5 g

PALABRAS CLAVES:

- AISLAMIENTO DE BASE
- AMORTIGUAMIENTO
- FRICCIÓN
- TERREMOTO
- CAUCHO

ABSTRAC

The objective of the research was to analyze the behavior of a basic isolation system using two different types of seismic isolators, the idea was raised in order to implement seismic isolation devices in homes and small structures. The classification of the vibrations was studied and identified and with what type of vibration a base isolation system works. The different types of seismic isolators were investigated to form an easy-to-build hybrid system. The dimensions of the hybrid seismic isolators were determined according to the most unfavorable load combination which the house can be subjected, to the zone factors and the properties of the materials that make up the hybrid base isolation system (HBIS). , an experimental seismic simulation was carried out at a 10: 1 scale in the vibration table of the Materials and Models Testing Laboratory of the Central University of Ecuador where the experimental prototype was validated together with a computational simulation developed in a finite element software having favorable results in both cases with reduction of acceleration in sections of the accelerogram (Time - History) original of the studied earthquakes where accelerations are greater than 0.5 g.

KEYWORDS:

- BASE ISOLATION
- DAMPING
- STIFFNESS
- EARTHQUAKE
- RUBBER

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

 Realizar el análisis experimental y una simulación de un sistema híbrido de aislamiento de base para un prototipo a escala de una vivienda unifamiliar.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar la construcción de un prototipo de aislamiento de base para la validación del diseño
- Realizar un estudio del arte referente a los dispositivos de aislamiento sísmico y a las propiedades mecánicas de los mismos
- Diseñar y construir 4 aisladores sísmicos de fricción y 1 aislador sísmico elastomérico.
- Establecer la proximidad de los resultados obtenidos en la simulación del sistema en software de elementos finitos con los resultados otorgados experimentalmente.

1.2. Generalidades

Ecuador se encuentra ubicado en una zona de alto nivel de riesgo sísmico en el planeta, por lo tanto está expuesta a este peligro que conllevan pérdidas humanas y materiales. El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar en forma numérica y experimental con la finalidad de contar con desempeños sísmicos, que garanticen la funcionalidad continua, la protección de la vida y su evolución puede tender a la mejora del

comportamiento de las estructuras y edificaciones para disminuir la probabilidad de colapso ante sismos severos

La investigación necesaria para la ejecución del presente proyecto impulsará al desarrollo de nuevas tecnologías que involucra la aplicación de la ingeniería en beneficio de la comunidad.

Debido a los sucesos ocurridos en el Ecuador en los últimos años se vio la necesidad de estar más preparados ante los sismos de gran magnitud ya que la mayoría de pérdidas humanas se produjo en viviendas. Existe una necesidad global de implementar tecnologías que reduzcan la probabilidad de daño, en base a correctas filosofías de diseño y adecuados procesos de construcción en base a la implementación de dispositivos mecánicos capaces de ayudar a reducir las cargas sísmicas que recibe la estructura, la idea de este proyecto parte de la implementación de estos dispositivos mediante el estudio de las propiedades mecánicas especialmente la fricción entre materiales y las propiedades físicas de los elastómeros.

El estudio del comportamiento de edificios y estructuras sujetas a cargas sísmicas entre sus prioridades destaca la obtención de altos niveles de seguridad y la mejora del comportamiento de las estructuras ante dichos elementos dinámicos. Los sistemas pasivos de protección sísmica, como el aislamiento de base, proporcionan un buen medio para controlar la demanda impuesta por los eventos sísmicos. Los sistemas de aislamiento de base, están destinados a permitir de alto valor funcional, como instalaciones hospitalarias y unidades de cuidados intensivos, donde el riesgo sísmico impacta significativamente sobre la funcionalidad de las estructuras durante y después de un evento de terremoto.

Un primer trabajo ingeniería mecánica realizada por Juan Narváez y Carlos Vela (2009) denominado: "Diseño y construcción de un amortiguador telescópico hidráulico capaz de atenuar cargas sísmicas". En este trabajo se manejaron teorías de vibraciones involucradas con el aislamiento sísmico mediante la instalación de elementos adicionales, se diseñó un amortiguador hidráulico aplicado para disipar energía reaccionando con una fuerza resistiva a un desplazamiento determinado, donde la fuerza de salida del disipador actúa en dirección opuesta al movimiento de entrada, en este caso se logró atenuar el 51% de la energía sísmica. En este trabajo se utilizó un fluido amortiguador, algo que será descartado de este proyecto, pero si es relacionado con este proyecto debido a la implementación de dispositivos para el aislamiento sísmico. Un segundo trabajo de ingeniería civil correspondiente a Marco Auqui (2010): "Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en Ecuador" en donde destaca que Ecuador está ubicado en un sitio sísmico lo cual provoca que se rebasen los rangos elásticos de las estructuras, en segundo lugar menciona que en el mercado ecuatoriano no existe una línea de producción de aisladores sísmicos elastoméricos. En este trabajo se construyó 3 prototipos de aisladores elastoméricos, construidos de neopreno de buenas características elaborados mediante vulcanizado y acoplado a las placas de acero dúctil con una goma especial que trabaja de forma eficiente al momento de sufrir fatiga, de los 3 tipos de aisladores se demostró que el de mejor comportamiento fue un prototipo construido con un perno macizo en el núcleo, este trabajo es relacionado con este proyecto debido a que se pretende diseñar y construir un aislador

En los trabajos mencionados parte del análisis de un sistema Masa-resorte-amortiguador para una vibración forzada amortiguada, donde el modelo consta de una masa concentrada m soportada

elastomérico como parte del sistema híbrido de aislamiento sísmico de base .

por un elemento de rigidez k, un coeficiente de amortiguamiento viscoso C propio del sistema. El sistema se somete a una carga sísmica caracterizada por un desplazamiento y una carga $\,$ que pueden ser o no dependiente del tiempo $\,$ X $_g(t)$ y $\,$ P(t) este parámetro se calcula en función del desplazamiento del terreno y del desplazamiento de la masa con respecto a su base:

$$X_t(t) = X_a(t) + x(t) \tag{1}$$

Para estas condiciones, la ecuación de equilibrio se escribe como:

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_q) + c\dot{x} + kx = P \tag{2}$$

Donde:

 $m\ddot{x}$ = Representa la fuerza inercial de la masa de la edificación.

 $c\dot{x}$ = Es el amortiguamiento inherente del sistema.

kx = Es la fuerza elástica del sistema.

A continuación en la Figura 1 representa un esquema real del sistema desarrollado en la ingeniería conceptual, con la asesoría del Tcrn. Enrique Morales. PhD.

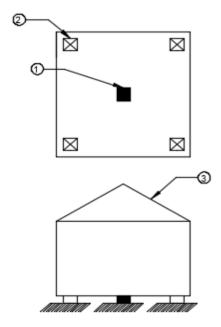


Figura 1. Esquema del sistema híbrido de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar

Tabla 1Descripción de las partes del sistema híbrido

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	Aislador Elastomérico	Polímero elástico
2	Aislador de fricción	Politetrafluoroetileno, y aleaciones metálicas
3	Vivienda unifamiliar	Varios

1.3. Alcance del proyecto

El proyecto tiene como finalidad realizar el análisis de un sistema híbrido de aislamiento de base para lo cual serán analizados varios conceptos dentro de la ingeniería como son los análisis dinámicos, y la construcción de un prototipo con el propósito de realizar este estudio.

Se desarrollará la investigación de diseño y construcción de un aislador sísmico de fricción que permitirá obtener datos para la justificación y validación del diseño del sistema híbrido de aislamiento de base. Se considera cuatro componentes horizontales en cada terremoto de manera individual (x, y) y cuando actúan en manera conjunta (xy-x xy-y). Pero este proyecto está enfocado al análisis de vibraciones para dos grados de libertad. Los análisis cuantitativos más importantes son las medidas de desempeño que representan la comparación entre base fija y base aislada Justificación del proyecto.

El presente estudio se realiza por la necesidad de implementar estructuras y edificaciones con sistemas de aislamiento sísmico y así reducir las pérdidas materiales y principalmente la pérdida de vidas humanas que pueden ser causadas por los fenómenos naturales, especialmente los terremotos.

En este contexto se hace necesaria la investigación en el campo de la remediación de los efectos sísmicos sobre estructuras y edificaciones. Por lo que es indispensable una acción inmediata para la protección de la población en riesgo. Se requiere el análisis numérico y experimental de un Sistema híbrido de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar, basado en la construcción de un modelo físico a escala 1:10 de la vivienda y de los aisladores sísmicos de fricción y elastoméricos, con el fin de tener una proyección en la utilización de aislamiento sísmico de bajo: costo en las edificaciones y estructuras.

Para lograr la disipación de la energía que recibe la estructura durante un sismo, la mejor manera de protegerla es absorbiendo esta energía mediante elementos mecánicos. Para ello se necesita conocer los tipos de elementos mecánicos que se pueden implementar en diferentes tipos de estructuras y edificaciones para lo que es importante realizar un estudio de estos tipos de aisladores

para la construcción del sistema de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar, abriendo campo al estudio de la mecánica de estos elementos se puede decir que lo más evolucionado dentro aislamiento sísmico son los aisladores de fricción.

Con los antecedentes mencionados se da apertura al estudio del aislamiento sísmico considerando un parámetro indispensable la fricción entre materiales, y las vibraciones mecánicas.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Los sistemas pasivos de control sísmico como el aislamiento sísmico son herramientas y técnicas afectivas para el diseño de estructuras resistentes a terremotos. Muchas investigaciones experimentales y analíticas han demostrado la efectividad de los sistemas de aislamiento de base en cuanto a la reducción del nivel de respuesta de las estructuras en comparación de las estructuras con base fija. El aislamiento de base desacopla la estructura de los efectos de alta frecuencia y periodo corto que son producidos por los sismos. Esto se logra mediante la utilización de dispositivos mecánicos que ayudan a aumentar el periodo fundamental de la estructura el cual es varias veces mayor que el de una estructura sin aislamiento. La instalación típica de estos dispositivos es entre el suelo y la superestructura, es decir el aislamiento es partiendo de la base, sin embargo varios dispositivos de aislamiento sísmico se pueden instalar a lo largo de la altura de la estructura para aislar una porción superior de la misma. Los usos de esos sistemas de aislamiento de base se vuelven día a día más comunes en países desarrollados, para infraestructuras de primera importancia como hospitales y puentes. La efectividad de estos sistemas se ha de mostrado en sismos ocurridos en Nueva Zelanda, Estados Unidos, Japón, Italia, Chile y Ecuador como en el terremoto del 16 de Abril del 2016, el puente Los Caras ubicado entre las poblaciones de Bahía de Caráquez y San Vicente que hasta en ese entonces era la única estructura con aislamiento de base en el país, logró tener un excelente desempeño durante y posterior a dicho evento despertando un alto grado de interés en la implementación de estos dispositivos en las estructuras de esencial funcionamiento como hospitales, viviendas, y grandes estructuras contenedoras de materiales inflamables. Este capítulo proporciona una descripción general de algunos dispositivos de aislamiento de base comunes.

2.2. Principios básicos del aislamiento sísmico

Para diseñar una estructura resistente a los terremotos se debe garantizar que la misma brinde confianza, en los componentes mecánicos que se desee implementar para obtener gran disipación de energía, el principio básico de un diseño sísmico convencional es el aseguramiento y protección de vidas, sin embargo para estructuras de gran magnitud e importancia el aseguramiento de vidas no es suficiente y para obtener esto a un precio razonable se debe implementar elementos de aislamiento sísmico y amortiguamiento suplementario. (C. Christopopous, A. Filiatrault., 2008). Varios estudios han demostrado los beneficios del aislamiento sísmico y los sistemas suplementarios para la reducción de cargas durante un severo sacudimiento producido por un terremoto, se destaca que un diseño debe ser realizado considerando un desplazamiento y capacidad de loa aisladores mencionados. (Naeim, Kelly , 1999), la mayoría de los estudios de utilidad de protección sísmica han utilizado las mejores estimaciones de propiedades mecánicas para el aislamiento y la disipación de energía sin tomar en cuenta los efectos del tiempo de construcción de la estructura sobre los dispositivos de aislamiento.

2.2.1. Ingeniería Sísmica basada en el rendimiento de la estructura

En Estados Unidos desde 1920 se empezó a diseñar las construcciones con el propósito de evitar el colapso de la estructura y brindar seguridad de vidas, es por eso que se empezaron a desarrollar códigos de construcción para que las construcciones en el peor de los casos sufran daños limitados

reparables para temblores moderados, con la utilización de los códigos mencionados se ha podido reducir de manera significativa el daño en edificaciones durante sismos pequeños y medianos pero aun así no se logró cumplir totalmente los objetivos de desempeño para terremotos poco comunes de magnitudes grandes (Constantinou et al., 2008):

- Evitar el colapso en fuertes terremotos.
- Proveer seguridad de vida en fuertes terremotos.
- Realizar reparaciones moderadas para sismos medianos.
- No tener danos con mayor frecuencia.

El desempeño de las construcciones para sismos críticos empezó a evolucionar a mediados de los años 70 a partir del terremoto de San Fernando, a pesar de que se había mejorado el desempeño esto comenzaba a representar grandes pérdidas económicas. De aquí se evoluciona y se llega a proveer la seguridad de vida a un costo razonable con la utilización de sistemas suplementarios de aislamiento sísmico. A comienzos de la década de los 90 se fundó la agencia federal de gestión de emergencias (FEMA) con sus siglas en inglés, a partir de que concluyó el primer objetivo de una construcción sismo resistente tiene que ser un objetivo de rendimiento donde se debe diseñar una estructura basándose en la magnitud del sismo y en la magnitud del daño que puede ser causado por el mismo como también el daño permisible al cual se diseña la estructura, otra importante característica es la introducción de los niveles de rendimiento estándar basados en los parámetros de respuesta de la estructura, La Figura 2. Muestra los niveles cualitativos de rendimiento de la FEMA.

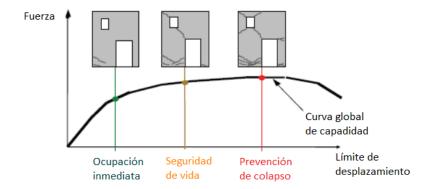


Figura 2. Niveles cualitativos de rendimiento de la FEMA 273/274/356. (Fuente: (Technical Report MCEER, 2007)

El consejo de tecnología aplicada (ATC) junto con la FEMA se encargan de desarrollar la siguiente generación de lineamientos para el diseño de estructuras con protección sísmica el proyecto fue conocido como ATC-58. El lineamiento es aplicado para la nueva y retroalimentada metodología de construcción de elementos estructurales y no estructurales aunque primordialmente en el diseño para resistir los efectos de un terremoto, la base de este lineamiento era tratar de predecir un peligro determinístico o probabilístico de un terremoto, el peligro es representado en términos de pérdidas específicas como el costo de restauración, el funcionamiento una vez que ha ocurrido el daño, muertes y perdidas por tiempo, los pasos son implementados de una forma individual, en la figura 3. Se puede observar un diagrama de Procesos de Hamburgo et al (2004) para la ATC-58.

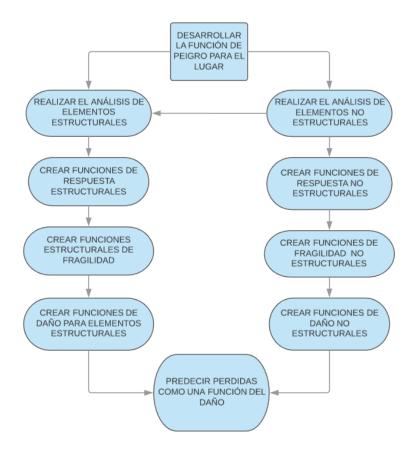


Figura 3. Diagrama de flujo para la predicción de rendimiento Fuente: (Hamburgo et al 2004)

La metodología basada en el rendimiento es formalizada en una base probabilística y es compuesta por cuatro pasos secuenciales: evaluación de riesgo, análisis de componentes estructurales y no estructurales, evaluación de daño y análisis de pérdidas, el producto de estos cuatro pasos es caracterizado por una variable generalizada para cada uno de los pasos respectivamente acompañado por sus siglas en inglés: intensidad de medida (IM), parámetro de demanda de ingeniería (EDP), medida de daño (DM), y decisión variable (DV). La figura 4 ilustra la metodología y sus fundamentos probabilísticos donde las variables son expresadas en términos de probabilidades condicionales de superación y el enfoque de la figura 4 asume que esas

probabilidades condicionales entre los parámetros (Moehle, 2003) y (Hamburgo et al 2004) describe el rendimiento basado en la metodología que ha sido adoptada por el ATC-58.

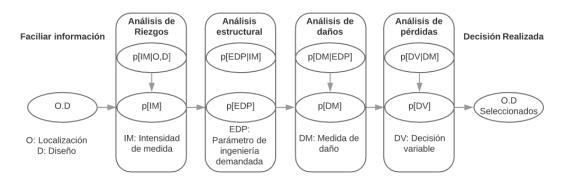


Figura 4. Metodología estadística basada en el rendimiento Fuente: (Moehle 2003)

2.2.2. Sistemas de protección Sísmica

El diseño convencional de puentes, estructuras y edificios son basados en la disipación de energía de un sismo inducido a través de una respuesta inelástica en diferentes componentes del marco estructural. Dicha respuesta es relacionada directamente con el daño estructural el cual produce pérdidas directas e indirectas. El tradicional análisis y diseño sísmico no permite estimar con certeza los daños estructurales y deformaciones que sufre la estructura, haciendo imposible de predecir la posibilidad de tener pérdidas directas e indirectas en la estructura así como lesiones y pérdidas de vidas.

Los sistemas de protección sísmica son las nuevas alternativas de la ingeniería sísmica que se ha venido desarrollando durante el siglo XX. En donde se puede destacar a los aisladores de base y a los dispositivos de disipación de energía que fueron desarrollados para atenuar los movimientos durante los sismos en estructuras principalmente en edificios y en puentes, los aisladores sísmicos son normalmente instalados entre las vigas y las cabeceras de pilote en puentes y en edificaciones

son instalados entre la fundación y el primer nivel de suspensión. La figura 5a muestra una instalación típica de aislador sísmico en puentes, La figura 5b muestra que los aisladores son instalados en la parte superior de los pilares. En ambos casos los objetivos de diseño asocian a los aisladores sísmicos con la reducción de fuerzas en una superestructura o en una subestructura y la redistribución de fuerzas entre los pilares y los estribos.



- b. Elevación de puente
- a. Aislador sísmico por péndulo de fricción

Figura 5. Instalación típica de un aislador sísmico en un puente Fuente: (Constantinou et al., 2008)

Sistemas como estos proveen a) aislamiento horizontal de los efectos de sacudida de los terremotos y b) mecanismos de disipación de energía para reducir desplazamientos. La Figura 6a ilustra el efecto de aislamiento horizontal en las fuerzas inerciales que se pueden producir en una estructura común, la elongación del periodo hace que la aceleración reduzca sustancialmente y a su vez reduce la fuerza lo que permite realizar una construcción efectiva de estructuras para un rango elástico en el diseño para un movimiento por sismo la Figura 6b muestra e efecto del aislamiento en el desplazamiento de la estructura, se debe tener en cuenta que casi todo el desplazamiento ocurre sobre el aislador y no sobre los pilares.

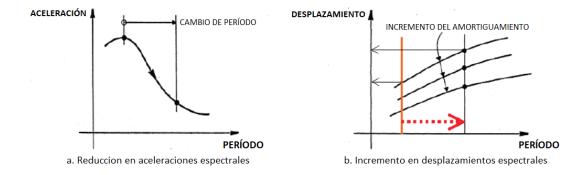


Figura 6. Principios del aislamiento sísmico. Fuente: (Constantinou et al. 2008)

Otra de las alternativas que se ha desarrollado en la ingeniería son los sistemas de control de vibraciones, estos sistemas no son colocados en la base sino como parte de la estructura su objetivo es amortiguar el movimiento de las columnas y en las uniones entre vigas y columnas, han sido más utilizados en la ingeniería estructural se subdividen en sistemas pasivos y sistemas activos. Los sistemas activos funcionan debido a la acción de una fuerza externa dan estabilidad a la estructura oponiéndose a la misma. Los sistemas pasivos aportan a la estabilidad de la estructura debido a la energía excitadora de la fuerza aplicada. Dentro del grupo de amortiguadores pasivos podemos encontrar a los amortiguadores histéricos (Figura 7) que se caracterizan por la utilización de materiales como acero y cobre basando su funcionamiento en la plasticidad de los mismos que permite la deformación inelástica de sus componentes, estos dispositivos tienen durabilidad y confiabilidad.





Figura 7. Disipadores histeréticos metálicos tipo tadas y tipo panel. Fuente: (Oviedo & Duque, 2006)

2.3. Clasificación de los aisladores sísmicos

Este trabajo basa su estudio en estos dispositivos. Hay dos tipos comunes de aisladores sísmicos usados en el planeta actualmente, son los aisladores elastoméricos (aisladores de caucho, aisladores de caucho con núcleo de plomo) y los aisladores sísmicos de fricción (fricción esférica, aisladores de péndulo de fricción, fricción plana). La respuesta de desplazamiento aumentada asociada con el uso de aisladores sísmicos tiene un impacto de disuasión en juntas, para controlar los desplazamientos y así reducir las demandas en las juntas y el costo de los aisladores se logra a través de la disipación de energía histerética que conduce a la relación de fuerza cortante-desplazamiento lateral ilustrado en la Figura 8.

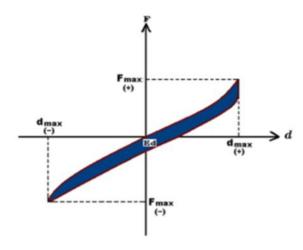


Figura 8. Representación de la curva de Histéresis en los aisladores sísmicos Fuente: (Auqui, 2010)

El fin de estos dispositivos es absorber de forma parcial la energía proporcionada por el sismo previamente a ser transmitida a la subestructura y superestructura, de puede ilustrar los diferentes tipos de dispositivos en la Figura 9.

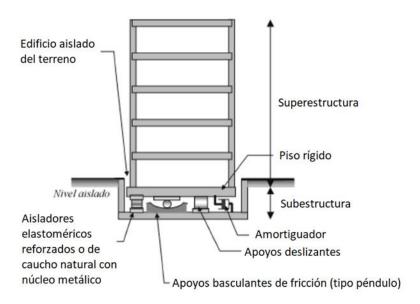


Figura 9. Técnicas de aislamiento sísmico de base Fuente: (Oviedo & Duque, 2006)

En los aisladores elastoméricos la reducción de la energía que recibe la superestructura se da por el aumento del periodo de vibración de la estructura haciendo que se menor al periodo de vibración natural del suelo. Mientras que en los aisladores friccionales se reduce la energía debido al deslizamiento entre el edificio y la cimentación.

2.3.1. Aisladores sísmicos elastoméricos

Los aisladores de este tipo tienen la capacidad de absorber la energía que es producida por la acción de un sismo de gran escala. Estos dispositivos son conformados por un conjunto de láminas planas de goma intercaladas por placas de acero adheridas a dichas láminas, como se muestra en la Figura 10. Se pueden deformar en un plano horizontal y permiten el desplazamiento horizontal de la estructura con un movimiento relativo al suelo, las placas de acero restringen la deformación lateral de la goma y a la vez se genera un amortiguamiento ante cargas sísmicas laterales. Para el análisis del comportamiento de estos elementos se usan mecanismos de amortiguamiento histérico como ya se mencionó. Estos mecanismos tienen la capacidad de proporcionar amortiguamiento teniendo un volumen de pequeño tamaño, dependen del nivel sísmico y de la cantidad de dispositivos instalados en la estructura, estos aisladores tienen alta durabilidad, son confiables y tienen costos razonables.

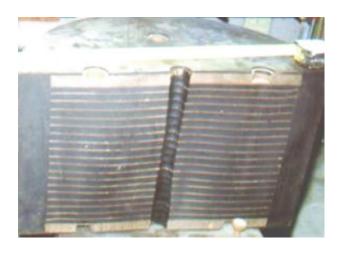


Figura 10. Aislador sísmico elastomérico Fuente: (Constantinou et al., 2007)

La goma proporciona a la estructura amortiguamiento y flexibilidad, lo que hace que se elimine la necesidad de tener sistemas de apoyo y amortiguamiento por separado, esto implica una ventaja constructiva y económica para el costo total de la construcción.

Son caracterizados por tener una rigidez horizontal baja, una rigidez vertical alta, y una adecuada capacidad de amortiguamiento, estas características permiten fundamentalmente el crecimiento del periodo de vibración de la estructura, para resistir las cargas verticales sin una configuración apreciable y para limitar desplazamientos horizontales en las estructuras aisladas sísmicamente. La capacidad de amortiguamiento de este aislador depende del tipo de elastómero del cual está compuesto que usualmente son de gran capacidad de amortiguamiento.

2.3.2. Aisladores sísmicos de goma con núcleo de plomo

Los aisladores con núcleo de plomo son una alternativa de los aisladores elastómeros con capas de goma y metálicas, el objetivo del núcleo de plomo es proporcionar adicional amortiguamiento a la estructura y reducir deformaciones. Estos objetivos se logran debido a las propiedades

mecánicas que poseen el plomo y la ubicación de su núcleo dentro del aislador elastomérico (Figura 11). El plomo se destaca por poseer una baja tensión de fluencia que es de 1.45 Ksi aproximadamente y una alta rigidez inicial al corte (G entre 65 y 100 Psi aproximadamente) (Auqui, 2010). Además el plomo tiene unas buenas condiciones de fatiga ante cargas cíclicas que se producen en los sismos y una baja tensión de fluencia otorgando un comportamiento elastoplastico al aislador sin embargo la rigidez del aislador elastómerico se mantiene.

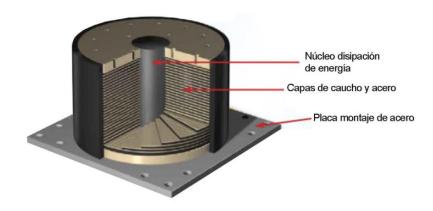


Figura 11. Aislador de goma con núcleo de plomo Fuente: (Sysprotec, 2018)

El nucleó de plomo también provee al aislador de disipación de energía, el máximo rango de tensión de corte para este tipo de aisladores varía en función del fabricante, pero generalmente va entre 125% y 200%.

2.3.3. Aisladores sísmicos de fricción

Los aisladores sísmicos de fricción son capaces de soportar cargas axiales muy altas en grandes desplazamientos laterales, logran disipar energía en cantidades considerables, son rígido-plásticos debido a los ciclos de histéresis que poseen. Dentro de estos aisladores se debe considerar la forma

que posee la superficie de contacto, la forma más básica de contacto es una superficie plana y carece de alguna fuerza de restitución, por lo que no es muy utilizada generalmente pero es esencial dentro del presente proyecto ya que forma parte del sistema híbrido que se pretende implementar. Se han implementado conjuntos de mecanismos para proporcionar fuerzas de restitución a los mecanismos de fricción. Estos conjuntos se denominan sistemas de péndulo de fricción FPS (fiction pendulum system). Sus principales componentes se los puede ver en la Figura 12.

- Plato cóncavo y placa de alojamiento (fundición dúctil, o acero fundido)
- Control deslizante con contrapeso (típicamente de acero inoxidable austenítico 304)
- Material del cojinete (alta carga, compuesto de baja fricción)
- Superposición de acero inoxidable (típicamente de acero inoxidable austenítico 316)

El péndulo de fricción de concavidad doble es derivado del péndulo de fricción simple que se observa en la Figura 12. Los mecanismos de fricción son capaces de soportar altas cargas axiales con largos desplazamientos laterales. El aislamiento se logra mediante el deslizamiento del deslizador articulado sobre la superficie cóncava. La disipación de energía es proporcionad a por la fricción entre el material compuesto del cojinete y la capa de acero inoxidable que no se muestra en la figura. El recubrimiento de acero inoxidable está unido al plato cóncavo. La interfaz deslizante desempeña un papel crucial en la respuesta del cojinete del péndulo de fricción y la resistencia a la fricción de la interfaz es una función de.

- Recubrimiento de acero inoxidable
- Diámetro del deslizador (que afecta el confinamiento del compuesto)

- Presión de contacto
- Velocidad de deslizamiento
- Temperatura
- Desgaste



Figura 12. Vistas de un aislador sísmico de péndulo de fricción. Fuente: (Constantinou et al., 2007)

2.3.4. Aisladores tipo EQS (Eradiquake Bearings)

Es un sistema de cojinetes de puentes de aislamiento diseñado para minimizar las fuerzas y los desplazamientos experimentados por las estructuras durante un terremoto. Los componentes básicos del EQS es un disco deslizante con elementos de fuerza de restauración en forma de espirales de uretano. La disipación de energía se la realiza mediante fricción deslizante en la interfaz de acero inoxidable y el PTFE (Politetrafluoroetileno)

Cojinete de disco con elementos de fuerza de restauración en forma de espirales de uretano. La disipación de energía se realiza mediante fricción deslizante en la interfaz de acero inoxidable

PTFE. Este tipo de aislador es adecuado para pequeños y moderados desplazamientos causados por un sismo. Este tipo de aisladores han sido utilizados para puentes en el centro y este de Estados Unidos. La Figura 13 muestra el interior de un aislador tipo EQS

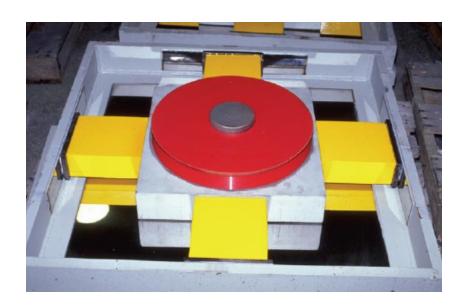


Figura 13. Construcción interna de un aislador sísmico tipo EQS. Fuente: (rjwatson.com, 2007)

2.4. Sistemas híbridos

Es la combinación de dos o más sistemas o tecnologías para realizar una función con un determinado propósito. Principalmente este tipo de sistemas se los utiliza en la generación de energía renovable. El presente trabajo consiste en la implementación de un sistema híbrido de aislamiento de base que consiste en combinar aisladores sísmicos de fricción con un aislador de placas de goma y acero (elastomérico).

Un primer ejemplo de dispositivos de aislamiento sísmico es el implementado en plantas nucleares en California. Informes relacionados con la factibilidad de aplicar tecnología de aislamiento sísmico a centrales nucleares (NPP) e instalaciones relacionadas han notado la falta de datos de prueba públicamente disponibles sobre las características mecánicas de grandes aisladores sísmicos a gran escala, especialmente cuando se someten a carga sísmica realista condiciones. Estos informes subrayaron la necesidad de pruebas de sistemas de componentes y estructuras que consideren diferentes tipos de rodamientos a gran escala para identificar la influencia de la intensidad de carga axial y el historial. El historial de deformación lateral y las tasas de carga sobre el rendimiento sísmico, y para evaluar y mejorar la confiabilidad de los modelos y métodos numéricos. Debido a que la respuesta dinámica de una estructura aislada depende de las características combinadas del movimiento del suelo, los aisladores y la superestructura, las pruebas de prototipos estándar pueden no ser adecuadas por sí mismas para su uso en simulaciones por computadora. Por lo tanto, se desean pruebas dinámicas de modelos de NPP aislados bajo excitaciones más realistas que las proporcionadas por las pruebas de prototipo estándar. Además, las propiedades de los aisladores y el comportamiento final probablemente dependan de los efectos de escala y velocidad de carga. Pero los modelos a escala ofrecen una estimación no alejada de la realidad. (Schellenberg, y otros, 2015).

En Japón HRD implemento un sistema híbrido de aislamiento de base que consta precisamente de aisladores sísmicos de base elastoméricos y friccionales. El sistema de aislamiento sísmico híbrido que incorpora multi-caucho elástico con un control deslizante con recubrimiento especial es el primero de este tipo para casas en Japón (Figura 14).

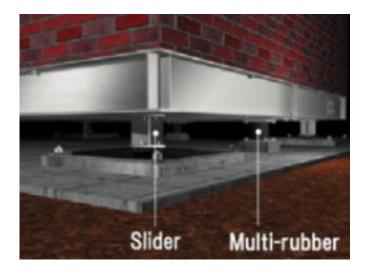


Figura 14. Sistema híbrido de aislamiento de base. Fuente: (HRD, 2014)

2.5. Resumen

Una estructura resistente a los terremotos debe garantizar funcionalidad luego de haber ocurrido el fenómeno, el principio básico que se desea implementar es el aseguramiento de vidas, en un comienzo se realizaban estructuras convencionales pero materiales y métodos de construcción más efectivos y la implementación de materiales más resistentes pero las estructuras llegaban a tener un costo muy elevado, posteriormente se emplearon métodos estadísticos para estimar un rango de ocurrencia de terremotos y el estudio del lugar de diseño y su alrededor tomando en cuenta la magnitud y la cercanía a las fallas del posible origen de los sismos y los diseños basados en las respuestas que presentaban las estructuras. Finalmente, para los años 90 se implementaron dispositivos mecánicos que permiten reducir la energía provocada por el sismo a la superestructura, en principio se implementaron los disipadores de energía y amortiguadores viscosos que reducen la fuerza y absorben energía del sismo protegiendo a la estructura en cualquier elevación de la misma. Luego se implementaron dispositivos mecánicos que permiten aislar las vibraciones producidas por el sismo desde la base de la estructura, estos dispositivos son los aisladores sísmicos que pueden ser elastoméricos o friccionales. Los primeros son de goma como el material

predominante, pueden ser exclusivamente de ese material, pero al ser combinado con placas de acero presenta una mejor rigidez del dispositivo y una mejor respuesta a los efectos de fatiga, luego se introdujo un núcleo de plomo ayuda a mejorar la elasticidad del dispositivo bajo acciones de carga cortantes y disipar energía en forma de calor. Los aisladores friccionales reducen el movimiento de la superestructura, son capaces de soportar desplazamientos laterales muy grandes, dentro de estos aisladores se considera la forma de la superficie de contacto la forma más básica y la que se tiene como objetivo en este proyecto es la forma plana que carece de fuerza de restitución, pero se puede emplear en un sistema híbrido junto con otro dispositivos que pueda implementar esta fuerza de restitución. Se han implementado mecanismos para garantizar una fuerza de restitución debido a la forma de la superficie de contacto conformando los aisladores de fricción tipo pendular los cuales son de simple péndulo, doble péndulo y triple péndulo cada variación ha permitido que se tenga mayor capacidad de desplazamiento sin tener que aumentar el tamaño del dispositivo ya que eso implicaría alto costo. Para poder realizar el diseño de los aisladores especialmente del sistema híbrido se debe conocer sobre las vibraciones que se producen en los sismos y como se pueden atenuar las mismas ya que de eso depende las características de los aisladores tanto elastomérico como friccional dentro del sistema híbrido, lo mismo que se estudia en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO III

3. VIBRACIONES

3.1. Introducción

Una vibración es una propagación de ondas elásticas que producen deformaciones y fuerzas sobre una posición de equilibrio, es un movimiento repetitivo que se produce alrededor de una posición de equilibrio luego de recibir un estímulo el mismo que da origen a un movimiento. La vibración se produce cuando el sistema es desplazado desde una posición de equilibrio estable y el sistema tiende a retomar su posición original mediante fuerzas de restitución elástica o gravitacional. El intervalo de tiempo en el cual un sistema realiza un ciclo completo de movimiento se lo conoce como ciclo de vibración y el número de ciclos por unidad de tiempo se la conoce como frecuencia y se conoce como amplitud de vibración el máximo desplazamiento. Los ejemplos más comunes que se pueden ilustrar como vibraciones son la oscilación de un péndulo simple (Figura 15) y una cuerda pulsada desde su extremo.

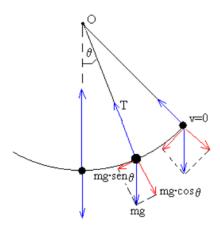


Figura 15. Ilustración de un movimiento vibratorio de péndulo simple. Fuente: (www.sc.ehu.es, 2012)

Dentro de estos sistemas se da interacción entre energías cinética y potencial que debido a una determinada altura y velocidad que pueden llegar a alcanzar, estas energías caracterizan al movimiento. La aceleración, la velocidad y el desplazamiento son las variables determinantes para el estudio de vibraciones, con estas variables se obtienen curvas de movimiento armónico que es un tipo de movimiento vibratorio que abarca los conceptos y los elementos donde se incluye este tipo de movimientos y la representación gráfica son curvas sinusoidales como se ilustra en la Figura 16.

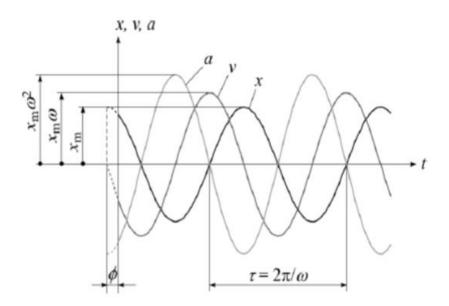


Figura 16. Representación gráfica de las variables que componen un sistema de vibraciones Fuente: (Legrá & Quiza, 2012)

Para el aislamiento sísmico se debe tener en cuenta estos fenómenos como reconocer el tipo de vibración al que se someten las estructuras para poder realizar el estudio de aislamiento sísmico y el tipo de sistema que es ideal para cada caso de los cuerpos vibratorios.

3.2. Tipos de vibraciones

Las vibraciones son clasificadas según su tipo de movimiento sin tomar en cuenta los grados de libertad a los que se somete el sistema, las vibraciones se clasifican como libres y forzadas.

3.2.1. Vibraciones libres

Se denomina vibración libre a la que es causada por un impulso inicial donde el sistema vibra por sí solo, el estímulo inicial decrece hasta que se extingue luego de haber iniciado el movimiento. Dentro de las vibraciones libres se encuentran las vibraciones libres con amortiguamiento y las vibraciones libres sin amortiguamiento en la Figura 17 se puede observar el esquema de un sistema masa resorte sin amortiguamiento.

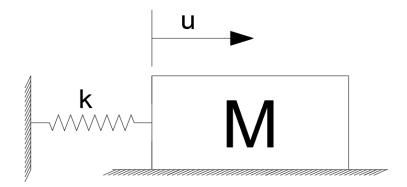


Figura 17. Sistema masa resorte libre y sin amortiguamiento

- <u>Vibraciones libres sin amortiguamiento</u>: No existen elementos de amortiguación que ayuden a disipar la energía sísmica de la estructura. La ecuación que describe este movimiento es:

$$m\ddot{u} + ku = 0 \tag{3.1}$$

Dividiendo la ecuación para su masa se puede escribir como:

$$\ddot{u} + \omega_n^2 u = 0 \tag{3.2}$$

Donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3.3}$$

 $\omega_n=$ Frecuencia fundamental del sistema

k =Constante elástica

m = Masa del sistema

Adicionalmente se puede mencionar el período que se puede representar con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} \tag{3.4}$$

La Figura 18 es la representación gráfica de la solución de la ecuación (3.2). Es una función sinusoidal dependiente del tiempo de vibración.

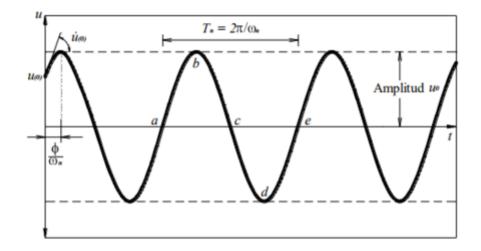


Figura 18 Vibración libre sin amortiguamiento Fuente: (Auqui, 2010)

 Vibraciones libres con amortiguamiento: En este tipo de vibraciones si existe la presencia de elementos de amortiguación que ayuden a disipar la energía sísmica de la estructura, atenuando las vibraciones. La ecuación diferencias que describe su movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \tag{3.5}$$

La constante c es la constante de amortiguamiento, su magnitud dependerá del tipo de amortiguamiento que se implemente en el sistema, dependiendo de las necesidades del sistema sus unidades pueden ser (Ns/m=Kg/s), realizando el mismo procedimiento que en la ecuación de una vibración libre no amortiguada se tiene:

$$\ddot{u} + 2\zeta \dot{u} + \omega_n^2 u = 0 \tag{3.6}$$

La ecuación característica $r_1, r_2 = r^2 + 2\zeta r + \omega_n^2 = 0$ de la ecuación (3.6) tiene raíces:

$$r_1, r_2 = -\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - \omega_n^2} = -\frac{c}{2m} + \frac{1}{2m}\sqrt{c^2 - 4km}$$
 (3.7)

Donde la relación de amortiguamiento es:

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} > 0 \tag{3.8}$$

 c_{cr} Es el coeficiente de amortiguamiento crítico simboliza la línea de división entre un movimiento oscilatorio y el movimiento de una sola oscilación se representa como dos veces el producto de la masa del sistema por su frecuencia fundamenta.

$$c_{cr} = 2m\omega_n \tag{3.9}$$

Existen 3 tipos de sistemas de amortiguación: Sistema críticamente amortiguado, sistema sobreamortiguado y sistema subamortiguado.

- <u>Sistema críticamente amortiguado:</u> Es cuando el sistema retorna a su posición de equilibrio sin realizar una oscilación.

$$c = c_{cr} \ o \ \zeta = 1; \ c = \sqrt{4km}$$

- <u>Sistema sobreamortiguado:</u> Es cuando el sistema retorna a su posición de equilibrio despacio y cumple con la condición:

$$c < c_{cr} \ o \ \zeta < 1; \ c < \sqrt{4km}$$

Para un sistema subamortiguado la frecuencia de vibración es interpretada por la siguiente ecuación:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \frac{\sqrt{4km - c^2}}{2m}$$
 (3.10)

Los 3 casos de movimiento libre con amortiguamiento se ilustran en la Figura 19.

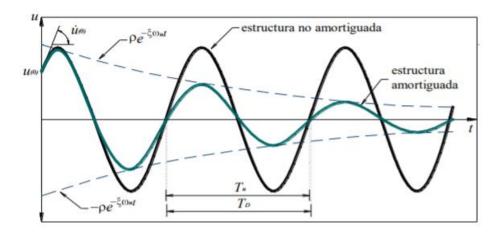


Figura 19. Representación gráfica de los efectos de amortiguación libre Fuente: (Auqui, 2010)

3.2.2. Vibraciones forzadas

Las Vibraciones forzadas se caracterizan por una fuerza externa que actúa sobre el sistema durante el período de vibración (Figura 20).

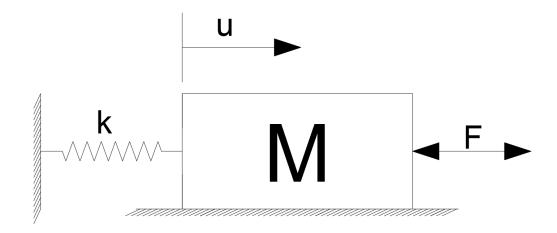


Figura 20. Esquema de un sistema masa-resorte con excitación armónica sin amortiguamiento.

Vibraciones forzadas sin amortiguamiento: Se mantiene el mismo concepto de la vibración libre sin amortiguamiento y su ecuación diferencial característica es:

$$m\ddot{u} + ku = f(t) \tag{3.11}$$

El movimiento es establecido por una carga armónica dependiente del tiempo y de su frecuencia.

$$\ddot{u} + ku = F_0 \sin(\omega t) \qquad o \qquad m\ddot{u} + ku = F_0 \cos(\omega t) \tag{3.12}$$

La grafica de la solución de esta ecuación se puede observar en la Figura 21.

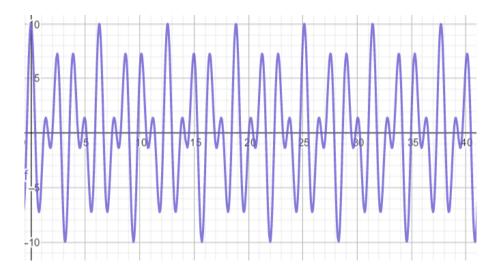


Figura 21. Sistema no amortiguado con carga armónica.

Para las siguientes condiciones:

 $\omega/\omega_n <$ 1: El desplazamiento está en fase con la fuerza aplicada.

 $\omega/_{\omega_n} >$ 1: El sistema estará fuera de fase con la fuerza aplicada.

 $\omega/\omega_n = 1$: El sistema cambia de respuesta.

 <u>Vibraciones forzadas con amortiguamiento</u>: Se mantiene el mismo concepto de la vibración libre con amortiguamiento y su ecuación diferencial característica es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \tag{3.13}$$

Para ambos casos la función f(t) representa la fuerza externa que se aplica al sistema, la misma depende del tiempo y puede ser de diferentes tipos. Se incluye un amortiguamiento al caso de vibración forzada no amortiguada de la ecuación 3.14.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_0 \sin(\omega t) \quad o \quad m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_0 \cos(\omega t) \tag{3.14}$$

El método de coeficientes indeterminados indica que debemos sustituir:

$$u(t) = A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t) \tag{3.15}$$

Se remplazan los términos en la ecuación (3.14) agrupando e igualando los términos de $sen(\omega t)$ y $cos(\omega t)$ se obtienen dos ecuaciones y sin dificultad se puede calcular los Valores de A y B.

$$A = \frac{(k - m\omega^2)F_0}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \qquad B = \frac{c\omega F_0}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}$$
(3.16)

A partir de esto se obtiene la Oscilación periódica estacionaria resultante.

$$u_p(t) = C\cos(\omega t - \alpha) \tag{3.17}$$

Donde:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$
 (3.18)

De modo que

$$\begin{cases} \tan^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2} & \text{si } k > m\omega^2 \\ \pi + \tan^{-1} \frac{c\omega}{k - m\omega^2} & \text{si } k < m\omega^2 \end{cases}$$

Se ilustra la solución de la ecuación en la Figura 22.

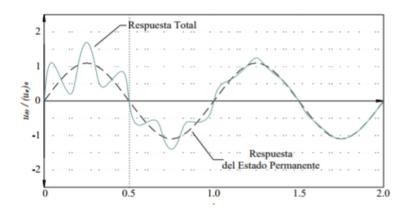


Figura 22. Sistema amortiguado con carga armónica. Fuente (Abad, 2007)

Cuando $\omega = \omega_n$ el sistema tiene la respuesta mostrada en la Figura 23.

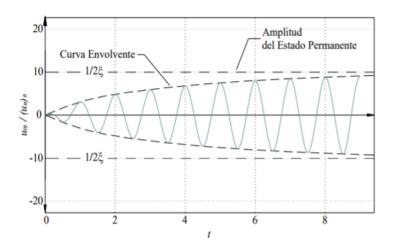


Figura 23. Respuesta de un sistema amortiguado cuando la frecuencia del sistema es igual a su frecuencia natural.

Fuente (Abad, 2007)

La respuesta depende del amortiguamiento de la estructura.

Para las siguientes condiciones:

 $^\omega/_{\omega_n} <$ 1: La deformación de la respuesta no depende del amortiguamiento.

 $^\omega/_{\omega_n} >$ 1: La respuesta es controlada por la masa del sistema.

3.3. Resonancia

Cuando un cuerpo tiene la capacidad de vibrar y una fuerza externa periódica actúa sobre el mismo y se acercan el periodo de vibración del cuerpo con el periodo de vibración de la fuerza produce que la amplitud del sistema se haga muy grande y puede ser un efecto destructivo. La ecuación de la constante A de la solución tentativa se puede escribir de la forma

$$A = \frac{F_0}{k - m\omega^2} = \frac{F_0/k}{1 - (\omega/\omega_n)^2} = \pm \frac{\rho F_0}{K}$$
 (3.20)

Donde F_0/k es el desplazamiento estático, de un resorte con constante k, debido a una fuerza constante F_0 y un factor de amplificación ρ que se define como.

$$\rho = \frac{1}{|1 - (\omega/\omega_n)^2|} \tag{3.21}$$

El cual tiende al infinito cuando ω_n tiende a ω y genera un aumento de la amplitud de oscilaciones sin límite alguno, esto indica que lo peor que podría pasar a un sistema es que su frecuencia natural se iguale con la frecuencia de la fuerza (Edwards & Penney, 2001). Dividiendo cada término de la ecuación (3.14) entre m, se transforma en.

$$\ddot{u} + \omega_n^2 u = \frac{F_0}{m} \sin(\omega_n t) \tag{3.22}$$

De aquí la solución particular.

$$u_p(t) = \frac{F_0}{2m\omega_n} t \sin(\omega_n t)$$
 (3.23)

Lo que conlleva a tener una amplitud periódicamente creciente como se indica en la Figura 24.

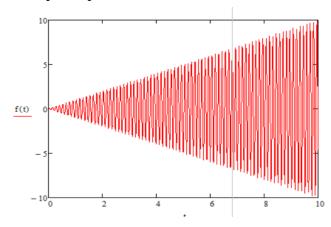


Figura 24. Fenómeno de resonancia, producido cuando se iguala la frecuencia natural del sistema con la frecuencia de la fuerza externa

3.4. Modelación de sistemas mecánicos

Una consideración que siempre se debe tomar en cuenta para el diseño de sistemas mecánicos y estructuras es la eliminación de vibraciones de resonancia destructiva. La formulación de la ecuación diferencial del sistema es la acción elemental para determinar la frecuencia natural del mismo, además de la Ley de Newton en ocasiones es muy necesario implementar el principio de conservación de la energía. Con frecuencia son útiles las fórmulas siguientes de la energía cinética y potencial.

1. Energía Cinética: $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ para la traslación de una masa con velocidad v,

- 2. Energía Cinética $E_c = \frac{1}{2}I\omega^2$ para la rotación de un cuerpo con momento de inercia I y con velocidad angular ω ,
- 3. Energía potencial: $C = \frac{1}{2}ku^2$ para un resorte con constante k y que esta estirado o comprimido una distancia u,
- 4. Energía potencial: $E_p = mgh$ para la energía potencial gravitatoria de una masa con una respectiva altura por encima de un nivel de referencia y considerando la gravedad como constante.

(Edwards & Penney, 2001)

Para un sistema masa resorte como el de la Figura 25 que representa que representa un disco de rueda de radio α sin fricción.

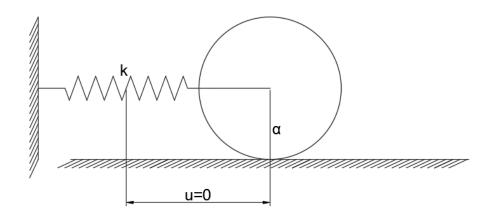


Figura 25. Disco rodante

Con la notación anterior pero aplicando el principio de conservación de la energía se obtiene:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}ku^2 = E \tag{3.24}$$

E es la energía mecánica total del sistema se toma en cuenta que $v=\alpha\omega$ y $I=m\alpha^2/2$, entonces la ecuación se simplifica.

$$\frac{3}{4}mv^2 + \frac{1}{2}ku^2 = E \tag{3.25}$$

Ahora la diferenciación $v = \dot{u}$, $\dot{v} = \ddot{u}$ da.

$$\frac{3}{4}m\dot{u}\,\ddot{u} + \frac{1}{2}ku\dot{u} = E \tag{3.26}$$

Se divide cada término para $\frac{3}{2}m\dot{u}$ para obtener.

$$\ddot{u} + \frac{2k}{3m}ku = E \tag{3.27}$$

Por lo tanto su frecuencia natural es $\sqrt{2k/3m}$ que es la ecuación previa al deslizamiento sin fricción.

3.5. Aislamiento de vibraciones

La forma más efectiva de reducir o eliminar el efecto de las vibraciones es modificar o detener la causa de las mismas, si no hay la posibilidad de realizar esto se puede aislar la causa de las vibraciones del elemento de interés. En el caso del aislamiento sísmico se utiliza elementos entre la subestructura y la superestructura, la herramienta más utilizada para diseñar un aislador de vibraciones es la teoría de transmisibilidad de desplazamiento y fuerza inducida como se indica en la Figura 26.

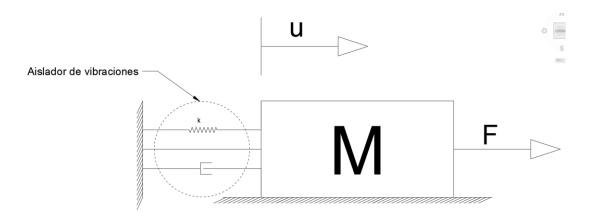


Figura 26. Sistema de transmisibilidad de desplazamientos y fuerzas.

Se considera que la fuerza transmitida a través del resorte y el amortiguador viene dada por,

$$F_T(t) = ku(t) + c\dot{u}(t) \tag{3.28}$$

La solución para el caso de una fuerza de excitación armónica de la forma $F_0\cos(\omega t)$ viene dada por:

$$u(t) = Ae^{-\zeta\omega_n}\sin(\omega_d + \varphi) + C\cos(\omega t - \alpha)$$
 (3.29)

En el caso estacionario solo se toma en cuenta la parte derecha de la ecuación.

$$u(t) = C\cos(\omega t - \alpha) \tag{3.30}$$

Diferenciando con respecto al tiempo,

$$\dot{u}(t) = -\omega \mathcal{C} \sin(\omega t - \alpha) \tag{3.31}$$

Al sustituir las ecuaciones 3.29 y 3.30 en la ecuación 3.27 la magnitud de $F_T(t)$ puede ser calculada si se nota que ambos cosenos están desfasados 90 grados esto lleva a que la magnitud se calcule como,

$$F_T = \sqrt{(kC)^2 + (C\omega c)^2} = C\sqrt{K^2 + c^2\omega^2}$$
 (3.32)

El valor de la amplitud C viene dado por,

$$C = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$
 (3.33)

Donde,

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \tag{3.34}$$

Sustituyendo el valor de C en la ecuación 3.31,

$$F_T = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \sqrt{K^2 + c^2 \omega^2}$$
 (3.35)

$$F_T = \sqrt{\frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$
 (3.36)

La transmisibilidad de fuerzas viene dada por $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ es la fuerza de excitación, $\frac{c^2\omega^2}{k^2} = \frac{(2m\omega_n\zeta)^2\omega^2}{k^2} = (2\zeta)^2$ la relación de transmisibilidad TR se define como la magnitud de la fuerza transmitida y la fuerza aplicada, en algunas bibliografías se utiliza con la nomenclatura H.

$$H = \frac{F_T}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$
(3.37)

En la Figura 27 se observa la razón de transmisibilidad para distintos valores del coeficiente de amortiguamiento ζ y la relación de frecuencias r. Mientras mayor es el valor de TR mayor es el desplazamiento del sistema, Estas gráficas son útiles en el diseño de Aisladores sísmicos con el objetivo de tener un valor pequeño de TR mejor es el aislamiento y para tener esto se puede realizar un aumento de masa o una reducción de rigidez del sistema.

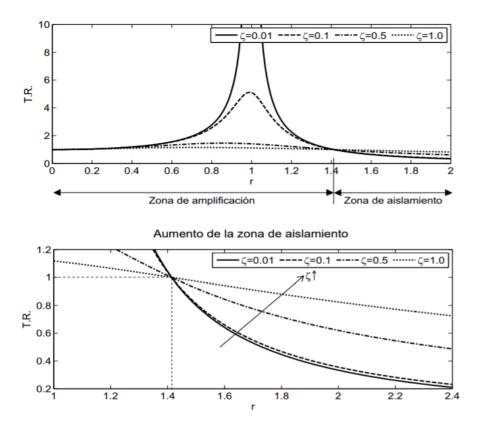


Figura 27. Razón de transmisibilidad respecto al coeficiente de amortiguamiento. Fuente: (Legrá & Quiza, 2012)

La presencia de amortiguamiento tiene gran importancia en el estudio de la respuesta transciende. A mayor amortiguamiento menor sobresalto. Para los casos de razones de frecuencias suficientemente grandes (r > 3) y amortiguamiento pequeño $\zeta < 0.2$ el valor de TR no se ve afectado por el amortiguamiento, el término $(2\zeta r)^2$ es demasiado pequeño y es usual en el diseño de aisladores sísmicos despreciar este valor en la ecuación 3.35. En este caso TR es aproximado a,

$$H = \frac{1}{r^2 - 1} \qquad (r > 3) \tag{3.38}$$

La frecuencia de excitación del sistema, en el caso de los aisladores elastoméricos estos es tomada en cuenta como resortes y dependen de su deflexión. Para aisladores de vibraciones en

términos de velocidad y de deflexión Δ se utiliza una cantidad R definida como la reducción de transmisibilidad R la cual es utilizada para cuantificar la efectividad del dispositivo de aislamiento.

$$R = 1 - H \tag{3.39}$$

Por lo que el valor de r es:

$$r = \frac{\omega}{\sqrt{k/m}} = \sqrt{\frac{2-R}{1-R}} \tag{3.40}$$

Esta última ecuación es relacionada entre la velocidad inducida y el factor de reducción y con la definición estática se utiliza para el aislamiento de vibraciones.

3.6. Resumen

Este capítulo resalta el estudio de las vibraciones mecánicas y su relación con las vibraciones sísmicas, como su clasificación según su naturaleza, su origen y el control de las mismas. Durante los terremotos es liberada energía a través de ondas sísmicas que producen vibraciones en el suelo y esta energía es transmitida a la estructura con movimientos periódicos, las vibraciones se clasifican por su tipo de movimiento sin depender de los grados de libertad a las que sean sometidas. De acuerdo a esto las vibraciones se clasifican en libres y forzadas.

Las vibraciones libres son aquellas donde un cuerpo o sistema las realiza por si solo mediante un estímulo inicial, el cuerpo ejerce movimientos periódicos que se van reduciendo hasta desaparecer, las vibraciones libres pueden ser amortiguadas o no amortiguadas, cuando un cuerpo o sistema carece de dispositivos que permitan aislar o absorber las vibraciones estas realizarán movimientos periódicos donde su amplitud se mantendrá constante. Contrariamente cuando una vibración es amortiguada esta tendrá una amplitud decreciente hasta que llega a desaparecer, dependen de un dispositivo amortiguador con una constante de amortiguamiento c dependiente del

tipo de amortiguamiento y las necesidades del sistema, la constante c es la constante de amortiguamiento, su magnitud dependerá del tipo de amortiguamiento que se implemente en el sistema, dependiendo de las necesidades del sistema.

Por otra parte las vibraciones forzadas son las que inician mediante un impulso provocado por una fuerza externa periódica con un movimiento alternante que impone una respuesta de parte del sistema, se representan mediante una ecuación diferencial homogénea de coeficientes constantes. Al igual que las vibraciones libres las vibraciones forzadas pueden ser amortiguadas o libres de amortiguamiento en el caso de las vibraciones libres de amortiguamiento estas carecerán de un dispositivo amortiguador mientras que en las vibraciones forzadas se incluye el dispositivo amortiguador y se diferencian según su el valor de su coeficiente de amortiguamiento ζ, estas vibraciones pueden ser sobreamortiguadas, críticamente amortiguadas y subamortiguadas. Dentro de estas vibraciones se puede producir un fenómeno llamado resonancia el cual consiste en el aumento desproporcionado de la amplitud de vibración y es producida en el momento que la frecuencia de la fuerza armónica que actúa sobre el sistema se iguala con la frecuencia del sistema y precisamente para evitar este tipo de fenómenos se implementan dispositivos de amortiguamiento.

La forma más efectiva de reducir o eliminar vibraciones no deseadas es modificar la causa de las mismas en el caso de los fenómenos naturales en especial los sismos eso es algo imposible para el ser humano hasta la actualidad las vibraciones producidas por fuerzas periódicas es el aislamiento de las vibraciones. Y esto se lo realiza mediante materiales con gran capacidad de amortiguamiento. El concepto de transmisibilidad de desplazamiento y fuerza es la herramienta más común para el diseño del sistema de aislamiento de vibraciones, en el caso de las estructuras

se pretende aislar la transmisión de vibraciones desde la base de la estructura. Y una de esas alternativas es la implementación de un sistema híbrido de aislamiento de base el cual tiene un aislador elastomérico que tiene a la goma como material predominante con su respectiva rigidez ya amortiguamiento, los otros componentes del sistema son aisladores friccionales planos que reducirán el movimiento de la estructura con respecto al suelo.

CAPÍTULO IV

4. PROPIEDADES Y METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICO Y FRICCIONALES

4.1. Introducción

Los aisladores elastoméricos para aplicaciones de aislamiento sísmico suelen ser de caucho, para grandes estructuras con grandes cargas verticales con placas de acero de refuerzo. El caucho es un polímero reticulado que se puede producir en numerosos compuestos con diferentes propiedades. Difiere sustancialmente de otros materiales, tiene una gran deformación elástica, un alargamiento de rotura muy grande por lo que es el material más deformable más común y es prácticamente incompresible.

El uso de dispositivos deslizantes en aplicaciones de aislamiento sísmico requiere la recolección de datos experimentales sobre las propiedades de fricción de las interfaces deslizantes en condiciones de la relevancia tanto para el servicio como para las condiciones de carga sísmica, es decir, las condiciones de movimiento a baja y alta velocidad. Además, requiere que se desarrolle una comprensión del origen de la fricción en estas superficies para que los resultados se interpreten adecuadamente. Los aspectos del comportamiento friccional que son relevantes para la interpretación de resultados experimentales a nivel macroscópico. Si bien el enfoque son las superficies PTFE-acero inoxidable, se supone que los compuestos que contienen PTFE exhiben un comportamiento similar. Las interfaces bimetálicas también se discuten.

4.2. Propiedades mecánicas del caucho natural

4.2.1. Vulcanización

La vulcanización es la conversión del caucho en bruto por medio de la reticulación química de un estado plástico a un estado esencialmente elástico (Hills, 1971). El tratamiento o procesamiento del caucho en bruto define su resistencia, elasticidad, resistencia a los solventes y su relativa insensibilidad a los cambios de temperatura.

El descubrimiento de la vulcanización por Charles Goodyear en 1839 proporciona la base de la industria moderna del caucho. Goodyear descubrió que el caucho crudo calentado con azufre dio un producto con alta elasticidad e insensibilidad al cambio de temperatura. Hoy en día, la vulcanización de los aisladores de goma se logra mediante el uso de azufre, peróxido o uretano, y la aplicación de calor y presión. Otros aditivos en el caucho producen una variedad de efectos. Los aceleradores se utilizan para acortar la duración del calentamiento o reducir el calor necesario para la vulcanización. Los rellenos se utilizan para modificar las propiedades mecánicas del producto final. El relleno más comúnmente utilizado es el negro de carbón, que modifica la dureza, la rigidez, el alargamiento a la rotura, las características de fluencia y relajación y la vida de fatiga del caucho. Los antiozonantes se usan para proteger el producto de las grietas causadas por el ataque de ozono. Los antioxidantes retrasan la degradación debido a la exposición al oxígeno y reducen los efectos del envejecimiento.

4.2.2. Propiedades mecánicas básicas del caucho natural

El caucho natural vulcanizado se caracteriza por un bajo módulo de corte, bajo módulo de elasticidad, comportamiento casi incompresible y elongación extremadamente alta en la ruptura.

Es viscoelástico efectivamente no lineal a bajos niveles de tensión y se transforma en no lineal histerético en grandes niveles de tensión. Su comportamiento es tal que no vuelve a recorrer la misma ruta al volver a cargar, pero vuelve lentamente a la forma original cuando se elimina la carga ((Staton & Roeder, 1982)). Cuando se somete a un esfuerzo de tracción uniaxial en la dirección transversal, el caucho se comporta como se observa en la Figura 28 (Brown R., 1996) El comportamiento se caracteriza por un alto módulo de elasticidad en deformaciones pequeñas, seguido por un módulo reducido en deformaciones más grandes y luego un mayor módulo en deformaciones incluso mayores. El mismo comportamiento se presenta cuando el caucho es probado en corte puro con una muestra que tiene área grande y grosor pequeño. El caucho es un máterial casi incompresible es conveniente describir el comportamiento del caucho mediante su módulo de volumen, un valor comúnmente utilizado, K, en el análisis de aisladores elastoméricos es 2000 Mpa (300 Ksi).

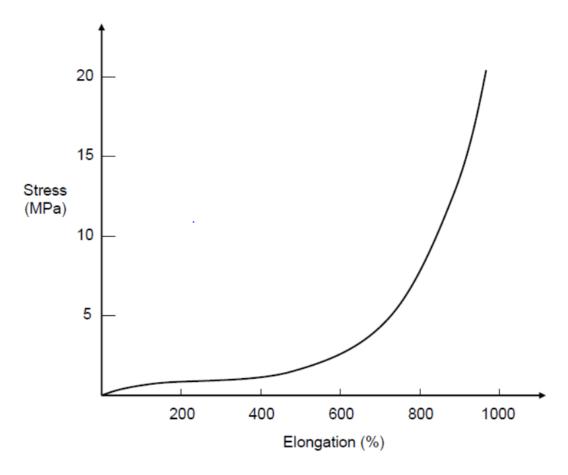


Figura 28. Ejemplo de tensión uniaxial esfuerzo-deformación para el caucho. Fuente: (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007)

El módulo de corte G como el factor de forma S son determinados de acuerdo con la norma ASTM D4014, mediante pruebas cuasiestáticas. En comparación, los aisladores elastoméricos en aplicaciones de aislamiento sísmico tienen factores de forma mayores a 10. Para un factor de forma pequeño, la muestra se somete a corte y flexión combinados de modo que el módulo de cizallamiento medido G_a es menor que el módulo de cizallamiento G obtenido de muestras con factores de forma grandes. (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007).

Otra propiedad que caracteriza al aislador de caucho es la dureza, En estados unidos esta propiedad es comúnmente medida en un Durómetro tipo Shore A mediante la norma ASTM S2240. Para esta escala el rango de dureza de 40 a 70 que es típico de los cauchos utilizados para aplicaciones de aislamiento sísmico (Brown R., 1996)

4.2.3. Construcción y fabricación de aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos consisten en capas alternas de caucho y acero como se muestra en la Figura 29. Esta figura muestra dos formas alternativas de conectar el aislador a la superestructura y por debajo de la subestructura. Los pasadores son utilizados para evitar la tensión en el aislador. Los aisladores atornillados se los utiliza actualmente por la gran capacidad de deformarse que poseen los aisladores elastoméricos. La Figura 30 muestra la construcción interna de un aislador de goma cortado por la mitad donde se observa un agujero central. Normalmente el factor de forma en los aisladores elastoméricos es mayor a 10 ya que se necesita grandes factores de forma para eliminar los esfuerzos de compresión y aumentar la capacidad de carga de pandeo.

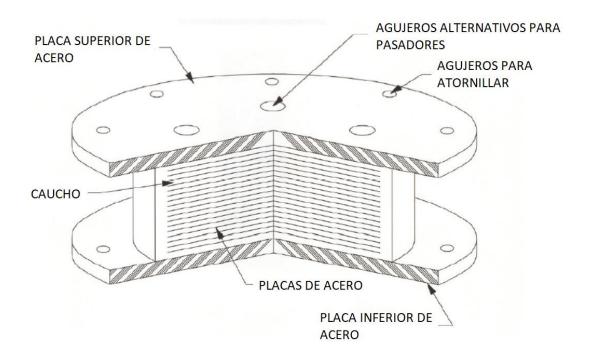


Figura 29. Esquema de un aislador elastomérico Fuente: (Naeim, Kelly , 1999)



Figura 30. Construcción interna de un aislador elastomérico Fuente: (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007)

Tabla 2 *Proceso de fabricación de los aisladores elastoméricos*

Proceso de Fabricación de Aisladores Elastoméricos		
Proceso	Descripción	
Mezcla de Caucho	Se mezcla caucho crudo, carbón, sulfuro y otros aditivos	
Laminación de la goma	El producto mezclado pasa a través de rodillos para obtener	
	láminas del espesor deseado	
Corte de la goma	Se corta la goma de acuerdo al área deseada	
Corte de los elementos de	Se cortan las placas superior e inferior, de ser necesario las	
acero	placas intermedias	
Aplicación de adhesivos	Se cubre con adhesivos las placas terminales	
Formado del aislador	Se ensambla las placas finales, las placas intermedias y una	
	cubierta de goma en caso de estar presentes estas placas	
Vulcanización	El aislador formado se coloca en un molde y sus componentes	
	se juntan bajo presión y calo, la goma se vulcaniza y se adhiere	
	al acero	
Acabado	Se pintan las placas superior e inferior	

Fuente: (C. Christopopous, A. Filiatrault., 2008)

4.3. Propiedades mecánicas de los aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos pueden ser de dos categorías: bajo amortiguamiento y alto amortiguamiento Para ambas categorías, el comportamiento en cortante bajo la acción de la carga de compresión se analiza primero. En este caso, los aisladores de goma de amortiguación baja tienen una amortiguación efectiva inferior al 10 por ciento y generalmente menos del 5 por ciento, mientras que los aisladores de caucho de alta amortiguación presentan una amortiguación efectiva del 10 por ciento o superior.

4.3.1. Rigidez efectiva

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \tag{4.1}$$

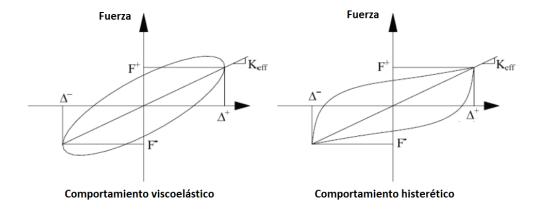


Figura 31. Definición de rigidez.

Fuente: (Naeim & Kelly, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, 1999)

4.3.2. Módulo de corte Efectivo

$$G_{eff} = \frac{K_{eff}T_r}{A_r} \tag{4.2}$$

Donde T_r es la altura total del aislador, A_r es el área sometida a corte. El módulo de corte efectivo se considera como una propiedad mecánica de la goma en las condiciones probadas y se puede utilizar para calcular la rigidez efectiva en diferentes geometrías.

4.3.3. Amortiguamiento efectivo

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{EDC}{K_{eff}(|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \right]$$
 (4.3)

Donde EDC es el área determinada por el ciclo de histéresis. Y los otros términos ya han sido definidos previamente. (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007).

4.4. Análisis de esfuerzos, deformaciones y estabilidad de los aisladores elastoméricos.

Consisten en una forma alternativa de colocar capas de acero y goma compuestos de una baja rigidez horizontal y una alta rigidez vertical. La alta rigidez vertical previene una respuesta de balanceo indeseable de una estructura aislada, reduce la tensión de cizallamiento en la goma, reduce

las deformaciones por fluencia en la goma y aumenta la capacidad de los cojinetes para transportar carga axial en grandes desplazamientos como se puede observar en la Figura 32.

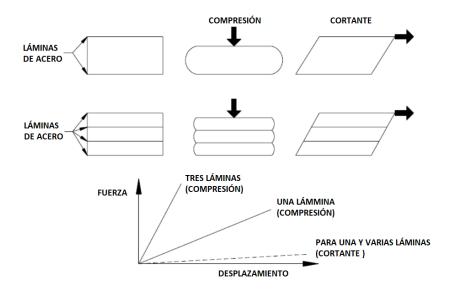


Figura 32. Comportamiento de aisladores elastoméricos a compresión y cortante Fuente: (Constantinou et al, 2007)

4.4.1. Análisis de compresión de los aisladores elastoméricos

Los aisladores de caucho sometidos a compresión presentan un comportamiento de rigidez no lineal como se muestra en la Figura 33. Una descripción analítica de este comportamiento es muy compleja e imposibilita una solución de forma cerrada que sea útil para cálculos de ingeniería. Las soluciones se desarrollaron asumiendo un comportamiento elástico lineal y deformaciones infinitesimales.

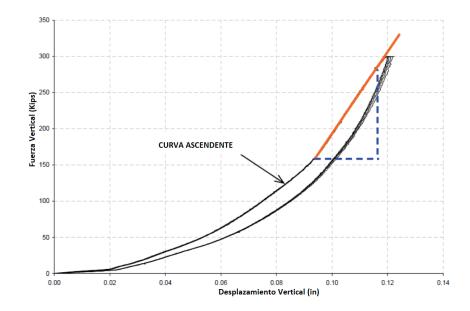


Figura 33. Representación de la relación entre la carga y desplazamiento vertical de un aislador elastomérico sometido a compresión (1 kip = 4.45 Kn, 1 In = 25.4 mm). Fuente :(M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007)

El problema básico es la compresión de una capa de caucho unida. La Figura 34 muestra la geometría de las capas unidas de varias formas y la notación de las dimensiones utilizadas en estas soluciones. Los aisladores elastoméricos reales tienen una cubierta de caucho que tiene un pequeño efecto sobre el comportamiento. Además, el aislador cilíndrico hueco representa un caso en el que se permite que el caucho sobresalga libremente en las superficies interior y exterior. Se aplica a los aisladores que tienen un orificio central utilizado en el proceso de fabricación para permitir un calentamiento uniforme, pero no se aplica a los aisladores de plomo y caucho en los que el orificio central está lleno de plomo. La Figura 35 ilustra la compresión de una sola capa de caucho constreñida por la carga P y las distribuciones resultantes de la fuerza cortante y el esfuerzo de compresión a lo largo de una sección transversal a media altura de la capa. La capa se deforma verticalmente en una cantidad Δ_c y se abulta en los costados una cantidad u_0 . La distribución del esfuerzo cortante es casi lineal con la teoría que predice una distribución lineal con un valor

máximo de Υ_c La distribución del esfuerzo de compresión es casi parabólico con un valor máximo de $\rho_{max}...$

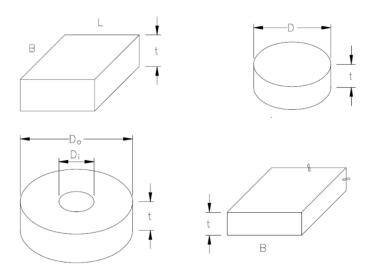


Figura 34. Representación de capas de goma individuales.

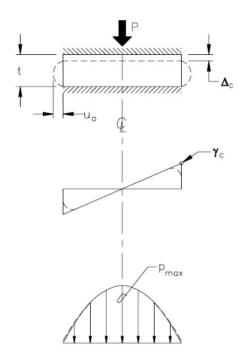


Figura 35. Compresión en una capa individual constreñida Fuente: (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007).

Se han desarrollado dos soluciones apropiadas para la solución de elastómeros sometidos a compresión, La primera solución desarrollada por (Gent & Lindley, 1959) se asume que:

- a. El caucho es incompresible
- b. La capa de caucho no está restringida (el contacto en las superficies superior e inferior es libre de fricción) de modo que al ser comprimida por la carga P se deforma uniformemente verticalmente y se expande lateralmente
- c. Las superficies superior e inferior están sujetas a tracciones de cortante y carga vertical adicional de modo que las deformaciones laterales en las superficies superior e inferior son cero y el desplazamiento vertical sigue siendo el mismo que en (b)
- d. La compresibilidad del caucho se toma en cuenta de forma empírica introduciendo el módulo de compresibilidad, K, y un factor de corrección, k, basado en resultados experimentales.
 - La segunda solución es basada en el trabajo (Chalhoub & Kelly, 1990) que asume:
- a. Todos los esfuerzos normales son iguales en cualquier punto dentro de la capa restringida por lo tanto la solución es denominada solución de presión
- b. Los esfuerzos cortantes en el plano horizontal son cero $\tau_{xy}=0$ (z como el eje vertical)
- c. Todos los esfuerzos normales son iguales a cero en las superficies laterales libres
- d. Puntos que se encuentran en una línea vertical en el material no tensionado en una parábola luego de la deformación.

Estas suposiciones conducen a una solución que envuelve solo al módulo de corte, *G*, y el módulo de compresibilidad, y las propiedades geométricas de las capas de goma. El factor de forma, *S*, es un parámetro geométrico el cual es muy importante y es definido como el área del aislador sometido a carga sobre el área de goma libre de carga que puede abultarse libremente. Para las formas de la Figura 36 el factor de forma está dado por las siguientes ecuaciones:

Tabla 3 *Ecuaciones para calcular los factores de forma de los aisladores de goma*

Factores de forma según la geometría del Aislador		
Rectangular	BL C	
	$S = \frac{1}{2(B+L)t}$	
Cuadrado	$S = \frac{B}{A}$	
	<u>4t</u>	
Laminado	$S = \frac{B}{A}$	
	<u>2t</u>	
Circular	$S = \frac{D}{\cdot \cdot}$	
	<u>4t_</u>	
Circular hueco	$S = \frac{D_e - D_i}{}$	
	<u>4t</u>	

A continuación en la Tabla 4 se presentan los resultados del esfuerzo cortante máximo, τ_c esfuerzo de compresión P_{max} , y el módulo de compresión E_c que es usado para calcular rigidez vertical y es dado por la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{Pt}{A\Delta_c} \tag{4.4}$$

Donde A es el área de la goma, t es el espesor de la capa Δ es el desplazamiento vertical de la capa de caucho y otro parámetro impuesto es la deformación vertical impuesta:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta_c}{t} \tag{4.5}$$

En la Figura 36 se puede observar los esfuerzos cortantes producidos por la compresión.

Tabla 4Expresiones del módulo de compresión, esfuerzo cortante y el máximo esfuerzo de compresión en una lámina de goma para un aislador elastomérico.

Expresiones del Módulo de Compresión, Esfuerzo Cortante y el Máximo Esfuerzo de Compresión en Una Lámina de Goma para un Aislador Elastomérico.				
Parámetro	Módulo de compresión para material incompresibl e E_c	Módulo de compresión para materiales incompresible y Modulo de abultamiento de gran tamaño E_c'	Esfuerzo cortante para material incompresibl e γ_c	Máximo esfuerzo de compresión para material incompresible P max
Aislador cuadrado	6.75 <i>GS</i> ²	N/A	$5.1S\varepsilon_c = 0.76 \frac{P}{AGS}$	$2.1\frac{P}{A}$
Aislador circular	6GS ²	$\left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K}\right)^{-1}$	$6\varepsilon_c = \frac{P}{AGS}$	$2\frac{P}{A}$
Aislador circular hueco	$4GS^2F$	$\left(\frac{1}{6GS^2F} + \frac{4}{3K}\right)^{-1}$	$6S\varepsilon_c f$	N/A
Aislador circular Solución de Gent & Lindley	$E(1+2\bar{k}S^2)$	$\left(\frac{1}{E(1+2\overline{KS^2})} + \frac{1}{K}\right)^{-1}$	$6Sarepsilon_c$	$2\frac{P}{A}$
$1.F = \frac{\left(\frac{D_o}{D_1}\right)^2 + 1}{\left(\frac{D_o}{D_1} - 1\right)^2} + \frac{1 + \frac{D_o}{D_1}}{\left(1 - \frac{D_o}{D_1}\right)\ln\left(\frac{D_o}{D_1}\right)} \qquad 2. \ \varepsilon_c = \frac{P}{AE_C},$				
3. $f = \frac{\left(\frac{D_o}{D_1}\right)^2}{\left(\frac{D_o}{D_1} - \frac{D_o}{D_1}\right)^2}$	$\frac{-\ln\left(\frac{D_o}{D_1}\right) - 1}{1\ln\left(\frac{D_o}{D_1}\right)^2} \approx$	$1 + 0.13 \left(\frac{D_o}{D_1}\right),$		

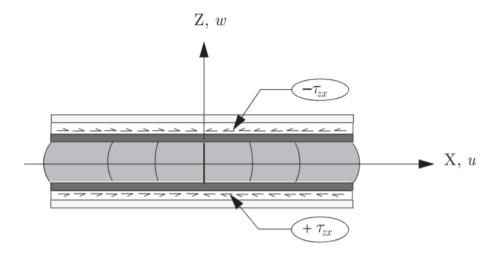


Figura 36. Esfuerzo cortante producido por la compresión Fuente: (Kelly & Constantinidis, 2011)

Se debe tomar en cuenta que a solución de Gent/Lindley resulta en expresiones del módulo de compresión que incluye el módulo de corte , G, y el módulo de elasticidad , E, Para materiales elásticos e isotrópicos que son casi incompresible E=3G. Sin embargo, las mediciones de los dos módulos indican una desviación de la isotropía, de modo que para los materiales de caucho comunes utilizados en los aisladores elastoméricos E=4G. Este método también introduce un factor de corrección, \bar{k} . El cual viene relacionado con la Dureza en escala Shore A.

Tabla 5 Valores del factor de corrección \bar{k}

Valores del Factor de Corrección \overline{k}			
Dureza del caucho (Shore A)	50	60	70
\overline{k}	0.75	0.60	0.55

4.4.2. Análisis de rotación de los aisladores elastoméricos

El análisis de rotación del aislador elastomérico tiene similitud con el análisis de compresión. La Figura 37 muestra una capa restringida de caucho sometida a rotación debido al momento *M*.

Los esfuerzos de corte resultantes en la altura media y la distribución del esfuerzo vertical se muestran en la figura. De interés en el análisis de la rotación es el cálculo del máximo esfuerzo cortante γ_r y el módulo de rotación E_r , que se define de la siguiente manera:

$$E_r = \frac{Mt}{I\theta} \tag{4.6}$$

Donde:

 θ : Ángulo de rotación

I: Momento de Inercia sobre el eje de rotación

t: Espesor de la lámina

El módulo de rotación también se puede calcular mediante la ecuación 3.4. La cual relaciona este módulo con el módulo de compresión

$$E_r = \frac{E_C}{3} \tag{4.7}$$

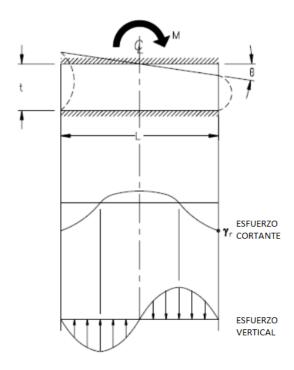


Figura 37. Rotación de una lámina de goma. Fuente: (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007)

4.4.3. Análisis de cortante en los aisladores elastoméricos

Es típico que los aisladores elastoméricos son construidos con un factor de forma de gran tamaño. La goma está sujeta principalmente a cortante en torno a su volumen, el cortante γ_s es calculado por la ecuación:

$$\gamma_s = \frac{\Delta_s}{t} \tag{4.8}$$

Donde Δ_s es la deformación lateral de la goma y t es el espesor. El aislador tomado en cuenta es de forma circular por lo que selecciono los valores del esfuerzo cortante y de rotación para un aislador de goma según la Tabla 6.

Tabla 6Expresiones para el módulo de rotación y módulo de corte para un aislador de goma

Expresiones Para el Módulo de Rotación y Modulo de Corte Para un Aislador de Goma.

Parámetro	Módulo de rotación para material incompresible E_r	Módulo de compresión para materiales incompresible y Modulo de abultamiento de gran tamaño E_r'	Esfuerzo cortante para material incompresible γ_r
Aislador circular	$2GS^2$	Solución en función de Bessel	N/A
Aislador circular Solución de Gent & Meinec	$E(1+\frac{2}{3}S^2)$	N/A	N/A

4.4.4. Estabilidad en aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos pueden ser instalados en dos configuraciones (Figura 38):

- a. Empotrados o avellanados a las placas de retención
- b. Atornillados o empernados

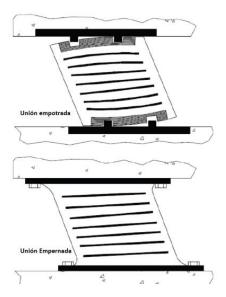


Figura 38. Representación de los diferentes tipos de uniones de aisladores elastoméricos Fuente: (Constantinou et al, 2007)

Los aisladores elastoméricos se tratan como columnas delgadas con flexibilidad de corte para el cálculo de la carga de pandeo. Kelly (1993) y (Naiem y Kelly 1999) presentaron esta teoría con el producto clave siendo la carga de pandeo de una columna la ecuación 4.9 representa la carga de pandeo de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\sqrt{G^2 A_a^2 + 4GA_s P_E} - GA_s}{2} \tag{4.9}$$

Donde A_s es el área de corte P_E es la carga de pandeo de Euler que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_E = \frac{\pi^2 E I_s}{h^2} \tag{4.10}$$

Donde E es el módulo de elasticidad, $E_r = 2.25GS^2$ I_S el momento de inercia sobre el eje de pandeo y h la longitud de la columna. La aplicación para aisladores elastoméricos requiere de varios parámetros de interpretación (Naeim & Kelly, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, 1999). Los Aisladores elastoméricos están compuestos por goma y acero, el acero o se deforma en cortante pero su altura contribuye para la esbeltez del aislador por lo que la altura y la inercia son modificadas de la siguiente manera:

$$A_s = A \frac{h}{T_r} \tag{4.11}$$

$$I_{s} = I \frac{h}{T_{r}} \tag{4.12}$$

Donde A e I son el área y momento de inercia del área unida de caucho T_r Es la suma de los espesores de caucho y h es la altura total del aislador pero sin incluir las placas externas. Para factores de forma ($S \ge 5$) El módulo de elasticidad puede también ser interpretado como el módulo de rotación ($E_r = E = 2GS^2$) y la carga de pandeo puede ser representada de diferente manera en aisladores circulares.

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD^4}{tT_r} \tag{4.13}$$

Cuando el aislador es sometido a compresión y esfuerzo cortante al mismo tiempo, la carga de pandeo viene dada por la siguiente expresión empírica:

$$P_{cr}' = P_{cr} \frac{A_r}{A} \tag{4.14}$$

En la Figura 39 se observa A_r la cual es el área de unión reducida definida como la superposición entre las áreas de elastómero unidas superior e inferior del aislador deformado. En aisladores circulares el área se calcula mediante:

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\delta - \sin \delta) \tag{4.15}$$

Y el factor δ es calculado mediante la siguiente fórmula:

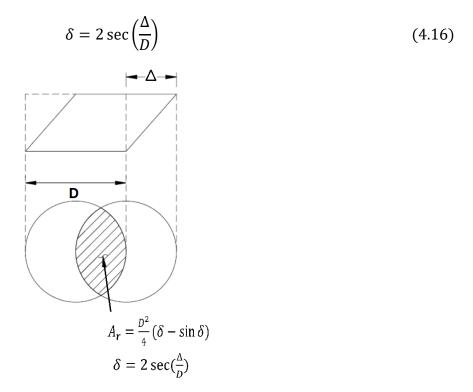


Figura 39. Área Reducida Para un Aislador Elastomérico Circular.

4.4.5. Cálculo de desplazamientos críticos

Durante una larga deformación lateral los aisladores experimentan un levantamiento parcial. En algún desplazamiento crítico D_{cr} , los aisladores tienden a volcarse, esto se ilustra en la Figura 40,

al inicio del vuelco el punto de aplicación de la carga vertical P alcanza el borde del aislador, La figura también muestra las relaciones fuerza-desplazamiento lateral del aislador que se usa para calcular el desplazamiento crítico. En la parte izquierda se observa para un desplazamiento elástico lineal que se usa para representar el comportamiento de los aisladores en término de la rigidez efectiva K_{eff} el segundo es con una histéresis bilineal con rigidez a grandes desplazamientos

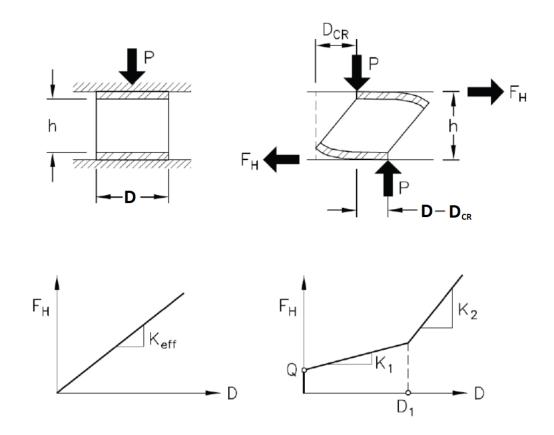


Figura 40. Volcamiento de un aislador sísmico y relación entre desplazamiento y fuerza lateral

Fuente: (Naeim & Kelly, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, 1999)

El desplazamiento crítico es calculado a partir del equilibrio:

$$F_H h = P(D - D_{cr}) \tag{4.17}$$

Donde F_H es la fuerza lateral que actúa en el aislador, P es la carga axial y D es el diámetro del aislador. El desplazamiento crítico que ocurre previo al volcamiento del aislador D_{cr} es dado por las siguientes ecuaciones basadas e4n la Figura 30.

Cuando $D_{cr} > D_1$:

$$D_{cr} = \frac{PD - Qh + (K_2 - K_1)D_1h}{K_2h + P}$$
 (4.18)

Cuando $D_{cr} < D_1$:

$$D_{cr} = \frac{PD + Qh}{K_1 h + P} \tag{4.19}$$

Si el comportamiento del aislador está representado por la rigidez efectiva:

$$D_{cr} = \frac{PD + Qh}{K_{eff}h + P} \tag{4.20}$$

4.5. Fricción en superficies deslizantes

El uso de aisladores friccionales en aplicaciones de aislamiento sísmico requiere la recolección de datos experimentales sobre las propiedades de fricción de las interfaces deslizantes en condiciones de la relevancia tanto para el servicio como para las condiciones de carga sísmica, es decir, las condiciones de movimiento a baja y alta velocidad. Además, requiere que se desarrolle una comprensión del origen de la fricción en estas interfaces para que los resultados se interpreten adecuadamente.

4.5.1. Fricción

Fricción es la resistencia de movimiento que posee un cuerpo en relación a otro, para la aplicación de esta propiedad en materiales estructurales hay que referirse a la fricción para un nivel macroscópico, opuestamente a la fricción a niveles macroscópico y atómico.

La fuerza de fricción, F en las superficies de deslizamiento es descrita por la ecuación:

$$F = \mu N \tag{4.21}$$

Donde μ es el coeficiente de fricción y N es la carga normal de la interfaz. Se debe distinguir entre el coeficiente de fricción dinámico y el coeficiente de fricción estático, es definido como la relación entre la Fuerza externa y la fuerza entre superficies al momento de iniciar el movimiento. Sin embargo, hay un valor en el uso del coeficiente de fricción que depende de los parámetros más influyentes, es decir, la velocidad de deslizamiento y la presión aparente.

4.5.2. Mecanismos básicos de fricción

Los mecanismos básicos de fricción se propusieron y estudiaron antes de lograr una comprensión de la naturaleza atómica de la fricción. El estudio de la fricción a nivel atómico, o nanotribología, es de origen muy reciente dado que las técnicas experimentales para medir la fuerza de fricción de películas de un átomo de espesor se desarrollaron en la década de 1980. La naturaleza atómica del contacto deslizante aún no se conoce. Incluso si fuera completamente conocido, los tribólogos aún no pueden predecir la fuerza de fricción a nivel atómico (Krim, 1996) . Varios mecanismos de fricción han sido propuestos en los últimos años. Se cree que todos estos mecanismos contribuyen en la generación de fricción en diversos grados dependiendo de la situación particular. Estos mecanismos se describen a continuación.

4.5.2.1. Adhesión

Cuando dos materiales sólidos limpios entran en contacto forman enlaces íntimos atómicos a través de la interfaz de contacto. Estas regiones de contacto se llaman uniones, y la suma de las áreas de todas las uniones constituye el área de contacto real (o verdadero). En comparación con el área de contacto aparente, el área real de contacto es muy pequeña (Figura 41). Las uniones se caracterizan por fuerzas interfaciales causadas por la adhesión. Es decir, la fuerza de fricción está dada por el producto del área real de contacto A_r , y la resistencia al corte de las uniones s:

$$F_a = sA_r (4.22)$$

La adherencia entre las interfaces deslizantes es dominante para superficies muy limpias en un alto vacío. Ahora se reconoce generalmente que la adhesión no contribuye claramente componente separado de fricción. Por el contrario, se cree que es un componente de la deformación de asperezas en las superficies deslizantes.

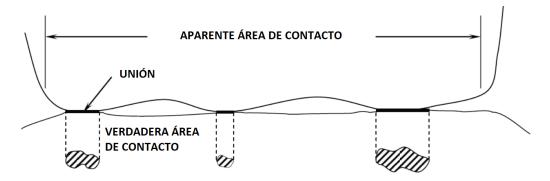


Figura 41. Ilustración de las áreas de contacto aparente y real. Fuente: (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007)

4.5.2.2. Arado

Las superficies se caracterizan por asperezas. Cuando están en contacto, estas asperezas sufren deformaciones elásticas y plásticas. El componente de arado de la fricción se debe a la disipación de energía durante la deformación plástica. Esto se explica mejor considerando una aspereza esférica dura sobre una superficie plana más suave. Al aplicar la carga axial sobre la aspereza, la superficie más blanda que se encuentra debajo rinde, se forman empalmes y la aspereza se adhiere a la superficie inferior. En la aplicación de una fuerza cortante, la aspereza se mueve horizontalmente, empujando una pared de material más suave en su camino y creando una ranura. El componente de arado de la fricción resulta del esfuerzo de empujar la pared del material.

4.5.2.3. Efectos Viscoelásticos

Los polímeros, como el PTFE, exhiben un comportamiento viscoelástico. A medida que las asperezas de un material más duro se deslizan sobre un material viscoelástico, la energía se disipa debido a la deformación viscoelástica, lo que contribuye a un componente adicional de la fricción. En general, se cree que varios mecanismos contribuyen a la fricción. Se supone que la adhesión y las deformaciones mecánicas son responsables colectivamente de la fricción. Además, reconoceremos que el área real de contacto es de suma importancia en la descripción cualitativa de la fricción a escala macroscópica.

4.5.3. Fricción estática y cinética

La fricción estática es la fuerza máxima que se debe superar para iniciar el movimiento macroscópico. Es la fuerza de fricción disidente. Al iniciarse el movimiento, la fuerza de fricción generalmente cae, es decir, la fricción estática es típicamente más alta que la fuerza de fricción

deslizante, esta última se mide a una velocidad de deslizamiento muy baja, inmediatamente después del inicio del movimiento. La Figura 42 muestra un resultado obtenido de la prueba de un aislador deslizante que consiste en PTFE sin llenar en contacto con una superficie de acero inoxidable. . (Kelly & Constantinidis, 2011) . Donde La diferencia entre los valores estáticos y deslizantes del coeficiente de fricción resultó evidente.

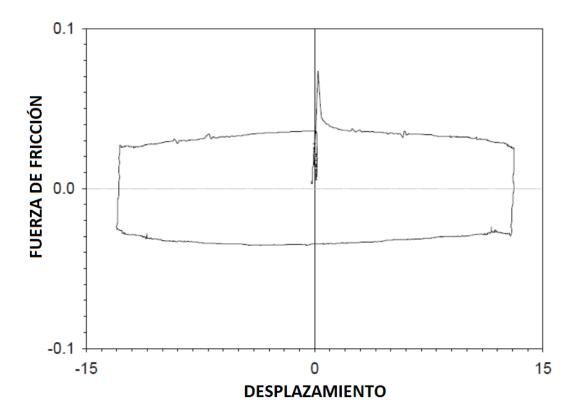


Figura 42. Curva fuerza desplazamiento entre superficies de PTFE y acero inoxidable. Fuente (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007):

La fricción estática es real pero también puede ser un producto de la técnica experimental empleado o el sistema de medición utilizado. La técnica experimental implica un sistema en el que se impone el movimiento en un experimento controlado por desplazamiento: el movimiento es una onda sinusoidal. En cualquier caso, la iniciación del movimiento requiere un cambio abrupto de velocidad de cero a un valor alto dentro de un tiempo extremadamente corto. Esta situación no es

realista dado que en aplicaciones reales el movimiento se inicia en condiciones esencialmente estáticas. Es decir, aunque existe fricción de separación, no tiene ningún efecto mensurable porque el valor de fricción de deslizamiento es mucho mayor a las velocidades obtenidas en condiciones sísmicas. El concepto de fricción estática no tiene sentido cuando la fricción deslizante exhibe un aumento sustancial al aumentar la velocidad de deslizamiento (Rabinowicz, 1995). Es importante medir la fricción de separación en condiciones cuasi-estáticas. El origen de la diferencia entre fricción estática y dinámica puede explicarse por la presunción de una caída rápida en el área real de contacto o la fuerza de las uniones después del inicio del deslizamiento. En el caso del PTFE, esto es causado probablemente por la transferencia de una película muy delgada de PTFE en la placa de acero inoxidable

4.5.4. Comportamiento Stick-Slip (Adhesión-Deslizamiento)

A veces se produce un movimiento brusco cuando un objeto se desliza sobre otro. En la prueba controlada por desplazamiento de un cojinete deslizante, el comportamiento Stick-Slip se manifiesta como una variación en la fuerza de fricción registrada frente al tiempo.

Es un fenómeno típico en sistemas de fricción se trata de que la fuerza de fricción estática es más grande en algunos instantes que la fuerza aplicada, cuando se aplica una mayor fuerza la masa comienza a deslizarse con una fuerza de fricción reducida.

El ejemplo más común que se puede mencionar de este movimiento es cuando se emplea una cuerda para arrastrar una caja, en un comienzo la cuerda no ejerce ninguna fuerza sobre la caja pero a medida de que se emplee una fuerza la cuerda se alargará y aumentará la fuerza sobre la caja móvil hasta que dicha fuerza alcance un valor el cual es determinado por el coeficiente estático de

rozamiento y se inicia el movimiento en la caja, este movimiento consiste en dos fases en la primera se toma en cuenta una caja en reposo y la energía externa que se transmite se almacena en la cuerda como energía elástica. La segunda la caja se desliza y genera energía cinética y reduce su velocidad hasta comenzar un nuevo ciclo como se puede ver en la Figura 43.

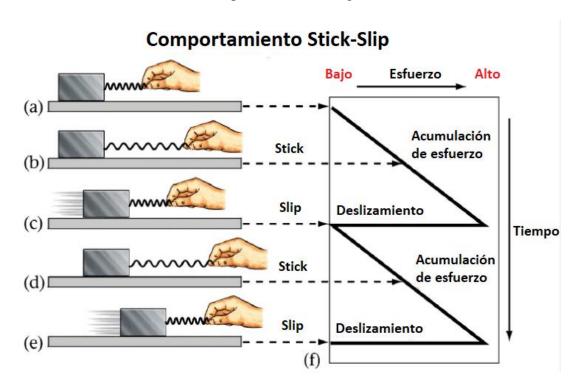


Figura 43. Ilustración de un ejemplo básico del comportamiento Stick-Slip. Fuente: (docsity.com, 2018)

4.5.5. Fricción entre superficies de acero inoxidable pulido y PTFE

Este tipo de interfaces de deslizamiento es la más utilizada en los dispositivos de aislamiento sísmico friccionales. La Figura 44 ilustra las dependencias del coeficiente de fricción en la velocidad de deslizamiento y carga normal. El comportamiento es característico de superficies limpias sin lubricación a temperatura ambiente normal (~ 20 ° C). El valor estático se muestra a

velocidad cero de deslizamiento. El valor de deslizamiento se caracteriza por un valor bajo inmediatamente después del inicio del deslizamiento f_{min} y un valor progresivamente creciente a medida que aumenta la velocidad. A grandes velocidades, el valor de deslizamiento alcanza un valor constante, f_{max} . Los aumentos en la carga normal dan como resultado la reducción del coeficiente de fricción; la tasa de porcentaje a la cual f_{max} reduce disminuye a algún valor límite de la carga normal. Debe observarse que el comportamiento ilustrado se obtiene al probar los dispositivos de deslizamiento bajo desplazamiento de armónicos cíclicos y que las mediciones de la fricción de deslizamiento se obtienen dentro del primer ciclo en el primer instante en el que se alcanza la velocidad de deslizamiento máxima. Se sabe que la fricción de deslizamiento disminuye con el aumento del número de ciclos como resultado del calentamiento de la Superficie.

Al discutir este comportamiento, es importante tener en cuenta que (a) el PTFE tiene forma de hoja grande (típicamente más grande que 250 mm de diámetro) con un pequeño espesor (confinado dentro de un hueco y proyectando aproximadamente 2 mm) y comprimido por un tamaño de placa más grande de acero inoxidable, (b) el acero inoxidable está altamente pulido con una rugosidad superficial de 45 aproximadamente 0,05 µm en la escala de promedio aritmético, y (c) el PTFE es muy suave en comparación con el acero. Suponemos que la superficie de PTFE está cubierta por asperezas que, al aplicar la carga normal, se deforman para formar uniones con el acero inoxidable. Debido a la naturaleza muy suave del PTFE, el área de contacto real será grande en comparación al contacto metal-metal, el área real de contacto es mucho más pequeña que el área aparente.

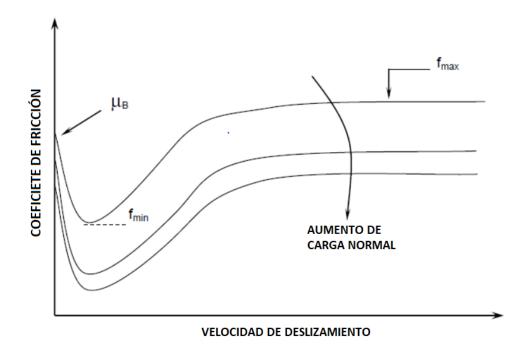


Figura 44. Dependencia del coeficiente de fricción de la superficie de acero inoxidable pulido con PTFE sobre la velocidad de deslizamiento y la carga normal.

Fuente: (Rabinowicz, 1995)

La fricción en esta interfaz es principalmente el resultado de la adhesión. Mientras que en los polímeros la tendencia es a cortarse en su volumen, el PTFE es una de las pocas excepciones marcadas en las que el deslizamiento ocurre realmente entre las superficies (Tabor, 1981). Como se mencionó anteriormente:

$$F = sA_r (4.23)$$

Donde *s* es la fuerza cortante de la interfaz. Para una primera aproximación, la resistencia al corte es una función lineal de la presión real (presión sobre el área real de contacto)

$$s = s_o + \alpha p_r \tag{4.24}$$

El coeficiente de fricción es

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{(s_o + \alpha p_r)A_r}{p_r A_r} = \frac{s_o}{p_r} + \alpha$$
 (4.25)

Se utilizan los resultados del área real de contacto. Asumiendo una deformación de asperidades el área real de contacto es proporcional a cierta potencia $\eta < 1$ de la carga normal N:

$$A_r = KN^{\eta} \tag{4.26}$$

A medida que aumenta la carga, la deformación puede ser principalmente de plástico y el área real de contacto será.

$$A_r = \frac{N}{p} \tag{4.27}$$

Donde *p* es la resistencia del PTFE al flujo de plástico en la compresión masiva. Si se produce deformación plástica, la presión real (= p) permanece constante y el área real de contacto aumenta en proporción a la carga normal. Por lo tanto, considerando solo la deformación elástica y plástica de las asperezas de PTFE es posible explicar la reducción en el coeficiente de fricción con el aumento de la carga normal y el logro eventual de un valor casi constante. La Figura 45 ilustra la variación del área real de contacto, la presión de contacto y el coeficiente de fricción con la carga normal según lo determinado por (4.24) a (4.26).

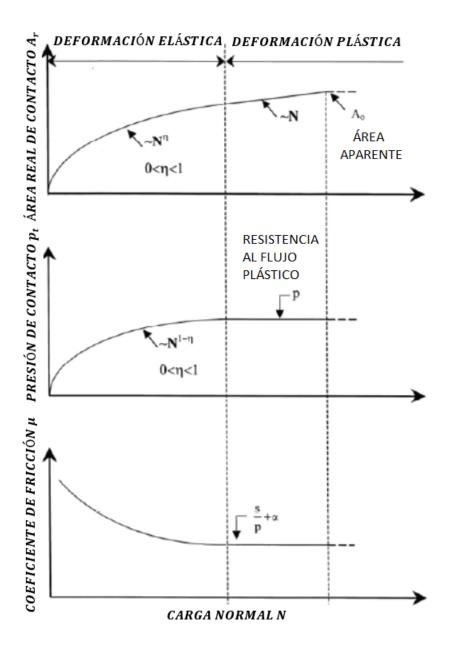


Figura 45. Variación del área real de contacto, presión en el área de contacto y coeficiente de fricción con una carga normal creciente.

Fuente: (Naeim & Kelly, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, 1999)

Sin embargo se encuentra una serie de argumentos en contra de esta teoría:

a. La superficie de acero inoxidable altamente pulido y un material blando hace que las condiciones sean ideales

- b. El PTFE se encuentra en condiciones de compresión hidrostática, lo que debe aumentar la resistencia al flujo de plástico en compresión.
- c. El PTFE tiene un comportamiento viscoelástico con un área real creciente con el tiempo.
 (Rabinowicz, 1995)

4.6. Propiedades friccionales de las interfaces de acero inoxidable pulido y PTFE.

Es una práctica común mantener la carga en los aisladores de PTFE durante algún tiempo antes de imponer el deslizamiento. Primero se utilizó una carga de 12 horas con un requisito de demora desconocido (Campbell & Kong, 1987) La duración de la carga de 12 horas es requerida por las Especificaciones Estándar AASHTO (Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte, 1992). Estas pruebas de duración de carga se realizaron en interfaces que consisten en material Glacier DZ (PTFE) puro en contacto con acero inoxidable pulido de rugosidad superficial de aproximadamente 0,05 a 0,10 µm en la escala de media aritmética, y a una presión aparente de 28 MPa. Se informa que los períodos de carga de hasta 24 horas tienen un efecto sobre las propiedades, pero no se informó el alcance del efecto. Observamos que la rugosidad superficial del acero inoxidable en estas pruebas es aproximadamente el doble que la utilizada en las pruebas en la Universidad de Queen y en la Universidad de Buffalo.

Los factores de los cuales depende el coeficiente de fricción son:

- Tipo de PTFE
- Lubricación
- Tamaño de la muestra

- Fijación del PTFE a la placa de respaldo
- Rugosidad de la superficie de contacto
- Presión de contacto
- Velocidad de movimiento
- Longitud de desplazamiento
- Historial de carga y desplazamiento
- Contaminación superficial
- Arrastramiento
- Temperatura

En la universidad de Buffalo se ha llevado a cabo una serie de pruebas para evaluar el efecto de la duración de la carga en fricción estática de los aisladores con PTFE con resultados de fricción casi idéntica luego de 30 minutos y de 594 días de permanencia de la carga estática el dispositivo de prueba que se utilizó en la universidad e Buffalo el dispositivo de prueba de la Figura 46 y muestras de PTFE sin rellenar de 95 mm de diámetro en contacto con acero inoxidable pulido (ASTM A240, Tipo 304) de rugosidad superficial igual a 0,03 µm en la escala promedio.

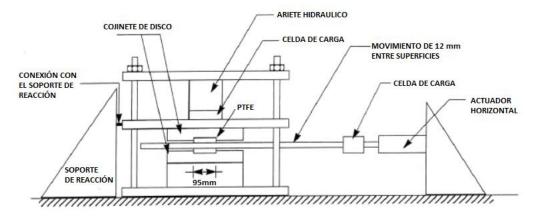


Figura 46. Maquina de pruebas utilizada en dispositivos de fricción. Fuente: (M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz, 2007)

(ASME, 1985). La prueba se realizó a una presión aparente de 6,9 MPa usando tres muestras y a una presión aparente de 20,7 MPa utilizando una muestra. La temperatura ambiente durante la prueba fue de aproximadamente 20 °C y la humedad relativa estaba en el rango de 25 a 30 por ciento. El movimiento lateral en las interfaces probadas se impuso como una onda sinusoidal de frecuencia de 0,0318 Hz y una amplitud de 12,5 mm, de modo que la velocidad máxima de deslizamiento fue de 2,5 mm/s. La Tabla 6 presenta los resultados para la presión aparente de 6.9 MPa. El primer espécimen se cargó durante 0,2 horas y luego se impuso el movimiento lateral. La muestra se mantuvo bajo carga durante otra hora y la prueba se repitió. Este proceso se repitió siete veces para un tiempo de carga acumulado de 167.0 horas. Posteriormente, se probaron nuevas pruebas como se presenta en la Tabla 7. Los resultados de la prueba demuestran que para especímenes nuevos la duración de la carga en el rango de 0.2 a 118.4 horas da como resultado valores de fricción estáticos que no se ven afectados por el tiempo de carga. Hay, por supuesto, cierta variabilidad en los resultados obtenidos, pero no hay un aumento sistémico en la fricción estática con el aumento de la carga de permanencia, sino que se observa lo contrario.

Tabla 7:Resultados de la prueba sobre el efecto de la permanencia de la carga en la fricción estática del PTFE sin llenar en contacto con acero inoxidable pulido a una presión aparente de 6,9 MPa.

Probeta	Tiempo acumulativo de carga (hrs)	Coeficiente de fricción estático
	0.2	0.116
1	1.2	0.056
	6.5	0.050
	19.7	0.052
	45.9	0.062
	167.0	0.066
2	118.4	0.095
	128.9	0.031
	153.3	0.073
3	0.3	0.092

(Campbell & Kong, 1987)

La fricción es menor en las pruebas posteriores a la primera prueba. Posteriormente, la muestra se descargó y se dejó que se relajara durante la noche. Sin limpiar la interfaz, la muestra se volvió a cargar durante 24,2 horas y se volvió a probar; se registró una fricción estática más alta con un valor cercano al obtenido en la primera prueba. La muestra se descargó luego, se limpió de la película de PTFE depositada en el control deslizante y se dejó que se relajara durante la noche. Fue recargado durante 50.2 horas y probado nuevamente. El coeficiente de fricción estático medido fue más alto (= 0.073) que en la primera prueba en una espera de carga de 0.2 horas (= 0.057).

4.6.1. Efecto de temperatura

La Tabla 7 presenta los resultados de (Campbell et al. 1991) El parámetro f_{min} es el coeficiente de fricción deslizante en el primer ciclo de movimiento. Todas las pruebas se realizaron a una velocidad de deslizamiento máxima de 1 mm / s. La temperatura tiene un efecto sustancial en la fuga y los coeficientes de baja velocidad de fricción deslizante

Tabla 8: Efecto de la temperatura en la ruptura y el coeficiente de fricción deslizante (v = 1 mm/s) de PTFE sin llenar en contacto con acero inoxidable altamente pulido a una presión aparente de 20.7 MPa.

Temperatura °C	Coeficiente de fricción estático	Coeficiente de fricción dinámico (1mm/s)
20	0.066	0.016
10	0.125	0.016
0	0.132	0.020
-10	0.149	0.039
-15	0.154	0.057
-20	0.136	0.074
-25	0.157	0.086

Fuente (Campbell et al., 1991).

4.7. Factores relevantes para el diseño de los aisladores de fricción de superficie plana.

El uso de un aislador de superficie deslizante plana no es muy común ya que por sí solo no proporciona restitución a la superestructura y se continuará un movimiento en la misma dirección que ocurren las réplicas de un terremoto, por aquello la idea de un sistema híbrido haciendo un trabajo en conjunto entre los aisladores de fricción y el elastomérico. La fuerza que el aislador necesita para iniciar el movimiento es menor que la fuerza que se necesita para mantenerse en movimiento a cierta velocidad. La curva de Histéresis para estos aisladores es con pendientes constantes solo depende de la fuerza y del desplazamiento (Figura 47).

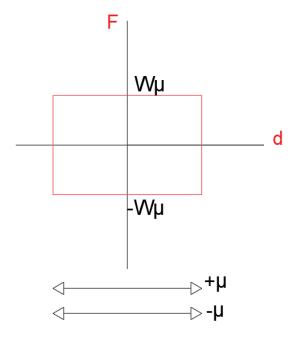


Figura 47. Ciclo de histéresis de un aislador de deslizamiento plano

Este aislador consta de una interfaz de deslizamiento entre superficies de acero inoxidable y PTFE (teflón) y los dos materiales son sujetos a placas base que conectan el sistema con la subestructura y la superestructura como se indica en la Figura 48.

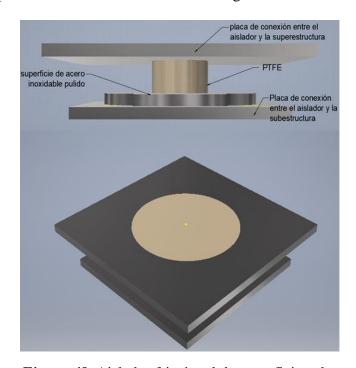


Figura 48. Aislador friccional de superficies planas.

El coeficiente de fricción es descrito por la ecuación:

$$\mu_{s} = f_{max} - (f_{max} - f_{min})e^{a|\dot{U}|} \tag{4.28}$$

Donde f_{max} y f_{min} son los coeficientes de fricción máximos y mínimos respectivamente, específicamente a velocidad 0 y a velocidades superiores, a es un valor que depende de la presión del aislador, este parámetro tiene valores de 20 a 30 mm/s y para PTFE sin relleno, y 100 mm/s para PTFE compuesto como se ilustra en la Figura 49.

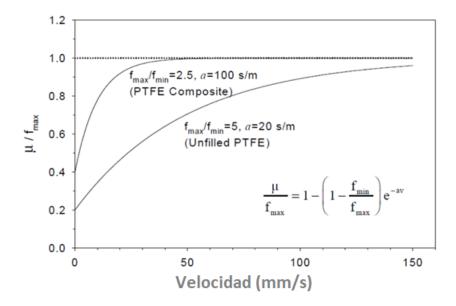


Figura 49. Efecto del parámetro *a* en la variación del coeficiente de fricción con velocidad. Fuente: (Constantinou et al, 1991)

La fuerza que se ejerce sobre un aislador friccional de superficie plana viene descrita por la ecuación:

$$F(t) = \mu W sgn(\dot{u}) \tag{4.29}$$

Donde:

W: Fuerzas verticales totales

μ:Coeficiente de fricción

$$sgn(\dot{u}) = \begin{cases} -1 & \dot{u} < 0 \\ +1 & \dot{u} > 0 \\ 0 & \dot{u} = 0 \end{cases}$$

(Symans, 2010).

4.8. Resumen

En este capítulo se estudiaron las propiedades mecánicas de los dos tipos de aisladores que componen el sistema híbrido de aislamiento de base.

Para conocer las propiedades del aislador elastomérico primero se debe conocer el material base del cual está compuesto, este material es el caucho el cual tiene características mecánicas con propiedades ideales para dispositivos de aislamiento sísmico, una propiedad esencial es la rigidez efectiva que determina cuanto se deforma el material según la fuerza que se aplique al mismo. Para aislamiento sísmico es importante conocer el Mócalo de corte G ya que los aisladores trabajan bajo este tipo de esfuerzo, este depende de la altura, el área efectiva y la constante de rigidez del material. Para el diseño de estos aisladores se estudian 3 casos: rotación, compresión y cortante también es importante proporcionar una buena estabilidad y calcular el desplazamiento crítico que ejercerán ante una fuerza externa.

En el caso de los aisladores friccionales es importante conocer el coeficiente de fricción entre las superficies deslizantes de acuerdo a estudios experimentales se ha determinado que la interfaz más adecuada para este tipo de aplicaciones es la interacción entre superficies de acero inoxidable pulido y PTFE (Politetrafluoroetileno) o comúnmente conocido como teflón, se debe conocer la diferencia entre los coeficientes de fricción estático y dinámico el primero es mayor el cual se da para que un elemento inicie el movimiento el coeficiente dinámico es el cual se aplica cuando el elemento se encuentra ya en movimiento. Los factores que modifican este coeficiente son: la velocidad de movimiento, la presión, la temperatura y la rugosidad de las superficies.

CAPÍTULO V

5. DETERMINACIÓN DE CARGAS Y PROPIEDADES DEL SISTEMA

5.1. Introducción

Una casa unifamiliar fue seleccionada para la posible implementación del Sistema Híbrido de Aislamiento de Base (SHAB), que consta de bloques de aisladores elastómericos y friccionales. El objetivo principal de este sistema es aislar esta vivienda y reducir las demandas existentes, modificando el período fundamental de la estructura en el rango donde las aceleraciones son menores que en una estructura convencional. Para investigar el comportamiento se iniciará determinado la carga sísmica y la distribución de los dos tipos de aisladores seleccionados.

Se debe realizar un pre dimensionamiento del sistema, seleccionar el número adecuado de aisladores y las propiedades mecánicas de los sistemas tanto elastómeros como friccionales. (Fujita, 1991)

5.2.Determinación de la metodología para determinar la configuración del sistema SHAB

Con la finalidad de determinar el número de aisladores elastómeros (AEH) y friccionales (AFH) que son requeridos en el sistema propuesto, se seguirá el siguiente procedimiento:

Paso 1: El peso del caso de estudio se resume en la Tabla 12, la misma describe los valores de acuerdo a la NEC-15 que también estima las combinaciones más desfavorables que puede tener una estructura. Estas estimaciones deben ser basadas en lo estipulado por la especificación (VIVIENDAS DE HASTA 2 PISOS CON LUCESDE HASTA 5 m de la norma). Las cargas se

clasifican de acuerdo a su naturaleza y duración de aplicación. Se les denomina Cargas muertas, Cargas vivas y cargas ambientales.

Paso 2: Se selecciona el período objetivo con la finalidad de tener demandas inferiores en el espectro de aceleraciones 0.4 g

Paso 3: El óptimo número de aisladores fricciones y elastómericos está determinado por la planta de la vivienda caso de estudio, peso sísmico, propiedades mecánicas del sistema (Rigidez y amortiguamiento)

Paso 4: La rigidez efectiva del sistema $(\sum k_{heff})$ es calculada en base a la siguiente ecuacion considerando un periodo deseado (T_{heff}) del caso de estudio:

$$\sum k_{ehff} = \frac{4\pi^2 W_t}{g T_{heff}^2} \tag{5.1}$$

Donde:

- W_t = Peso sísmico total.
- g = Aceleración de la gravedad.

La carga sísmica de la vivienda caso de estudio se resume en la Tabla 11.

Los cálculos serán indicados una vez se determine el periodo objeto y algunas consideraciones adicionales.

5.3. Carga sísmica del caso de estudio

5.3.1. Descripción general del caso de estudio

Se selecciona una vivienda unifamiliar de 36 metros cuadrados tomando como guía el apéndice 1 de la NEC-15 (VIVIENDAS DE HASTA DOS PISOS CON LUCES DE HASTA 5 METROS) como se muestra en la Figura 50.



Figura 50. Vivienda unifamiliar de 36 metros cuadrados Fuente: (*NEC-SE-*VIVIENDA, *2015*)

Se propone una vivienda con dos dormitorios, un baño, sala comedor y cocina construida con acero estructural y cubierta liviana con 9 columnas ubicadas cada tres metros, 24 vigas principales para la base y la cubierta. Su arquitectura se obtuvo de la NEC-SE-VIVIENDA (Figura 51).

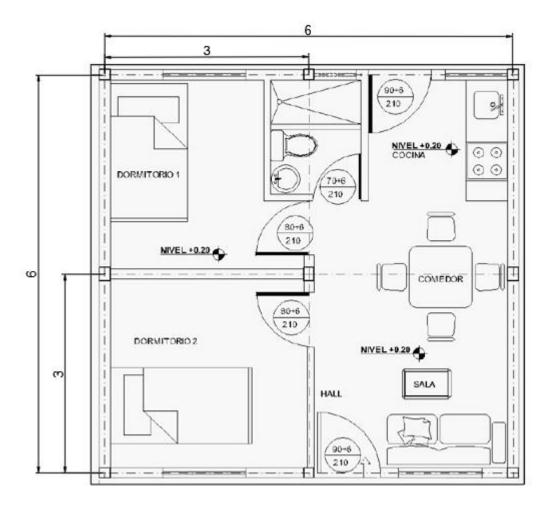


Figura 51. Arquitectura de vivienda unifamiliar de 36 metros cuadrados. Fuente: (NEC-SE-VIVIENDA, 2015)

5.3.2. Determinación de cargas

5.3.2.1. Cargas muertas

Son cargas que permanecen fijas en un mismo lugar y su magnitud es constante se puede considerar como carga muerta al peso propio de la estructura, los muros, el techo, la plomería y los accesorios la Tabla 9 es un resumen del Apéndice 4 de la NEC-SE-CG, muestra los valores de los pesos de materiales de uso frecuente .

Tabla 9Cargas muertas típicas comunes para edificios

Cargas Muertas Típicas Comunes Para Edificios (NEC-S	E-CG, 2015)
Elemento	Peso específico (kN/ m ³)
Piedras artificiales	
Hormigón simple	22
Hormigón armado	24
Ladrillo cerámico prensado (0 a10% de huecos	19
Metales	
Acero	78.5
Contrapisos y recubrimientos	
Contrapiso de hormigón ligero simple por cada cm, de espesor	0.16
Contrapeso de hormigón simple, por cada cm de espesor	0.22
Cielosrrasos y cubiertas	
Plancha ondulada de fibrocemento de 8 mm de espesor	0.20
Plancha ondulada de fibrocemento de 6 mm de espesor	0.15
Chapa ondulada de acero galvanizado de 0.5 mm de espesor	0.07
Chapa ondulada de acero galvanizado de 0.8 mm de espesor	0.09

Se selecciona los objetos que serán parte de la estructura, paredes, piso y techo de acuerdo a las dimensiones establecidas. La parte estructural se pretende realizar con perfiles estructurales de acero como se observa en la Figura 52 y las cargas muertas estimadas se indican en la Tabla 9.

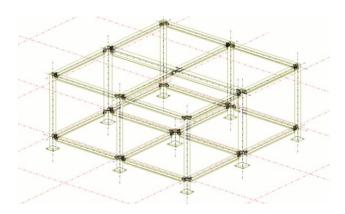


Figura 52. Esquema estructural de la vivienda unifamiliar

Tabla 10:Cargas muertas estimadas en la vivienda unifamiliar

	CARGAS	MUERTAS	
EL	EMENTOS E	STRUCTURALES	
		Área (cm2)	0,003
		peso específico (kN/m3)	76,9
Vigas	$HSS4X5\frac{3}{4}X1/4$	Longitud (m)	3
v igus	42174	Peso unidad (kN)	0,69
		Número	24,00
		Total	16,61
		Área	0,003
		peso específico (kN/m3)	76,92
Columnas	HSS4X4X1/4	Longitud (m)	2,40
Columnas	110042142114	Peso unidad (kN)	0,55
		Número	9,00
		Total	4,98
		Área	0,003
		peso específico (kN/m3)	76,92
igas secundarias	HSS3X5 ³ / ₄ X3/8	Longitud (m)	3,00
vigas seculidarias		Peso unidad (kN)	0,58
		Número	16,00
		Total	9,23
	TOTAL (kN	V)	30,83
	TE	СНО	
		peso específico (kN/m3)	0,2
Cielo raso colga	nto (ka/m²)	Área	36,0
Cicio i aso coiga.	iite (kg/iii3)	Espesor (m)	0,02
		Total	0,14
		Espesor (m)	0,002
Cubianta matáli	aa (laa/m2)	peso específico (kN/m3)	27,0
Cubierta metáli	ca (kg/m3)	Área de cubierta (m2)	36,0
		Total	1,9
	MUROS I	DIVISORIOS	
		peso específico (kN/m3)	0,62
		Espesor (m)	0,1
Muros divisori	os (kg/m3)	Altura	2,4
		Longitud (m)	30,0
		Total	4,5
	P	ISO	
		cemento (kN/m3)	22
T _		Área (m2)	36
Losa		Espesor	0,18
		Total	142,56
<u> </u>	TOTAL (kN	n	179,80

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

$$WD = 180 \ kN$$

5.3.2.2.Cargas vivas

Son las cuales pueden cambiar de lugar y de magnitud. Se mueven bajo su propio impulso o impulso externo, se denominan cargas móviles. Los valores de las cargas de piso varían de ciudad a ciudad estos valores se estima mediante un peso sobre una unidad de área. En la Tabla 10 se listan algunos de los valores más comunes para cargas de piso.

Tabla 11:Cargas vivas uniformes mínimas comunes para el diseño de edificios

Tipos de edificios	Carga viva (kN/m²)
Almacenes	
Venta al por menor	
Primer Peso Sísmico del Caso de Estudio piso	4.80
Pisos superiores	3.60
Venta al por mayor. Todos los pisos	6.00
Áreas de reunión y teatros	
Vestíbulos	100
Oficinas	50
Asientos fijos	2.90
Áreas de recepción	4.80
Asiento móviles Plataformas de reunión	4.80
Escenarios	7.20
Escuelas	
Salones de clase	2
Corredores en primer nivel	4.80
Corredores en pisos superiores	4
Bodegas	
Material ligero	125
Material pesado	250
Residencias	
Viviendas unifamiliares y bifamiliares	2
Hoteles y residencias multifamiliares	2
Salones de uso público y corredores	4.8

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

Se estima la carga viva para habitaciones lo que se puede calcular:

$$L = 2 \frac{KN}{m^2} \times 36m^2 = 72 \ kN$$

5.3.2.3. Cálculo de la carga sísmica reactiva W

Se utiliza la siguiente carga para el análisis (NEC-SE-DS, 2015):

$$W = D + 0.5L = 180 KN + 0.5(72)kN = 216 kN$$

Tabla 12: Peso sísmico del caso de estudio

Peso Sísmico del Caso de Estudio							
Carga Muerta (kN/m²)	Carga Viva (kN/m²)	Peso Sísmico Efectivo (kN/m²)	Peso Sísmico Total (kN)				
Cargas muertas: pesos de los materiales (NEC-SE-CG, 2015)	Cargas vivas uniformes mínimas para el diseño de edificios (NEC-SE- CG, 2015)	La Carga sísmica donde se incluye el 100% de la carga muerta y el 50% de la carga viva	Peso Sísmico Total =B(6m) x L(6m) x 5.00				
5 KN/ m ²	2.0 kN/m^2	$W_{m2}\!=6~kN/m^2$	$W_t = 216 \text{ kN}$				

5.4. Determinación del período objetivo y desplazamiento del caso de estudio

"El Ecuador se divide en seis zonas sísmicas, caracterizada por el valor del factor de zona Z. Todo el territorio ecuatoriano está catalogado como de amenaza sísmica alta, con excepción del nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia y del litoral ecuatoriano que presenta una amenaza sísmica muy alta" (NEC-SE-DS, 2015). La primera condición es el factor de zona sísmica para la estructura, la estructura debe ser diseñada para resistir los desplazamientos laterales.

5.4.1. Zonificación sísmica y factor de zona Z

Una estructura sísmica es caracterizada por desplazamientos, velocidades y aceleraciones y su elevación. Se debe analizar la zona sísmica en el Ecuador donde se construirá la estructura: El

factor de Zona Z y las curvas de peligro sísmico, el tipo de uso e importancia de la estructura. La resistencia mínima de diseño debe basase en las fuerzas sísmicas de diseño.

Para los edificios de uso normal se utiliza el valor Z el cual representa la máxima aceleración en roca para el diseño. Y se expresa como fracción de la aceleración de la gravedad. El Ecuador tiene 6 zonas sísmicas cada una caracterizada por el factor de zona Z de acuerdo al mapa de la Figura 53.

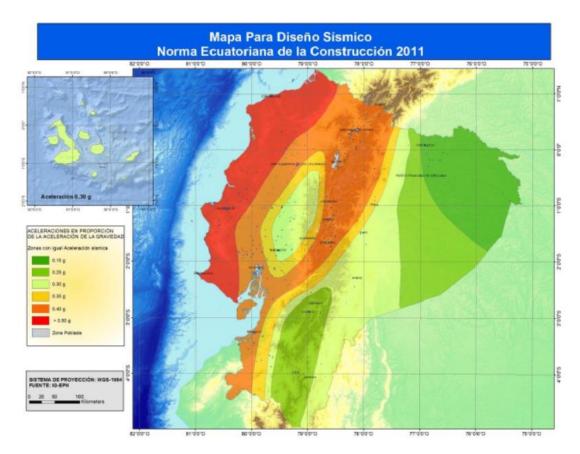


Figura 53. Ecuador, factor Z para propósitos de diseño Fuente: (NEC-SE-VIVIENDA, 2015)

Únicamente el nororiente ecuatoriano no es catalogado como zona sísmica y todo el litoral ecuatoriano presenta una amenaza sísmica muy alta.

Tabla 13: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

<i>J</i>	J			1		
Zona Sísmica	I	Ш	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

Se toma en cuenta el valor máximo para diseño en el país Z=0.5.

5.4.2. Perfil de suelo

Los parámetros que se utilizan en la clasificación de los perfiles de suelo son los correspondientes a los 30 metros superiores del perfil para los perfiles tipo A, B, C, D Y E. Para los perfiles tipo F se aplican otros criterios. En este caso el perfil de suelo en la mayor parte del territorio ecuatoriano es de tipo D

Tabla 14: Clasificación de los perfiles de suelo

Clasificación de los perfiles de Suelo						
Tipo de perfil	Descripción	Definición				
A	Perfil de roca competente	$Vs \ge 1500 \text{ m/s}$				
В	Perfil de roca de rigidez media	$(1500 > Vs \ge 760)$ m/s				
G	Perfiles de suelos muy densos o roca blanca que cumplan con el criterio de velocidad de onda cortante	$(760 > Vs \ge 360)$ m/s				
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \ge 50.0.$ $Su \ge 100KPa$				
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	$(360 > Vs \ge 180)$ m/s				
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$N \ge 50 \ge 15$ $100 \text{ KPa} > \text{Su} \ge$ 50 KPa				
	Perfil que cumple el criterio de velocidad de onda de cortante	Vs < 180 m/s				
E	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas	Vs < 180 m/s Su < 50 KPa IP > 20				
F	Suelo requiere de evaluación específica					

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

Se selecciona el perfil de suelo tipo D que es el predominante en Zonas sísmicas Ecuatorianas (NEC-SE-DS, 2015).

5.4.3. Tipo de Fuerzas sísmicas A, B Y C

Las fallas sísmicas se clasifican de acuerdo al riesgo que implican y se clasifican de forma descendente. Siendo las de tipo A capaces de producir terremotos de grandes magnitudes (Tabla15).

Tabla 15: *Tipos de fuentes sísmicas*

		Definición de	e la Fuente Sísmica
Tipo de Fuente Sísmica	Descripción de fuente sísmica	Máximo Momento Magnitud	Velocidad de Deslizamiento
A	Fallas capaces de producir eventos de amplia magnitud con alto rango de actividad sísmica	M ≥ 7.0	SR ≥ 5.0
В	Todas las fallas distintas al tipo A y C	$\begin{array}{l} M \geq 7.0 \\ M < 7.0 \\ M \geq 6.5 \end{array}$	SR < 5.0 SR > 2.0 SR < 2.0
С	Fallas que no son capaces de producir sismos de magnitud amplia con relativo bajo rango de actividad sísmica	M < 7.0	SR ≤ 2.0

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

5.4.4. Coeficientes de perfil de suelo

Los coeficientes de perfil de suelo se muestran en las Tablas 16,17 y 18. (NEC-SE-DS, 2015)

a) F_a :

Tabla 16:Coeficiente de amplificación del suelo en zona de período corto (NEC-SE-DS, 2015)

Tipo de perfil de subsuelo	I	П	Ш	IV	V	VI	
Factor Z	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	
В	1	1	1	1	1	1	
С	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	1.5	1.39	1.26	1.14	0.97	
F	Se requiere de un estudio de suelo						

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

a) F_d :

Tabla 17:Desplazamientos para diseño en roca.

Tipo de perfil de subsuelo	I	П	Ш	IV	V	VI	
Factor Z	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	
В	1	1	1	1	1	1	
С	1.6	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25	
D	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5	
F	Se requiere de un estudio de suelo						

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

b) F_s

Tabla 18: Factores de comportamiento no lineal de los suelos

Tipo de perfil de subsuelo	I	II	III	IV	V	VI			
Factor Z	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			
В	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75			
С	1	1.1	1.2	1.25	1.3	1.45			
D	1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.65			
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2			
F	Se requi	Se requiere de un estudio de suelo							

Fuente: (NEC-SE-CG, 2015)

5.4.5. Espectro elástico de diseño en aceleraciones

El espectro elástico de aceleraciones S_a , se expresa como fracción de la aceleración de gravedad. Para el nivel del sismo de diseño como se observa en la Figura 54. Considerando: El factore de zona sísmica Z, el tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura y los coeficientes de perfil de suelo F_a , F_d , F_s .

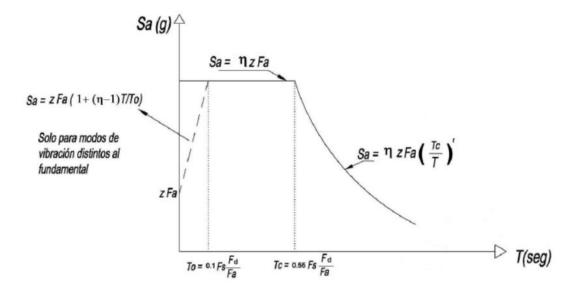


Figura 54. Espectro horizontal de diseño en aceleraciones Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Donde:

 η : Razón entre aceleración espectral Sa (T= 0.1s) y el PGA para el periodo de retorno seleccionado.

 η : 1.80; Provincias de la costa excepto Esmeraldas.

 η : 2.48; Provincias de la sierra, Galápagos y Esmeraldas.

 η : 2.60; Provincias del Oriente.

 F_a : Coeficiente de amplificación en la zona de período cortó.

 F_d : Coeficiente de amplificación para diseño en roca.

 F_s : Coeficiente de amplificación de comportamiento no lineal de los suelos.

 S_a : Espectro de aceleraciones expresado como fracción de la aceleración de la gravedad. Depende del periodo o modo de vibración de la estructura.

T: Período fundamental de vibración de la estructura

 T_0 : Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

 T_C : Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

Z: Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad. Mediante los coeficientes de amplificación y las siguientes ecuaciones podemos calcular los períodos T_o y T_c mediante las ecuaciones 5.2 y 5.3.

$$T_C = 0.55 \, F_S \frac{F_d}{F_a} \tag{5.2}$$

$$T_0 = 0.1 \, F_s \frac{F_d}{F_a} \tag{5.3}$$

Por lo que el espectro de aceleraciones viene definido por las siguientes ecuaciones

$$S_{a} = \begin{cases} ZF_{a} \left[1 + (\eta + 1) \frac{T}{T_{o}} \right] & para T \leq T_{o} \\ \eta Z F_{a} & para T_{o} \leq T \leq T_{c} \\ \eta Z F_{a} \left(\frac{T_{c}}{T} \right)^{r} & para T > T_{c} \end{cases}$$

$$(5.4)$$

Donde r=1 para tipos de suelo A, B o C y r=1.5 para el tipo de suelo D o E.

Se toma las condiciones más extremas posibles en estructuras de poca elevación y para eso se debe tener una frecuencia elevada lo que nos da un periodo bajo el cual se lo toma por debajo del periodo límite Tc lo que el espectro de aceleraciones resulta:

El límite de vibración T_L es utilizado para el espectro sísmico por desplazamientos. Se tomarán en cuenta los espectros sísmicos de diseño y máximo sísmico esperado en poblaciones de alto peligro sísmico en el país entre ellas se toma en cuenta: Pedernales, Bahía de Caráquez de la provincia de Manabí y Muisne de la provincia de Esmeraldas (Tabla19)

Tabla 19:Coeficientes de perfil de suelo y períodos límites para las localidades de: Bahía de Caráquez, Pedernales y Muisne.

Cantón	Tipo de suelo	Z	Fa	Fd	Fs	n	r	to	tc
Pedernales	D	0,5	1,12	1,3	1,65	1,8	1,5	0,192	1,053
Bahía de Caráquez	D	0,5	1,12	1,3	1,65	1,8	1,5	0,192	1,053
Muisne	D	0,4	1,2	1,4	1,5	2,48	1,5	0,192	1,053

En base a la ecuación 5.3 y sus condiciones se obtuvieron las gráficas de los espectros de aceleraciones para los 3 cantones que se pueden observar en las Figuras 55, 56, y 57, los espectros de Pedernales y Bahía de Caráquez coinciden por el tipo de suelo y por Z.

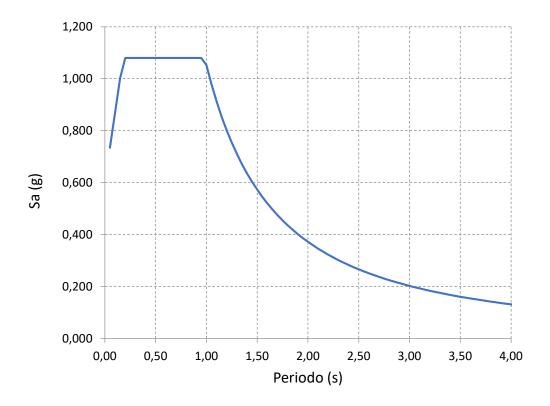


Figura 55. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño para Pedernales.

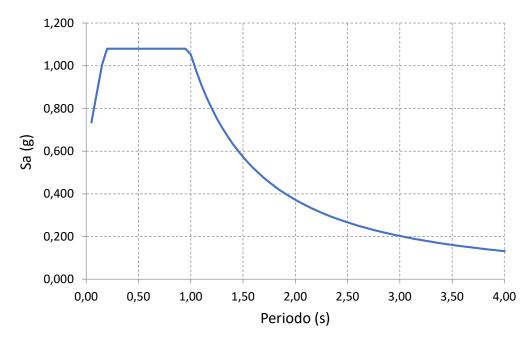


Figura 56. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño, para Bahía de Caráquez.

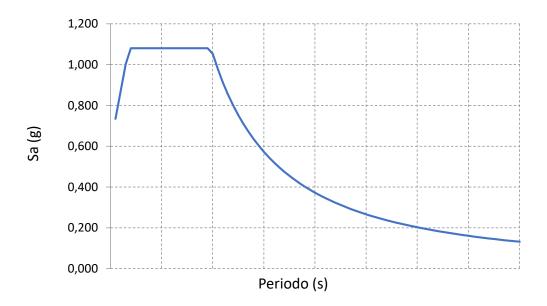


Figura 57. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño para Muisne.

5.4.6. Periodo efectivo

Se tomarán en cuenta los espectros sísmicos de diseño y máximo sísmico esperado en poblaciones de alto peligro sísmico en el país entre ellas se toma en cuenta: Pedernales, Bahía de Caráquez de la provincia de Manabí y Muisne de la provincia de Esmeraldas. Se desea tener una aceleración pequeña aproximada a 0.4 g por lo que los períodos efectivos para las tres zonas se los considera evaluando la curva del espectro respecto al período y se interpola de acuerdo al objetivo deseado (Tabla 20):

Tabla 20:Períodos efectivos para un espectro sísmico de 0.4 G para las localidades de Bahía de Caráquez, Pedernales, y Muisne

_	DBE						
Localidad	Sa(g)	T	T_{eff} $(Sa(g)=0.4)$				
Pedernales	0.4	1.95	1.95				
Bahía de Caráquez	0.4	1.95	1.95				
Muisne	0.413 0.397	1.95 2	1.99				

Se establece un período efectivo relacionado con los tres lugares por lo que se establece relacionando los tres lugares para un sismo de diseño.

$$T_D = 1.96$$
,

5.4.7. Espectro elástico de desplazamientos

Es utilizado para la definición de los desplazamientos espectrales elásticos para el diseño que corresponden al nivel del sismo con el que se desea diseñar, el espectro de desplazamientos S_d es

expresado como fracción de amortiguamiento crítico igual a 5% (en metros). Par ilustrar este espectro se utiliza la Tabla 18 donde se muestran los coeficientes de perfil de suelo y sus límites de períodos de las ecuaciones 5.1 y 5.2. Y aumentando el límite TL que es 2.4 Cd. Se obtiene el espectro de desplazamientos para las mismas localidades que se realizó el espectro de aceleraciones y viene dado de la siguiente manera en la ecuación 5.6. Se ilustran las curvas de espectro de desplazamientos en las Figuras 58,59, y 60.

$$\begin{cases} (0.38)ZF_{a}T^{2} \left[0.4 + 0.6\frac{T}{T_{o}} \right] & para T \leq T_{o} \\ (0.38)ZF_{a}T^{2} & para T_{o} \leq T \leq T_{c} \\ (0.38)ZF_{d}T & para T_{c} \leq T \leq T_{L} \\ (0.38)ZF_{d}T_{L} & para T > T_{L} \end{cases}$$

$$(5.6)$$

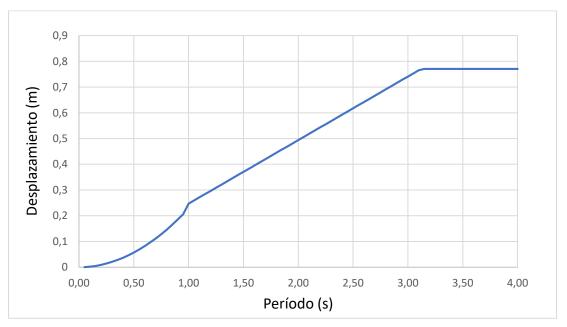


Figura 58. Espectro sísmico elástico de desplazamientos para Pedernales.

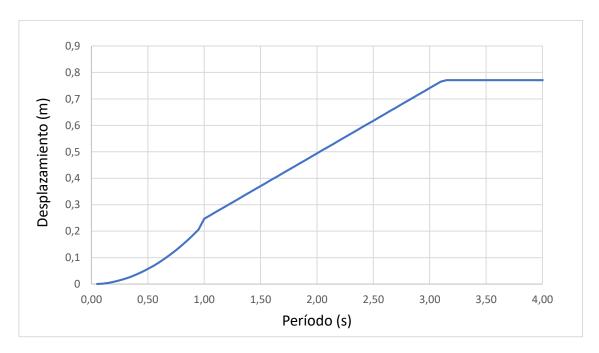


Figura 59. Espectro sísmico elástico de desplazamientos para Bahía de Caráquez.

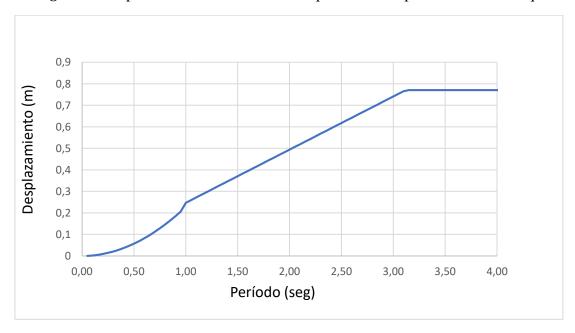


Figura 60. Espectro sísmico elástico de desplazamientos para Muisne.

5.4.8. Desplazamientos para diseño

Los desplazamientos para diseño se toman de las curvas de espectro en desplazamientos para las 3 localidades tomando en cuenta el período efectivo obtenido en la Tabla 20, de acuerdo a ese período se obtiene un desplazamiento en metros ilustrado en la Tabla 21.

Tabla 21:Desplazamientos obtenidos a partir del espectro de aceleraciones en desplazamientos.

Localidad —	DBE		
	T	Sd(m)	
Pedernales	1.95	0.41	
Bahía de Caráquez	1.95	0.41	
Muisne	1.99	0.35	

Por lo que se toma un D = 0.41 m.

5.5. Cálculo de la rigidez efectiva del sistema

La rigidez efectiva del sistema $(\sum k_{heff})$ es calculada en base a la ecuación 5.1. Mencionada anteriormente y se considera el período efectivo seleccionado en el paso 2.

Donde:

- W_t = Peso sísmico total.
- g = Aceleración de la gravedad.

$$K_{k_{ehff}} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} \frac{4\pi^2 216 \, KN}{(1.96 \, s)^2 (9.8 \, m/s^2)} = 226.5 \, kN/m$$

5.6.Distribución de los aisladores

En base al requerimiento del paso 3, donde se determina la rigidez efectiva del sistema, la cual está en función de la rigidez de los aisladores elastómeros es necesario en la vivienda unifamiliar es de 6x6 y tres metros de alto, distribuir 9 aisladores los cuales serán cuatro elastoméricos y cinco friccionales. La principal función de los aisladores elastoméricos primeros será el proveer la suficiente fuerza de restitución a su posición original. La principal función de los friccionales será reducir la energía del sismo que se trasmitirá a la superestructura.

Los aisladores están distribuidos como se indica en la Figura 61.

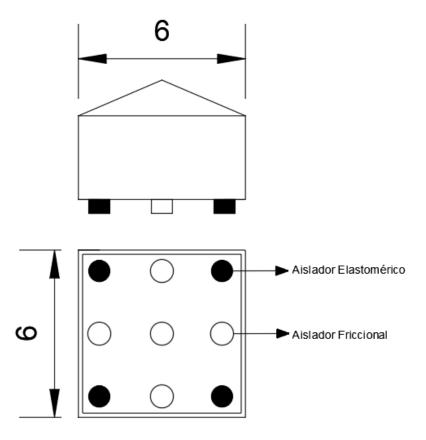


Figura 61. Sistema híbrido de aislamiento de base para una vivienda unifamiliar

5.7.Resumen

En este capítulo se estipulo una metodología para determinar la configuración del SHAB, estableciendo 4 pasos. Primero se calcula el peso del caso de estudio, analizando los tipos de cargas, los pesos específicos de los materiales y las combinaciones más desfavorables que podrían existir de acuerdo a la NEC-15. El segundo paso es la selección del período efectivo, para realizar esto se determinó el espectro sísmico de aceleraciones para las localidades de: Pedernales, Bahía de Caráquez, y Muisne según sus coeficientes de perfil de suelo. El paso 4 es el cálculo de la Rigidez efectiva, la cual se calcula bajo la consideración del período seleccionado. Finalmente se realiza la distribución de los aisladores elastoméricos y friccionales determinado por la planta de la vivienda caso de estudio, el peso sísmico y las propiedades mecánicas del sistema. En el siguiente capítulo se dimensionarán los mismos de acuerdo a la demanda y a las propiedades mecánicas de los materiales que conforman.

CAPÍTULO VI

6. DIMENSIONAMIENTO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS HÍBRIDOS

6.1.Introducción

Para dimensionar los aisladores sísmicos híbridos principalmente se debe tomar en cuenta las propiedades mecánicas y las cargas sísmicas y de servicio que deben soportar los aisladores elastoméricos ya que los aisladores friccionales por su sencilla configuración (fricción plana) se pueden adaptar a cualquier dimensión. En la sección 6.2 se dimensionará los aisladores elastoméricos híbridos, primero estableciendo las cargas que soportarán. Se calcula la rigidez horizontal de cada aislador y la fuerza horizontal o fuerza cortante basal, se determina el módulo de corte del Caucho para posteriormente establecer la altura y el diámetro del mismo. En la sección 6.3 se realiza el dimensionamiento del aislador friccional, la cual se la realiza de acuerdo a la altura y el desplazamiento de los aisladores elastoméricos.

6.2. Dimensionamiento de los aisladores elastoméricos híbridos

Para diseñar el aislador elastomérico se debe tener en cuenta el tipo de esfuerzos a los que estará sometido el dispositivo, los esfuerzos a los que se encontrará sometido el aislador son: compresión, rotación y cortante, primero se obtiene la carga a compresión de la estructura tomando en cuenta los 9 aisladores que trabajarán como columnas debido a la carga de servicio y están distribuidos como se indica en la Figura 62, los 4 aisladores estarán sometidos a la misma carga.

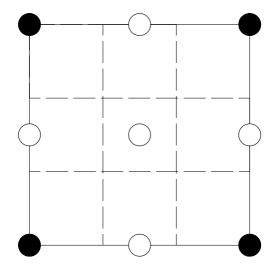


Figura 62. Distribución de aisladores sísmicos

En el siguiente cuadro se puede observar la carga que soporta cada uno de esos aisladores a partir de la carga total obtenida de 216 kN (Tabla 22).

Tabla 22Distribución de cargas que soporta los aisladores

	A	В	C
1	13,5	27	13,5
2	27	54	27
3	13,5	27	13,5

La carga vertical que soporta cada aislador de goma es $P_v=13.5~kN$ toneladas. La tensión admisible de la goma a compresión no confinada es $\sigma_a=7~MPa$.

6.2.1. Rigidez horizontal

Se calcula la rigidez horizontal de cada aislador elastomérico dividiendo la rigidez afectiva calculada en 5.5 para el número de aisladores determinados

$$K_h = \frac{226.5 \, kN/m}{4} = 56.282 \, kN/m$$

6.2.2. Cálculo de la fuerza cortante basal o fuerza horizontal

Se calcula mediante la ecuación 5.6. (UBC, 1997).

$$P_{H} = K_{hSistema}D_{D}$$
 (6.1)
 $P_{H} = 22.97 \frac{ton}{m} (0.41 m) = 9.41 ton$

6.2.3. Valor del módulo de corte

Un valor capaz de soportar deformaciones grandes es $G=6~Kg/cm^2$ para una deformación de 50% (Vargas, 2016)

$$G = 6 \frac{Kg}{cm^2} = 588.39 \, kPa$$

6.2.4. Pre dimensionamiento de la altura del aislador

La altura del aislador se basa en el desplazamiento D y el valor de la deformación de corte directa γ_s que para elastómeros es de 150% de la altura del aislador llegando a una deformación de corte máxima de 250%. (Muñoz, 2013)

$$h = \frac{D}{\gamma_s} = \frac{0.41 \ m}{1.5} = 0.27 \ m$$

6.2.5. Verificación de esbeltez

Para el cálculo de la fuerza crítica de pandeo vertical se utiliza la ecuación 4.13. (Constantinou et al. 2007). Pero en este caso no hay láminas de goma ni de acero por lo que Tr y t son iguales y es la altura del aislador.

$$P_{cr} = 0.218 \frac{Gd^4}{h} \tag{6.2}$$

Donde:

d: Diámetro del aislador

G:Módulo de corte del Aislador

h:Altura del Aislador

Para comprobar la esbeltez se relaciona con la carga axial de que soporta cada aislador de goma es: $P_V = 3281.61$ N. y se comprueba mediante un factor de seguridad Fs.

Se debe aumentar el diámetro del aislador. Se predispone de un factor de seguridad de 4.

$$d = \sqrt[4]{\frac{Fs(h)(P_V)}{0.218(G)}} = \sqrt[4]{\frac{4(0.27 m)(16512.61N)}{0.218(0.58MPa)}} = 0.20 m$$

6.3. Dimensionamiento de los aisladores friccionales

Estos aisladores consisten en un perfil de acero con PTFE extremo en contacto con una superficie plana de acero inoxidable pulido la altura total del perfil de acero más el extremo de PTFE (teflón) siendo el aislador un tipo de columna y se debe analizar para la carga de compresión máxima que soportará la vivienda, la cual se encuentra en el centro y es de 6.74 toneladas (Tabla 23).

Tabla 23 *Dimensiones de los aisladores friccionales*

	A	В	C
1	13,5	27	13,5
2	27	54	27
3	13,5	27	13,5

La altura total será igual a la altura de los aisladores elastoméricos de 27 cm como se observa en la Figura 63.

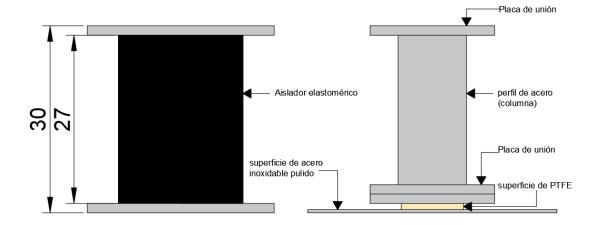


Figura 63. Componentes del aislador friccional plano y comparación de alturas con el aislador elastomérico

Se establece un área de contacto de 78.54 cm² con un diámetro de 10 centímetros y un espesor de 1 centímetro. Estas dimensiones garantizan estabilidad y proporcionan un área de fricción ideal para las dimensiones de la vivienda.

6.4. Resumen

Se dimensionaron los dos tipos de aisladores Híbridos en base a lo calculado para los aisladores elastoméricos los cuales tendrán una rigidez que garantice una fuerza de restitución y los aisladores friccionales soportarán en mayor parte las cargas verticales y disiparán más energía sísmica mediante la fricción entre superficies de PTFE y acero inoxidable pulido. Una vez dimensionados los aisladores y la vivienda se desea realizar una prueba experimental a escala para determinar la capacidad de amortiguamiento del sistema y su eficiencia que se realizará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO VII

7. ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MESA VIBRATORIA SIMULADORA DE SISMOS.

7.1. Introducción

La prueba sísmica de un Sistema Híbrido de Aislamiento de Base (SHAB) se realizó con el objetivo de validar el modelo numérico que se presenta en el siguiente capítulo, evaluar la estabilidad del sistema y obtener características dinámicas y verificar la efectividad en reducir las respuestas dinámicas del sistema. La prueba se realizó tomando en consideración sismos como el de Northdridge que es un sismo tipo impulsivo, el del Centro y el recordó de Pedernales de 2016 el cual fue escalado considerando el Terremoto Máximo Considerado (MCE) utilizando una mesa vibratoria de dos grados de libertad. La respuesta dinámica del bloque de construcción SHAB fue registrada por dos acelerómetros lo cual se describirá más adelante en este capítulo. La identificación del sistema (ID) se logró mediante pruebas verticales de carga estática y ruido blanco antes de la prueba sísmica.

Este capítulo contiene cuatro secciones: la Sección 7.2 presenta el programa de prueba y la instrumentación utilizada 7.3 proporciona la identificación del sistema. La Sección 7.4 describe los procedimientos utilizados para las pruebas de identificación del sistema y la Sección 7.5 presenta el protocolo y los resultados de la prueba de calificación sísmica.

7.2. Programa de prueba

7.2.1. Descripción del modelo de muestra

La disposición de este sistema es simétrica en el plano y cada aislador trabaja inicialmente ante cargas de servicio verticales representados por la carga sísmica equivalente.

En base al tamaño real de la vivienda unifamiliar se realiza la construcción de la base de la vivienda a escala 10:1, con una base rígida de 700x700x15 en madera como se muestra en la Figura 64.

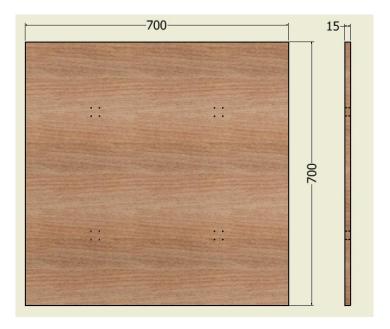


Figura 64. Base de tabla triplex del prototipo SHAB

Por la limitación de la mesa vibratoria respecto al peso (100 Kg = 0.98 kN) se utiliza un sistema con un solo aislador elastomérico y se deben recalcular las dimensiones de acuerdo a la demanda, este aislador fue fabricado por vulcanización como se observa en Figura 65 y Figura 66.

La rigidez efectiva se calcula mediante la ecuación 5.1.

$$\sum k_{ehff} = \frac{4 \,\pi^2 W_t}{g \,T_{heff}^2} = \,\frac{4 \,\pi^2 0.98 \,kN}{9.8 \,m/s \,(2 \,s)^2} = \,0.97 \,kN/m$$

Por lo que se debe utilizar un aislador esbelto capaz de tener gran deformación, las dimensiones utilizadas son: 90 mm de altura y 42 mm de diámetro.

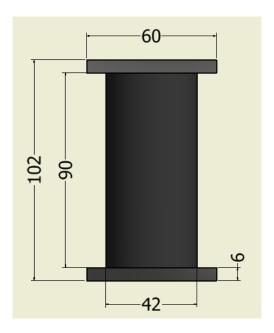


Figura 65. Dimensiones del aislador elastomérico



Figura 66. Aislador elastomérico para el prototipo SHAB

Cuatro aisladores friccionales que consisten en una Columneta de un tubo cuadrado de acero de 40 x 40 x 1 mm y en su extremo Politetrafluoroetileno comúnmente llamado teflón o PTFE de 1

cm de altura y 2.5 cm de diámetro. En contacto con una superficie de acero inoxidable AISI430 con acabado superficial 4B, sus dimensiones se observan en la Figura 67 y se representa su construcción en la Figura 68.

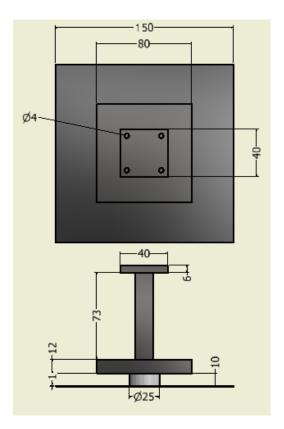


Figura 67. Dimensiones del aislador friccional para el SHAB



Figura 68. Aislador sísmico friccional para el prototipo SHAB

En contacto con una superficie de acero inoxidable AISI430 con acabado superficial 4B (Figura 69).

En la Figura 69 se ilustra un prototipo de sistema propuesto que consiste en cuatro aisladores friccionales y un elastomérico dispuestos en una configuración simétrica. Esto se conoce como un bloque híbrido de aislamiento. La Figura 69 muestra esquemas del prototipo de modelo que se construyó como parte de esta tesis. Las condiciones de borde determinan el comportamiento del sistema, donde inicialmente se considera uno de los soportes como un rodillo y el otro como empotramiento. Esto permite que el sistema cuente con una rigidez horizontal mínima. La Figuras 69 muestra el ensamblaje del prototipo. La tabla 24 muestra la descripción de las partes del prototipo de prueba.

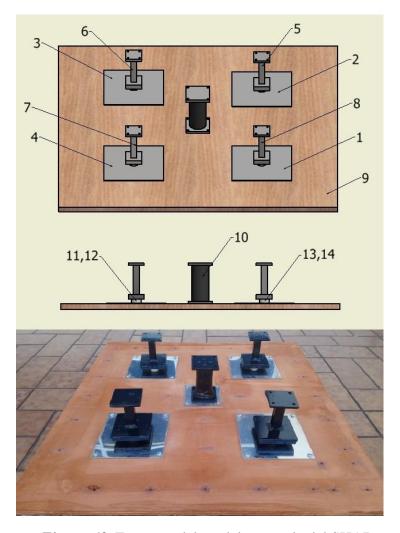


Figura 69. Esquema del modelo a escala del SHAB.

Tabla 24:Descripción de las partes del prototipo de prueba

ITEM	Descripción	Material
1	Superficie de acero inoxidable de 1 mm de espesor	AISI 304 4B
2	Superficie de acero inoxidable de 1 mm de espesor	AISI 304 4B
3	Superficie de acero inoxidable de 1 mm de espesor	AISI 304 4B
4	Superficie de acero inoxidable de 1 mm de espesor	AISI 304 4B
5	Columneta de acero para el aislador friccional	Acero A36
6	Columneta de acero para el aislador friccional	Acero A36
7	Columneta de acero para el aislador friccional	Acero A36
8	Columneta de acero para el aislador friccional	Acero A36
9	Base rígida que se ancla a la mesa vibratoria	Madera
10	Aislador elastomérico	Caucho con placas de acero en los extremos
11	Teflón para aislador friccional	Politetrafluoroetileno (PTFE)
12	Teflón para aislador friccional	Politetrafluoroetileno (PTFE)
13	Teflón para aislador friccional	Politetrafluoroetileno (PTFE)
14	Teflón para aislador friccional	Politetrafluoroetileno (PTFE)

Sujetos a estos elementos por encima se encuentra una base Aislada de 700x700x15, con un conjunto de pesas s metálicas que representan la masa sísmica como se indica en las Figuras 70 y 71 con su configuración.

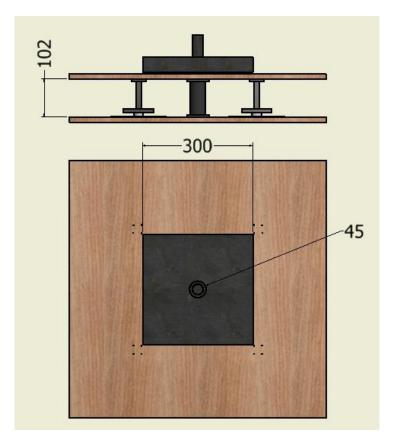


Figura 70. Esquema final del prototipo SHAB



Figura 71. Prototipo SHAB con masa sísmica

7.2.2. Mesa simuladora de sismos

Se utilizó una mesa de vibración sísmica biaxial marca Quanser modelo Skake Table III localizada en el Laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Central del Ecuador, es un sistema de alta potencia, presenta un análisis avanzado con la introducción de la multidinámica (Figura 72) y sus características se presentan en la Tabla 25.

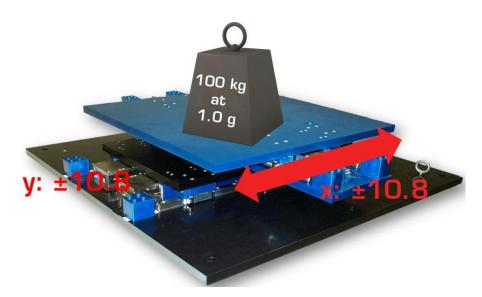


Figura 72. Mesa de vibraciones Shake Table III Fuente: (*Quanser*, 2012)

Tabla 25:Características generales de mesa de vibraciones utilizada

Características técnicas de la mesa de vibraciones		
Dimensiones de la zona de carga útil	70 cm × 70cm	
Máxima carga	100 (Kg) máx.	
Frecuencia	0.1-20 Hz máx.	
Desplazamiento máximo	21.6 cm EJE X: 10.8 cm EJE Y: 10.8 cm	
Velocidad (eje X, eje Y)	(25.8m/sec, 12.9m/sec)	
Accélération (X axis, Y axis, Z axis)	±3.21 g, ±4.69 g	
Sistema de control	Asistido por computador	
Sistema Impulsor	Tres servomotores de bajo ruido no hidráulicos	

7.2.3. Instrumentación

El estudio de la dinámica estructural es esencial para comprender y evaluar el rendimiento de cualquier estructura. Por lo general, el primer paso para obtener la respuesta estructural de cualquier sistema implica estimar propiedades modales iniciales tales como masa, rigidez, formas de modo y frecuencias. Cualquier predicción de la respuesta estructural depende en gran medida de estos parámetros.

Actualmente, se podrían usar varios métodos de ingeniería experimental para identificar las propiedades estructurales y la respuesta de las estructuras cuando se los somete a vibraciones inducidas por terremotos. Esta sección se centra en dos temas principales (que sirven como objetivos del test: (i) la identificación de propiedades estructurales y (ii) la evaluación de la

respuesta estructural del prototipo escala 1: 10. Dos Acelerómetros uniaxiales con un rango de \pm 49 m/s y una sensibilidad de 1,0 g/V son instalados como se muestra en las figuras.

7.2.4. Descripción del prototipo

La información real sobre las propiedades geométricas, cargas de gravedad y materiales solo se proporciona para la muestra que se describe en detalle punto 7.2.1.

Según sea necesario, los factores de conversión, se modificaron a una escala de 10: 1. Los principales parámetros calculados se muestran en la Tabla 26 a continuación.

Tabla 26Factores geométricos y físicos del prototipo

Parámetro	Escala
Longitud, 1	10:1
Módulo de Elasticidad, E	1
Densidad, ρ	1
Área, A	100:1
Masa kg	100



Figura 73. Configuración del sistema de prueba

7.3. Instrumentación

La respuesta dinámica de la estructura de la muestra fue registrada por 2 sensores. La Tabla 27 muestra un resumen de la dirección y medición de cada instrumento. Una breve descripción de cada instrumento se proporciona a continuación.

7.3.1. Acelerómetros

Los acelerómetros se usaron para obtener aceleraciones el sistema aislado considerado como respuestas dinámicas de salida. Las aceleraciones del ruido blanco y de los tres terremotos considerados fueron ingresadas utilizando la extensión de la mesa vibratoria. Las placas de base y la base aislada Las Figuras 74 y 75 muestran la posición de los acelerómetros ubicados en el modelo de prueba.



Figura 74. Acelerómetro en mesa vibratoria



Figura 75. Acelerómetros colocados en el prototipo

Tabla 27: *Resumen de instrumentación en el modelo de prueba*

Instrumento	Dirección	Lugar de medición
Acelerómetro	Este-Oeste	Base Aislada
Acelerómetro	Norte-Sur	Base Aislada

7.3.2. Adquisición de datos + flujo de datos esquemáticos

Los sistemas de adquisición de datos típicamente se ocupan de la conversión de formas de onda analógicas en valores digitales para su procesamiento. Los componentes básicos de estos sistemas son: (i) los sensores que convierten parámetros físicos en señales eléctricas, (ii) circuitos de acondicionamiento de señal para convertir señales de sensores en una forma convertible a valores digitales y (iii) convertidores analógicos a digital, que convierten condicionadas señales del sensor a valores digitales. (http://en.wikipedia.org/wiki/Data_acquisition).

Todos los instrumentos utilizados para la prueba se conectaron al Sistema de Adquisición de Datos (ver Figura 76). Las señales grabadas de todos los instrumentos se digitalizaron y almacenaron en archivos de datos para estar disponibles para su posterior procesamiento.



Figura 76. sistema de adquisición de datos

7.3.3. Archivo de datos

Los datos fueron obtenidos por el sistema simulink de matlab (Figura 77)

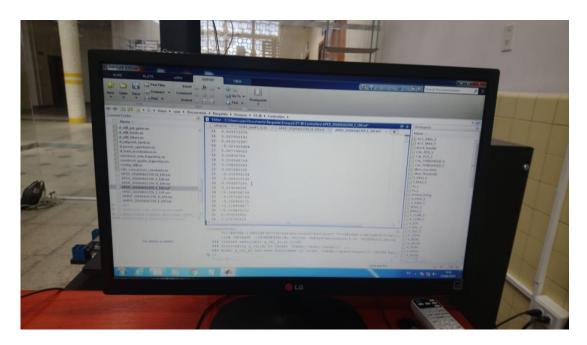


Figura 77. Sistema de adquisición de datos

7.3.4. Grabación de video y ubicación de las cámaras

Se colocó una cámara frontal para testificar el funcionamiento del Sistema.

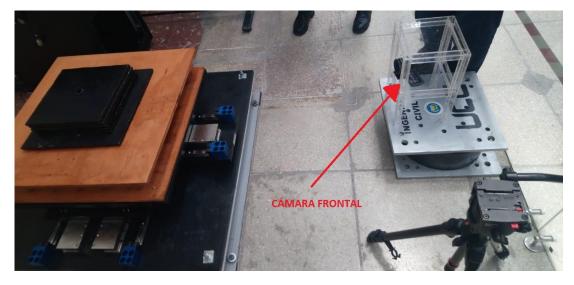


Figura 78. Cámara frontal para testificar el sistema

7.4. Sistema de identificación (SI)

Las pruebas de identificación del sistema SHAB se realizaron en base a pruebas dinámicas de a)"ruido blanco" es un desplazamiento de base de ruido blanco de banda ancha (0-50 Hz) que generalmente se aplica mediante tablas de sacudidas para obtener la característica dinámica inicial del sistema. De manera similar, se pueden aplicar diferentes protocolos de carga, tales como movimientos de b) "barrido sinusoidal" e c) "Impulso", esto se detalla en la Figura 79.

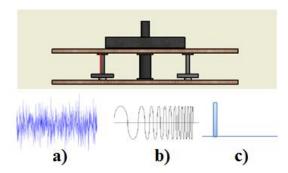


Figura 79. Test Dinámicos de carga: (a) Ruido blanco (b) Barrido sinusoidal (c) Impulso

7.4.1. Test de ruido blanco (White Noise Test)

Las pruebas de ruido blanco pretenden excitar el sistema lo suficiente como para obtener las propiedades dinámicas, por lo que se puede tener en cuenta el efecto amplificador de la tabla y la extensión. Las señales de ruido blanco utilizadas para conducir la mesa de batido son historias de aceleración generadas aleatoriamente (Ewins 1984). La prueba de ruido blanco se realizó en el rango de frecuencia de 0.1-50 Hz y en una amplitud de aceleración media de 0.4 g. La carga de ruido blanco se aplicó al bloque de construcción SHAB. Documentan las aceleraciones de entrada de ruido blanco en cada dirección. Esto permitió la evaluación de las características dinámicas de la muestra (frecuencias y amortiguamiento) en tres direcciones separadas: la dirección X. Se realizó

bajo control de aceleración, generado por sacudidas ligeras aleatorias de las tablas en múltiples direcciones (Figura 80 y Figura 81).

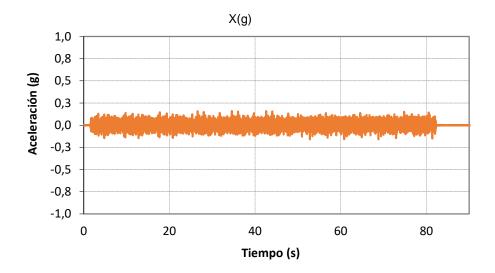


Figura 80. White-Noise en X

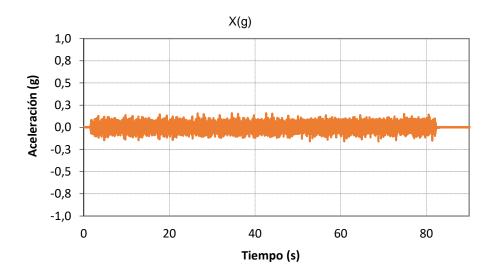


Figura 81. White-Noise en Y

El análisis de dominio de frecuencia se realizó en los movimientos registrados de la prueba utilizando la entrada de ruido blanco. Se trazó el espectro de amplitud de Fourier a partir del

historial del tiempo de aceleración de la placa superior (Ewins 1984). Se identificó la frecuencia fundamental del bloque de construcción SHAB. La Figura 82 muestra las frecuencias fundamentales del bloque de construcción SHAB medido durante las pruebas de ruido blanco. Un análisis de las representaciones muestra que las dos frecuencias horizontales están cerca la una de la otra. Esto se debe a que el espécimen es perfectamente simétrico.

Perfectamente simétrico.

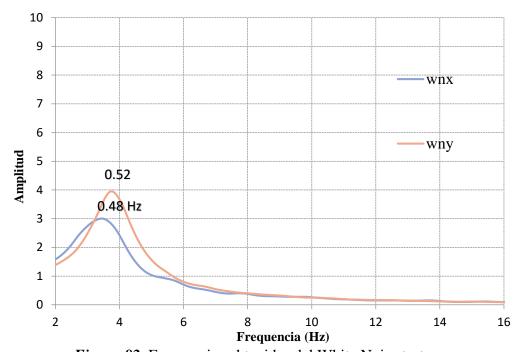


Figura 82. Frecuencias obtenidas del White Noise test

Donde la línea azul representa la dirección en X y la línea roja representa la dirección en Y

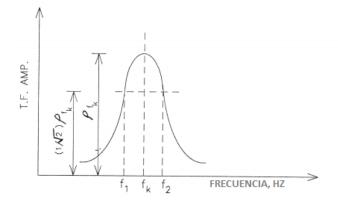


Figura 83. Respuesta de frecuencia típica para determinar las características de amortiguación.

Fuente (Bracci et al., 1992)

$$\xi_k = \frac{f_2 f_1}{f_2 + f_1} = \frac{f_2 - f_1}{2f_k} \tag{7.1}$$

Donde:

• f_i = Frecuencia de interes , donde f_2 y f_1 son frecuencias cuando

$$\rho_{fi} = \frac{\rho_{fk}}{\sqrt{2}}$$

- f_k = Frecuencia natural k^{th}
- ξ_k = Relación de amortiguamiento

La Tabla 28 presenta los resultados del espectro de amplitud de Fourier y el método de ancho de banda.

Tabla 28: Frecuencia, período y coeficiente de amortiguamiento por excitación White-Noise

	Frequencias (Hz)	Periodo (s)	Relación de amortiguamiento (ξ)
White noise en X (WNX)	0.52	1.92	27.8%
White noise en Y (WNY)	0.48	2.083	27.8%

7.5. Protocolo y resultados de la prueba de cuantificación sísmica

El objetivo de la última serie de pruebas fue obtener una respuesta dinámica de la muestra para calibrar el modelo numérico descrito en el siguiente capítulo. La efectividad del bloque de construcción SHAB se evaluó en la dirección horizontal. La obtención del comportamiento horizontal habría requerido la prueba de las muestras de SHAB. Obtenido La prueba también brindó la oportunidad de observar su estabilidad. Se realizaron tres series de pruebas sísmicas (uniaxial en dos niveles de intensidad que representan un terremoto de diseño (DE).

7.5.1. Ingreso de registros sísmicos

Para esta serie de pruebas, se seleccionaron dos pares de registros de aceleración de movimiento en el suelo en base a los registros de Northridge (EEUU), Pedernales (Ecuador) y El Centro (EEUU). La Tabla 29 enumera los movimientos de entrada que se usaron. Solo los resultados del escenario EQ1, EQ2, EQ3 fueron analizados y presentados aquí. Esto redujo el esfuerzo analítico, pero proporcionó evidencia suficiente para la evaluación del sistema. Representante de los suficientes aquí se utilizan aquí para demostrar que se utilizó para las pruebas experimentales en el SHAB.

Tabla 29 *Terremotos utilizados en la simulación*

Terremoto			
M	ID	Año	Nombre
6.7	EQ1	1994	Northridge (EEUU)
7.8	EQ2	2016	Pedernales(Ecuador)
6.9	EQ3	1940	El Centro (EEUU)

Las Figuras 84 a 89 muestran el tiempo-historia de los registros de aceleración escalados en sentido Norte-Sur y Este-Oeste para Northridge, Pedernales y El Centro (California). En el caso de Pedernales se tomó la parte más significativa del acelerograma debido a las limitaciones que presentaba el sistema de prueba.

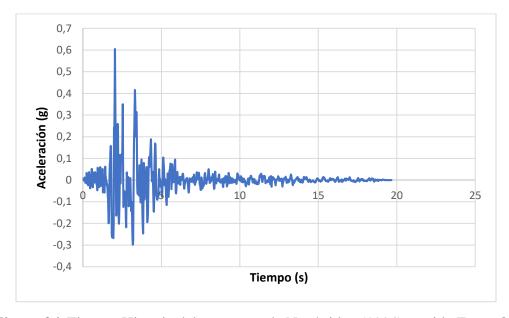


Figura 84. Tiempo-Historia del terremoto de Northridge (1994) sentido Este - Oeste.

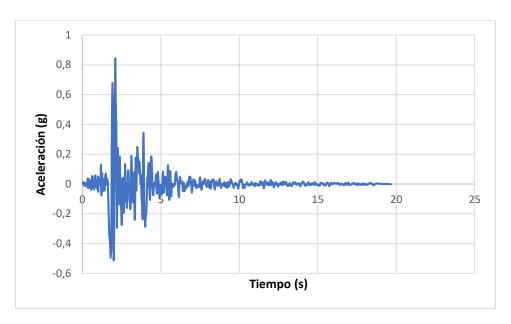


Figura 85. Tiempo-Historia del terremoto de Northridge (1994) sentido Norte - Sur.

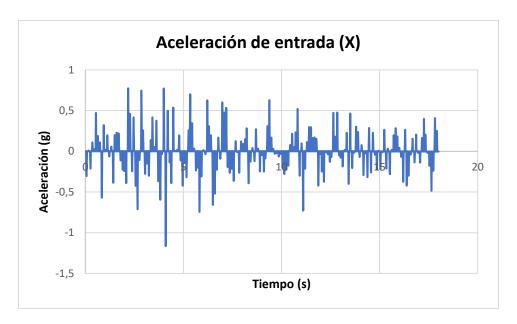


Figura 86. Tiempo - Historia del terremoto de Pedernales (2016) sentido Este - Oeste

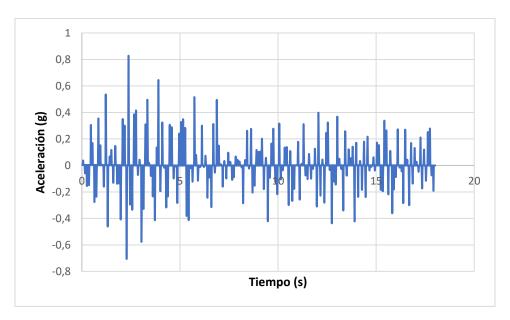


Figura 87. Tiempo - Historia del terremoto de Pedernales (2016) sentido Norte - Sur

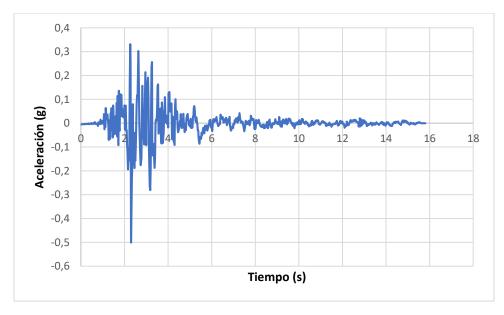


Figura 88. Tiempo - Historia del terremoto de El Centro (California, 1940), sentido Este - Oeste.

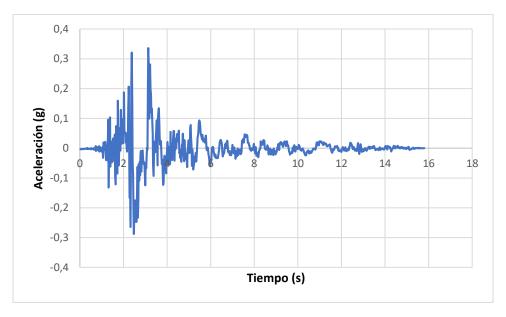


Figura 89. Tiempo - Historia del terremoto de El Centro (California, 1940), sentido Norte - Sur.

7.5.2. Resultados de la Prueba

Se realizó un test biaxial para los 3 Terremotos mencionados y se pueden observar los resultados de valores máximos en aceleraciones para la entrada real del sismo y los datos obtenidos por los acelerómetros en componentes Este - Oeste (x) y Norte - Sur (y).

Con la i instrumentación y adquisición de datos de la mesa vibratoria se obtuvieron limitaciones y solo se podía obtener resultados de 20 segundos del sismo por lo que se no se tenían el mismo número de datos de entrada que de salida. El ingreso y la adquisición de datos se lo hizo por medio de Matlab & Simulink.

7.5.2.1. Resultados Terremoto de Northridge

En la Figura 90 se puede observar las gráficas Tiempo – Historia del sismo de Northridge previo a la prueba experimental.

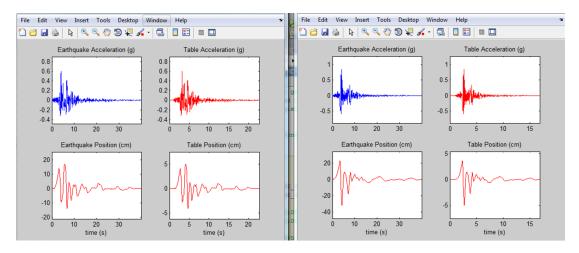


Figura 90. Tiempo - Historia del terremoto de Northridge previo a la prueba experimental

Los acelerómetros tienen una respuesta de datos para tiempo y aceleración entregados a través de Matlab. Esta lista de datos se la copia en Excel y se grafican los resultados (Figura 91 y Figura 92).

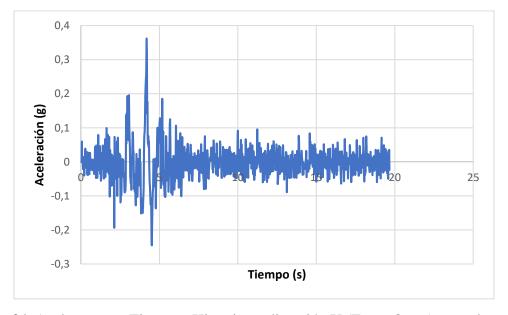


Figura 91. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección X (Este - Oeste) para el terremoto de Northridge obtenido de la prueba experimental

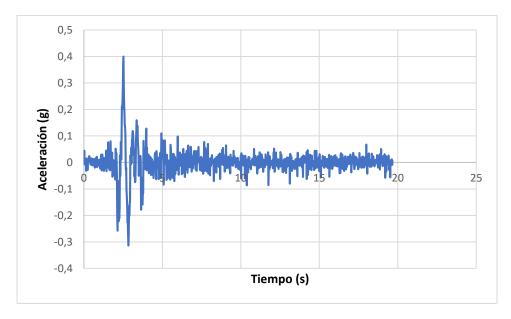


Figura 92. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Y (Norte - Sur) para el terremoto de Northridge. obtenido de la prueba experimental

Se puede concluir que existió reducción de aceleración respecto al Registro Tiempo – Historia original. Se puede Observar la comparación en la Figura 93 y Figura 94.

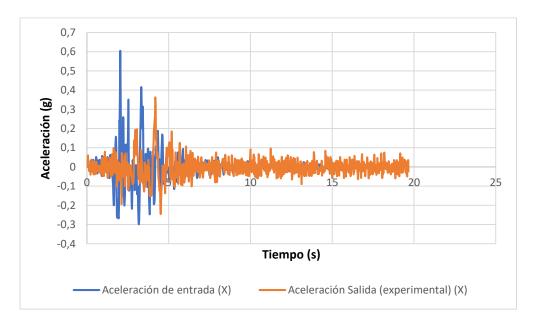


Figura 93. Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro experimental para el terremoto de Northridge. obtenido de la prueba experimental

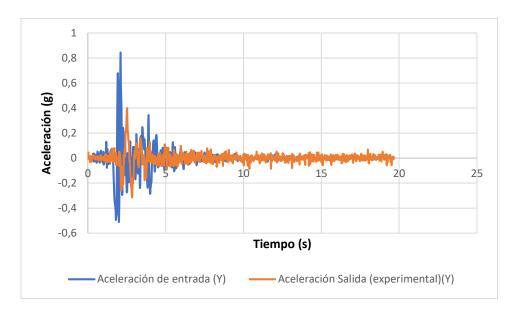


Figura 94. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro experimental para el terremoto de Northridge.

En la prueba experimental se pudo determinar que existe una reducción en la zona de alta aceleración pero en zonda de aceleración baja se puede observar una amplificación. En la tabla 30 se resume las aceleraciones máximas y el porcentaje de reducción entre el acelerograma original y el obtenido por los acelerómetros

Tabla 30:Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Northridge

Tiempo - Historia	a (X)	$\mathbf{a}(\mathbf{Y})$
Registro de entrada	0,60	0,84
Prueba Experimental	0,36	0,40
Reducción de aceleración	40%	53%

7.5.2.2.Resultados Terremoto de Pedernales

En la Figura 95 se puede observar las gráficas Tiempo – Historia del sismo de Pedernales (2016) previo a la prueba experimental. Como ya se mencionó en este caso se ingresaron y registraron únicamente los datos de la parte más crítica del terremoto ya que en la instrumentación y procesamiento de resultados del sistema de la mesa vibratoria tenia limitaciones y el sismo era de 800 segundos por lo que resultaba demasiado grande para el límite de salida de datos. El acelerograma en Matlab previo a la realización de la prueba se ilustra en la Figura 95.

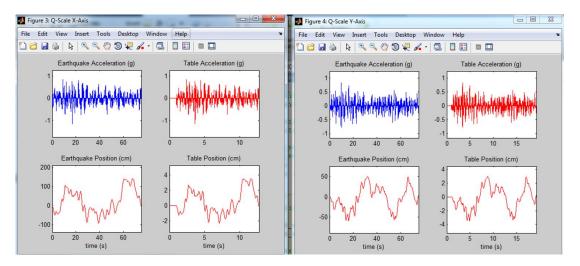


Figura 95. Tiempo - Historia del terremoto de pedernales previo a la prueba experimental.

Los acelerómetros tienen una respuesta de datos para tiempo y aceleración entregados a través de Matlab. Esta lista de datos se la copia en Excel y se grafican los resultados (Figura 96 y Figura 97).

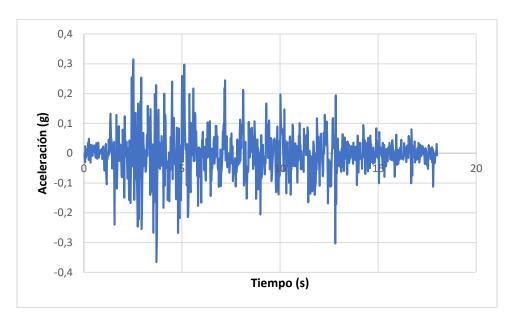


Figura 96. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección X (Este - Oeste) para el terremoto de Pedernales obtenido de la prueba experimental.

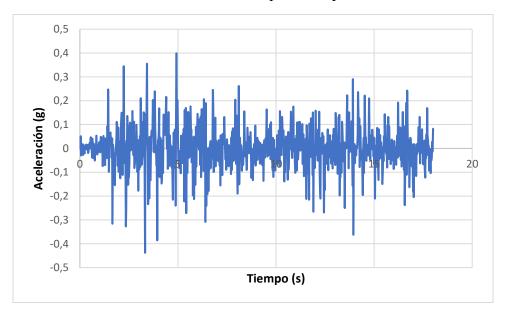


Figura 97. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Y (Norte - Sur) para el terremoto de Pedernales obtenido de la prueba experimental

La comparación de los acelerogramas ingresados con los que obtuvieron los acelerómetros se observa en la Figura 98 y Figura 99.

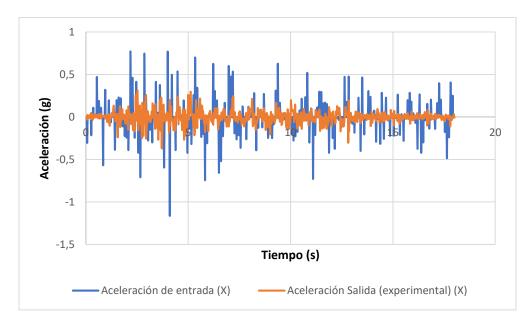


Figura 98. Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro experimental para el terremoto de Pedernales

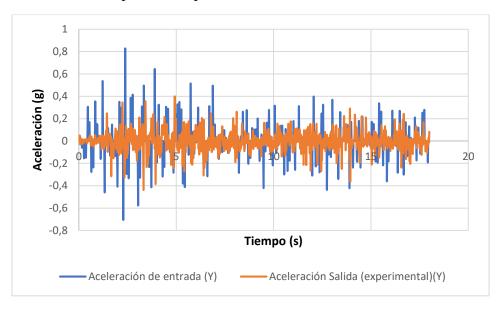


Figura 99. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro experimental para el terremoto de Pedernales.

Ya que se tomó en cuenta únicamente la zona de alta aceleración durante todo el tramo del Terremoto existe una reducción de aceleración utilizando el SHAB esto se ilustra en la Tabla 31.

Tabla 31:Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Pedernales.

Tiempo - Historia	a (X)	a(Y)	
Registro de entrada	1,16	0,82	
Prueba			
Experimental	0,36	0,43	
Reducción de aceleración	69%	53%	

7.5.2.3. Resultados terremoto de El Centro (California)

En la Figura 100 se puede observar las gráficas Tiempo – Historia del Terremoto de El Centro previo a la prueba experimental.

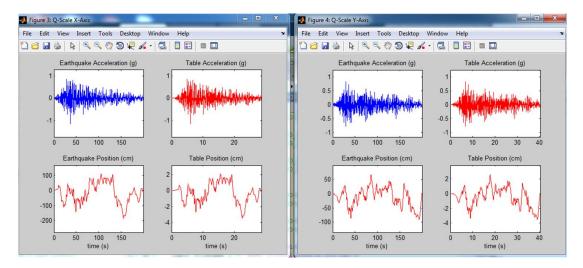


Figura 100. Tiempo - Historia del terremoto de El Centro previo a la prueba experimental.

Los acelerómetros tienen una respuesta de datos para tiempo y aceleración entregados a través de Matlab. Esta lista de datos se la copia en Excel y se grafican los resultados (Figura 101 y Figura 102).

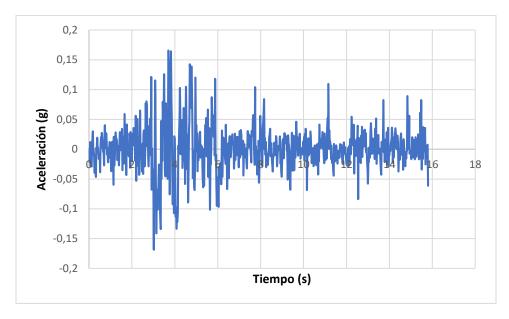


Figura 101. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección X (Este - Oeste) para el terremoto de El Centro obtenido de la prueba experimental

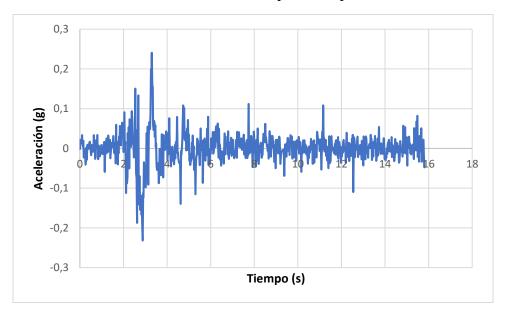


Figura 102. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Y (Norte - Sur) para el terremoto de El Centro obtenido de la prueba experimental.

Se puede concluir que existió reducción de aceleración respecto al Registro Tiempo – Historia original. Se puede Observar la comparación en la Figura 103 y Figura 104.

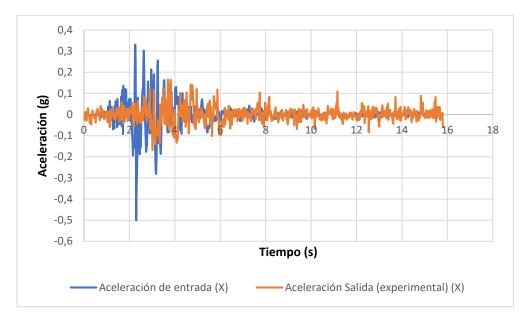


Figura 103. Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro experimental para el terremoto de EL Centro

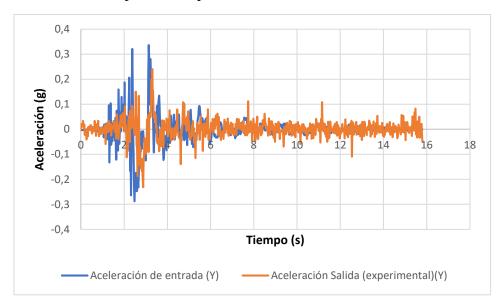


Figura 104. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro experimental para el terremoto de El Centro.

En la prueba experimental se pudo determinar que existe una reducción en la zona de alta aceleración pero en zonda de aceleración baja se puede observar una amplificación. En la tabla 32 se resume las aceleraciones máximas y el porcentaje de reducción entre el acelerograma original y el obtenido por los acelerómetros.

Tabla 32:Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de El Centro.

Tiempo -Historia	a (X)	a(Y)
Registro de entrada	0,50	0,33
Prueba Experimental	0,17	0,24
Reducción de aceleración	66%	28%

7.6. Resumen

Primero se reconoció la mesa de vibraciones donde se ejecutó la prueba para tomar medidas y realizar la construcción del prototipo y montarlo en la mesa de vibraciones, de acuerdo a los cálculos el aislador elastomérico híbrido (AEH) se lo construyo en la fábrica Cauchos Vikingo. Los aisladores friccionales y las bases del prototipo se construyeron con manufactura común en un taller particular. Una vez construido el prototipo se identificó la instrumentación, el software de adquisición de datos, se seleccionaron los Terremotos de prueba, luego se realizaron las tres pruebas para los terremotos de Northridge, Pedernales y El Centro. En los tres terremotos se obtuvieron reducciones en las aceleraciones máximas. Pero en zonas de baja aceleración el SHAB se comporta como una estructura rígida y existe amplificación.

CAPÍTULO VIII

8. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL SISTEMA HÍBRIDO DE AISLAMIENTO DE BASE (SHAB).

8.1. Introducción

La modelación numérica se puede representar como modelos no lineales asemejados a un modelo lineal como se puede diferenciar en la Figura 105. Con similitud en las curvas de histéresis y sus parámetros fundamentales son la rigidez inicial, la rigidez post fluencia y la rigidez afectiva, los desplazamientos de la estructura. El modelo computacional puede realizarse por dos métodos: El análisis modal-espectral o el método de análisis tiempo-historia. El programa computacional de análisis estructural permite la modelación de aisladores sísmicos elastoméricos y friccionales, pudiendo ser representados con modelos no lineales, ingresando los parámetros dinámicos principales de los aisladores y los desplazamientos positivos y negativos.

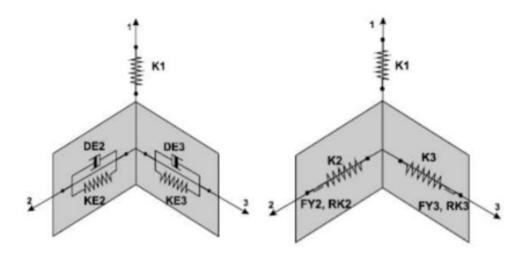


Figura 105. Modelo lineal y no lineal Fuente: (Proaño, 2014)

Primeramente es necesario realizar el análisis estático descrito en los anteriores puntos ya que los resultados son aproximaciones reales del sistema.

8.2. Análisis modal espectral

Permite ilustrar una mayor cantidad de casos que el análisis estático para tener una estimación de los desplazamientos y fuerzas en los elementos estructurales. Mediante un espectro de diseño se calcula los valores máximos de desplazamientos y aceleraciones, teniendo en cuenta consideraciones adicionales de los códigos de diseño. Para realizar este análisis es necesario generar un espectro de pseudo aceleraciones. (ARQHYS, 2012)

8.3. Análisis Tiempo - Historia

El análisis tiempo historia debe realizarse mediante pares de componentes horizontales de registros consistentes con el sismo de diseño. Este análisis no lineal es más completo que el análisis estático ya que toma en cuenta diferentes situaciones en las que puede estar sometida una estructura o un elemento considerando posibles deformaciones permanentes que no son tomadas en cuenta en el caso lineal, se puede utilizar un modelo lineal con equivalencia a un modelo no lineal. Los aisladores son modelados mediante modelos bilineales. (Muñoz, 2013).

8.4. Dimensionamiento del sistema

Se toman las mimas distancias entre aisladores del sistema de prueba. Siento interpretado con una estructura rígida de 50x50 cm como se indica en la Figura 106.

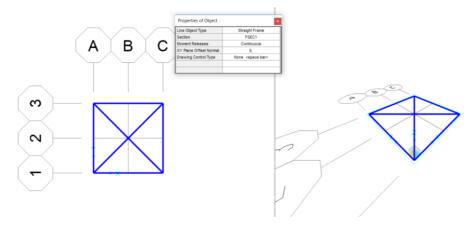


Figura 106. Dimensionamiento de base aislada

8.5. Obtención e ingreso de propiedades de aisladores al software

Se debe tener en cuenta que clase de análisis de va a realizar para el modelamiento de las aisladores en el software de análisis estructural. En este caso se realizará un análisis Tiempo-Historia

8.5.1. Propiedades del aislador elastomérico

Las propiedades que el software requiere para el análisis Tiempo-Historia son:

Effective Stiffness (*linear*): Rigidez vertical (este valor no está calculado porque no influiría en los resultados pero se puede tomar un valor lo sufrientemente grande para tener estabilidad) se considerará 20000 kN/m.

Weight: Peso de la estructura, el peso sísmico que se utilizó fue de 68 kg y mediante un proceso de distribución de áreas se calcula la carga vertical que soporta cada aislador como se indica en la Figura 107.



Figura 107. Porcentaje de peso que soporta cada aislador

Por lo que el peso que soporta el aislador elastomérico es 17 kg = .0.17

Effective Stiffness (Non linear)(K_H): Es la rigidez efectiva horizontal de acuerdo al período efectivo calculado de 2 segundos se procede a calcular la rigidez efectiva como se calculó en el capítulo 5.

$$K_H = \frac{4\pi W}{T g}$$

Donde:

W:Peso del sistema

T:Pperíodo efectivo

g: Gravedad

Por lo tanto:

$$K_H = \frac{4\pi^2 68 \, kg}{(2 \, s)^2 \, 9.8 \, m/s^2} = 68.48 \frac{kg}{m} = 0.67 \frac{kN}{m}$$

 $Stiffness(K_V)$: Rigidez inicial este valor es más grande que la rigidez efectiva por lo general diez veces más por lo tanto la rigidez inicial es 3.35 kN/m.

Post Yiel Stiffness Ratio (RK): Valor que indica una relación entre la rigidez posterior a la fluencia y la rigidez elástica, para este caso es de 0.2.

Yield Force (*Fy*): Fuerza de fluencia del aislador que es calculada multiplicando la masa del aislador por la máxima fuerza g que tendrá el sismo sumulado la cual es de 1.5 por lo tanto

$$FY = 1.5 \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) X 68.48 \text{ kg} = 999.6 \text{ N} = 1 \text{ kN}.$$

8.5.2. Ingreso de propiedades del aislador elastomérico

A continuación en la Tabla 33 se ilustra el resumen de las propiedades del aislador elastomérico.

Tabla 33Tabla de propiedades del aislador elastomérico para el ingreso al software

Tue tet die propredicties der distilies.	cicibionicited	para et ingrese ai sejimare
Effective Stiffness (linear)	K_v	20000 kN
Effective Stiffness (non linear)	K_H	0.67 kN/m
Weight	W	0.17 kN
Stiffness	K	3.35 kN/m
Post Yield Stiffness ratio	RK	0.2
Yield Force	Fy	1 kN

El ingreso de datos se lo realiza en el menú "Define" en propiedades de sección en la pestaña Link Suport y se puede ver en la Figura 108

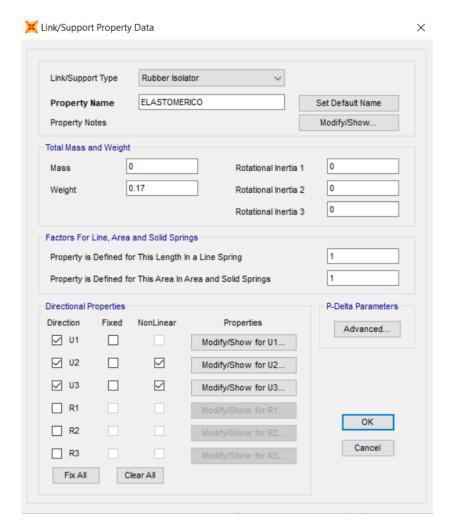


Figura 108. Ingreso de datos del aislador elastomérico

Luego se ingresa las propiedades según las direcciones a las que el aislador estará sometido a esfuerzos. U1 es la dirección vertical Z, U2 Y U3 son direcciones Horizontales tanto para X como para Y la Figura 109 indica el ingreso de datos para las direcciones mencionadas para linealidad (U1) y la Figura 110 para las propiedades de no linealidad (U2 Y U3).

Property Name	ELASTOME	RICO
2000 C	U1	
Direction		
Туре	Rubber Isolator	
NonLinear		
roperties Used For All A	analysis Cases	
Effective Stiffness		20000
Effective Damping		0,

Figura 109. Propiedades en dirección U1 del aislador elastomérico

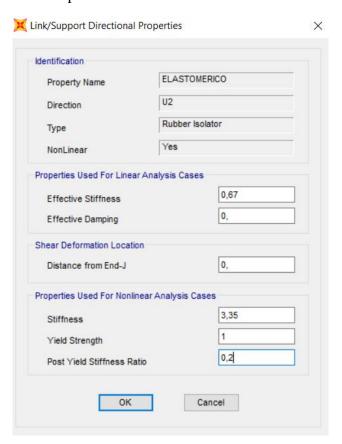


Figura 110. Propiedades en dirección U2 del aislador elastomérico

8.5.3. Propiedades del aislador friccional

De igual manera los aisladores friccionales tienen propiedades de linealidad y no linealidad.

Las propiedades para los cuatro aisladores friccionales son:

Weight (W): Peso de la estructura como se mencionó en el anterior punto cada aislador friccional soportará el 18.75% de la carga. Por lo tanto la carga será de 0.125 kN.

Friction Coeficient fast (u_s) : Coeficiente de fricción rápido, es el coeficiente de fricción estático el cual fue estudiado en el capítulo 4 y un valor promedio entre las superficies de acero inoxidable y PTFE es 0.09.

Friction Coeficient Slow (u_d) :: Coeficiente de fricción lento, es el coeficiente de fricción dinámico el cual fue estudiado en el capítulo 4 y un valor promedio entre las superficies de acero inoxidable y PTFE es 0.05.

Rate parameter: Parámetro de velocidad,

Net pendulum Radius (*R*): Radio de la superficie deslizante, ya que es una superficie plana el radio tiende a infinito por lo que se colocará un valor muy grande.

Stiffness(K): Rigidez efectiva, Ya que es un aislador friccional de superficies planas presentará una rigidez cercana a cero por lo que se debe ingresar un valor bajo muy bajo tanto para U1, U2 Y U3. Para U1 la rigidez es grande, en caso de U2 Y U3 Es calculada por la ecuación:

$$K = \frac{W}{R} + \frac{U \times W}{D} \tag{8.1}$$

(Naeim, Seismic Design Handbook, 1989)

Dónde: D es el desplazamiento utilizado, el mismo que es igual a 10 cm.

$$K = \frac{0.12 \, kN}{1000000} + \frac{0.05 \times 0.17}{0.1m} = 0.085 \, kN/m$$

8.5.4. Ingreso de propiedades del aislador friccional

A continuación en la Tabla 34 se ilustra el resumen de las propiedades del aislador friccional.

Tabla 34: *Tabla de propiedades del aislador friccional para el ingreso al software*

Fricctional coeficient fast	u_s	0.09
Frictional coeficient slow	u_d	0.05
Weight	W	0.125 kN
Stiffness	K	0.01 kN/m
Net pendulum radius	RK	1000000
Rate parameter	r	1

El ingreso de datos se lo realiza en el menú "Define" en propiedades de sección en la pestaña Link Suport y se puede ver en la Figuras 111, 112, y 113.

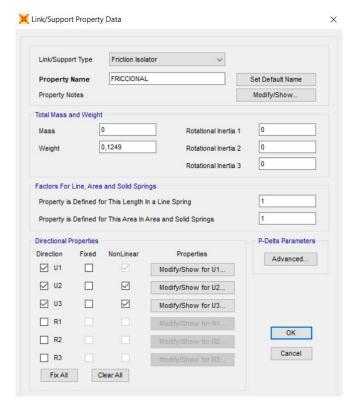


Figura 111. Ingreso de datos para el aislador friccional

Luego se ingresa las propiedades según las direcciones a las que el aislador estará sometido a esfuerzos.

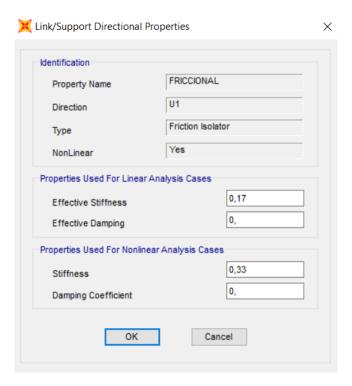


Figura 112. Propiedades en dirección U1 del aislador friccional

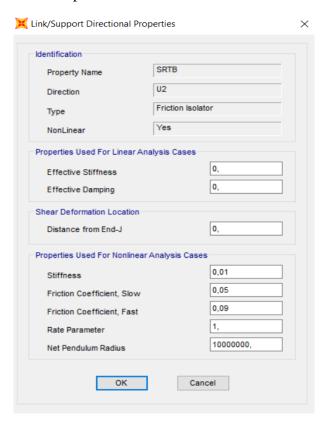


Figura 113. Propiedades en direcciones U2 Y U3 del aislador friccional

Posteriormente se colocan los aisladores dentro del cuerpo como se puede ver en la Figura 114.

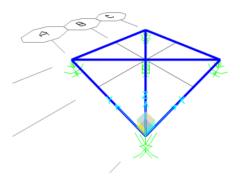


Figura 114. Cuerpo rígido con aisladores sísmicos híbridos

8.6. Ingreso de los registros Tiempo-Historia

Se ingresan los registros de los sismos utilizados en la prueba experimental tanto para coordenadas N (Y) como E (X) como se ilustra en la Figura 115 y 116.

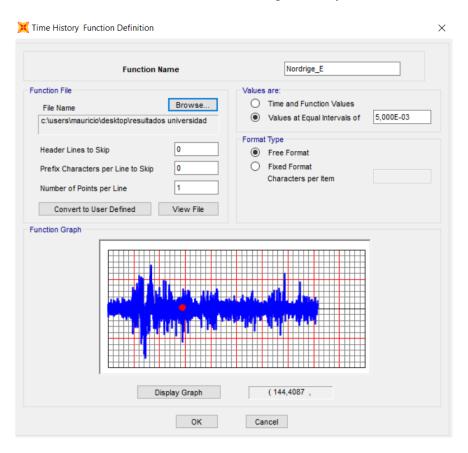


Figura 115. Ingreso de datos Tiempo-Historia del sismo de Nordrige de la componente E

Una vez ingresadas las componentes de los sismos se tiene en siguiente cuadro de funciones como se muestra en la Figura 116.

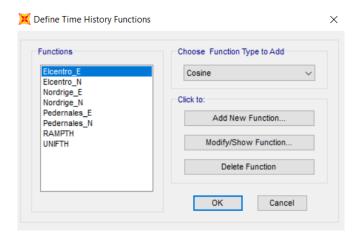


Figura 116. Datos Tiempo-Historia de los registros sísmicos ingresados al software

8.7. Definición de casos de carga

8.7.1. Análisis modal

Se establece un total de 16 modos y se trabaja con vectores de Ritz y se introducen las direcciones de las aceleraciones como se ilustra en la Figura 117.

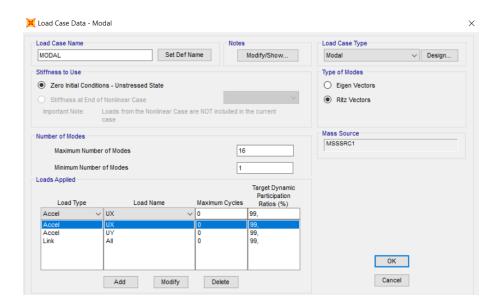


Figura 117. Datos para el análisis modal

8.7.2. Carga muerta

La carga muerta se ingresa a modo de una función rampa ya que será creciente al aumentar su aceleración, se trabaja con un tipo de modelo Tiempo – Historia no lineal y se establece el número de datos que se desea recibir en la salida del programa (Figura 118).

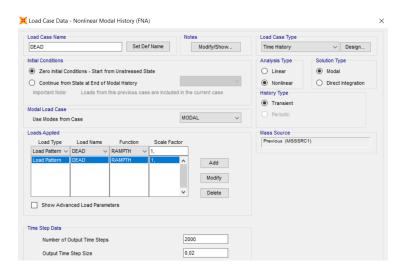


Figura 118. Definición de carga muerta

8.7.3. Terremoto

El terremoto se define como una función Tiempo – Historia, como un modelo no lineal el cual comienza luego de la carga muerta establecida y se seleccionan las componentes de cada sismo según su dirección y el número de datos que se desea recibir como resultado. Se realizó lo mismo para cada uno de los terremotos que se Estudiaron (Figura 119 y Figura 120).

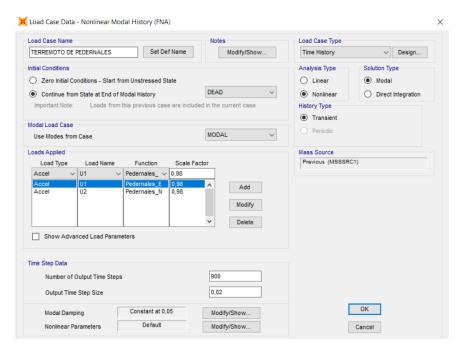


Figura 119. Definición del terremoto

Se verifica que estén ingresados los casos de carga para realizar la corrida del programa.

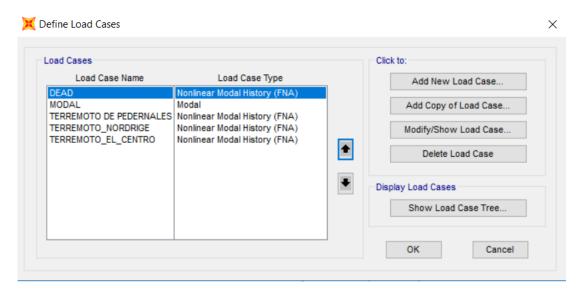


Figura 120. Verificación de los casos de carga

8.8. Ejecución del modelamiento y obtención de resultados

8.8.1. Ejecución del modelamiento

Se realiza la corrida mediante el botón Run Análysis verificando que los Terremotos ingresados no actúen simultáneamente como se indica en la Figura 121

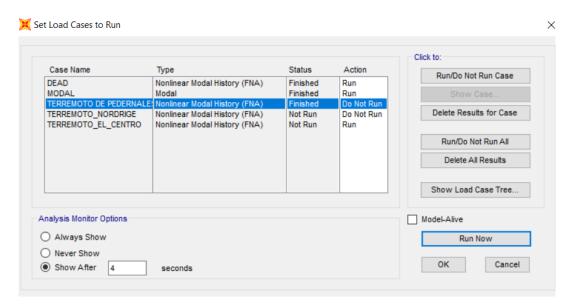


Figura 121. Establecimiento de casos de carga para ejecutar el modelo.

Aparecerá la estructura deformada como prueba de que existieron desplazamientos en los aisladores como se observa en la Figura 122

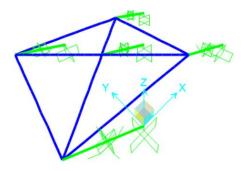


Figura 122. Movimiento de estructura después de ser sometida al terremoto.

Para pueden observar los resultados con el menú Display >> Show plot functions. Se obtienen los resultados por medio de las juntas y se puede observar el acelerograma de salida en las Figuras 123,124 y 125. Éstas Figuras muestran la gráfica Tiempo — Historia en X de los tres terremotos utilizados para el caso de estudio.



Figura 123. Acelerograma Tiempo - Historia en X del terremoto de Northridge obtenidos del modelamiento en el software

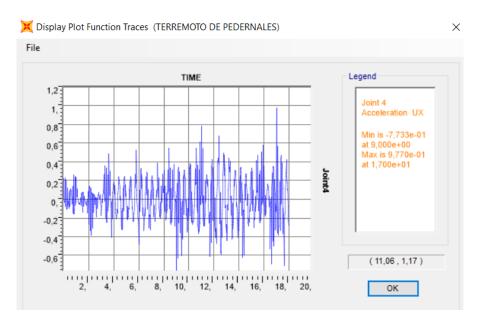


Figura 124. Acelerograma Tiempo - Historia en X del terremoto de Pedernales obtenidos del modelamiento en el software

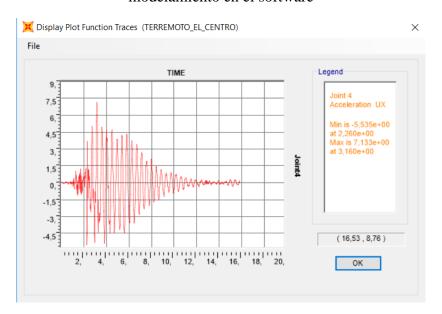


Figura 125. Acelerograma Tiempo - Historia en X del terremoto de El Centro obtenidos del modelamiento en el software

8.8.2. Resultados del modelamiento

Las respuestas de los acelerogramas Tiempo – Historia de los terremotos se obtuvo de forma biaxial en componentes Este - Oeste (x) y Norte - Sur (y).

8.8.2.1. Análisis de resultados del terremoto de Northridge

Los datos obtenidos del SAP2000 Son trasladados a Excel para realizar una comparación entre los resultados obtenidos por el Software y los registros de entrada, la Figura 126 y Figura 127 muestran las gráficas de aceleración y tiempo obtenidos por SAP2000 para X y para Y mientras las Figuras 128 y 129 ilustran la comparación entre el acelerograma original y el obtenido por el software con aislamiento de base.

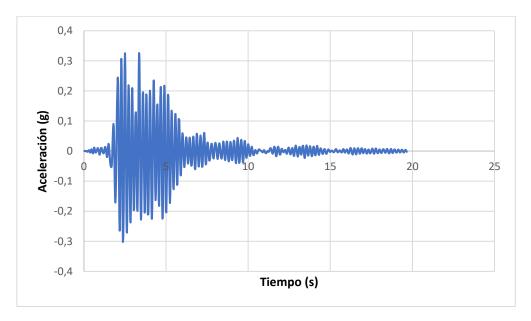


Figura 126. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Este – Oeste (X) para el terremoto de Northridge obtenido del software.

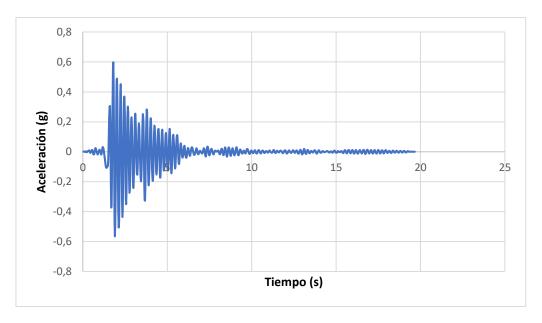


Figura 127. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Norte – Sur (Y) para el terremoto de Northridge obtenido del software.

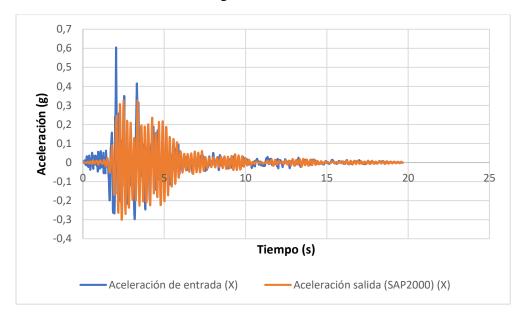


Figura 128. Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro del software para el terremoto de Northridge

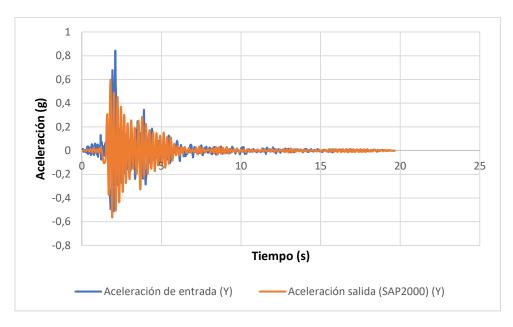


Figura 129. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro del software para el terremoto de Northridge

Se puede observar que existe reducción en las aceleraciones máximas pero no existe reducción en las zonas de frecuencia característica. Aparentemente se reduce la intensidad del sismo pero empieza a tender al decrecimiento independiente de los registros de entrada. La Tabla 35 muestra las aceleraciones máximas y el porcentaje de reducción entre el acelerograma original y el obtenido por el software.

Tabla 35:Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Northridge entre datos de ingreso y los resultados obtenidos del software.

Tiempo -Historia	a (X)	a(Y)
Registro de entrada	0,6044809	0,84329762
Software	0,3261195	0,5982165
Reducción de aceleración	46%	29%

8.8.2.2. Análisis de Resultados del Terremoto de Pedernales

Al igual que en la prueba experimental se ingresó solo los registros más críticos del Terremoto de pedernales. La Figura 130 y Figura 131 muestran las gráficas de aceleración y tiempo obtenidos por el software para X y para Y mientras las Figuras 132 y 133 ilustran la comparación entre el acelerograma original y el obtenido por el software con aislamiento de base.

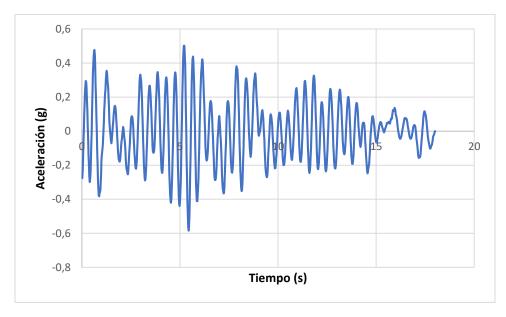


Figura 130. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Este – Oeste (X) para el terremoto de Pedernales obtenido del software.

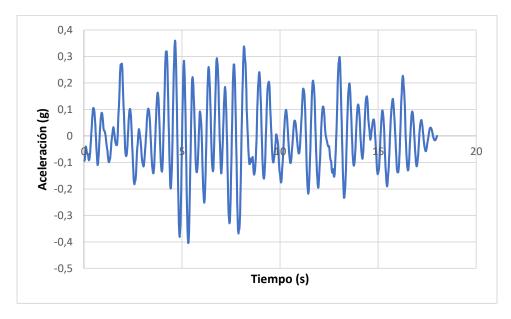


Figura 131. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Norte – Sur (Y) para el terremoto de pedernales obtenido del software.

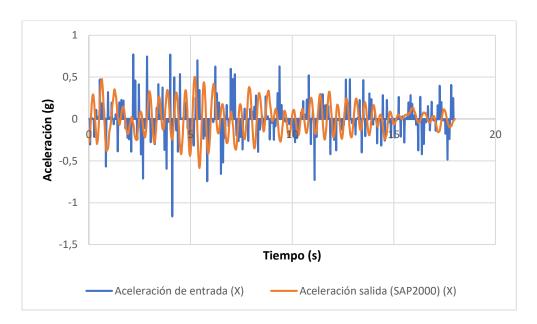


Figura 132. Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro del software para el terremoto de Pedernales.

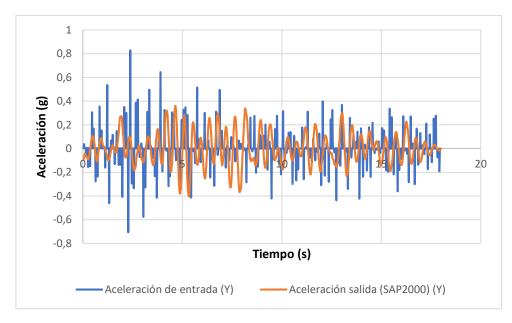


Figura 133. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro del software para el terremoto de Pedernales.

Existe una reducción de la aceleración en casi todo el tramo utilizado del Terremoto. La Tabla 36 muestra las aceleraciones máximas y el porcentaje de reducción entre el acelerograma original y el obtenido por SAP2000.

Tabla 36:Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de Pedernales entre datos de ingreso y los resultados obtenidos del software.

Tiempo -Historia	a (X)	a(Y)	
Registro de entrada	1,16381241	0,82843085	
Software	0,58465	0,4047	
Reducción de aceleración	50%	51%	

8.8.2.3. Análisis de resultados del terremoto de El Centro (California)

La Figura 134 y 135 muestran las gráficas de aceleración y tiempo obtenidos por el software de análisis estructural para X y para Y mientras Las Figuras 136 y 137 ilustran la comparación entre el acelerograma original y el obtenido por el software con aislamiento de base.

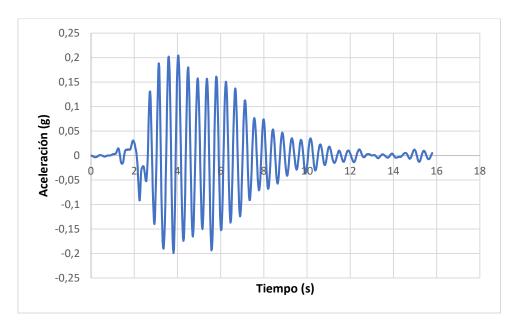


Figura 134. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Este – Oeste (X) para el terremoto de El Centro obtenido del software.

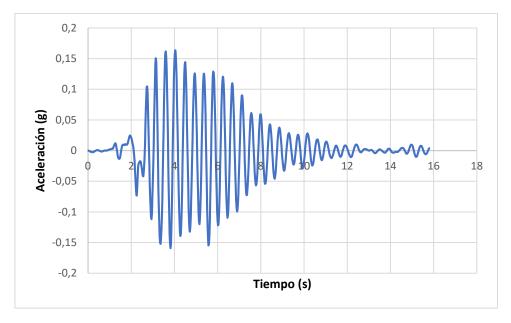


Figura 135. Acelerograma Tiempo - Historia en dirección Norte – Sur (Y) para el terremoto de El Centro obtenido del software.

Se puede observar que el acelerograma obtenido por el software no sigue la forma del acelerograma original aun así existe una reducción de aceleración máxima.

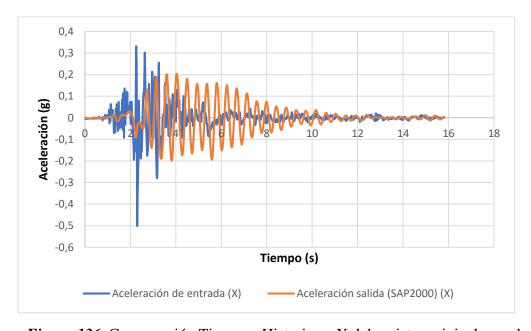


Figura 136. Comparación Tiempo - Historia en X del registro original con el registro del software para el terremoto de El Centro.

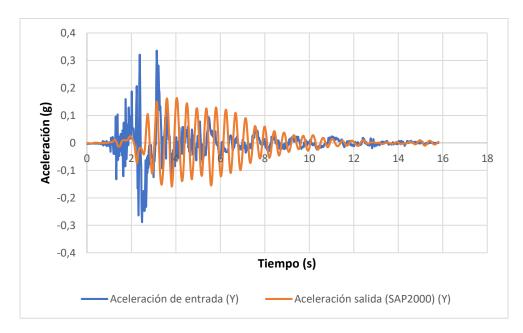


Figura 137. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro original con el registro del software para el terremoto de El Centro.

La Tabla 37 muestra la comparación entre los datos originales de ingreso y los datos obtenidos por el Software para las aceleraciones máximas.

Tabla 37:Comparación de aceleraciones máximas para el terremoto de El Centro entre datos de ingreso y los resultados obtenidos del software.

Tiempo -Historia	a (X)	a(Y)
Registro de entrada	0,5010995	0,33611621
Software	0,2046368	0,16370944
Reducción de aceleración	59%	51%

8.9. Comparación entre los resultados experimentales y la simulación computacional

Se puede concluir que existe mayor amortiguamiento en los resultados experimentales y representan un acelerograma más semejante al original. En las Figuras 138 hasta la 143. Se ilustran las gráficas comparativas de los acelerogramas obtenidos de la simulación computacional y de la

prueba experimental. En coordenadas Dirección Este – Oeste y Norte – sur para los tres terremotos estudiados en el caso de estudio.

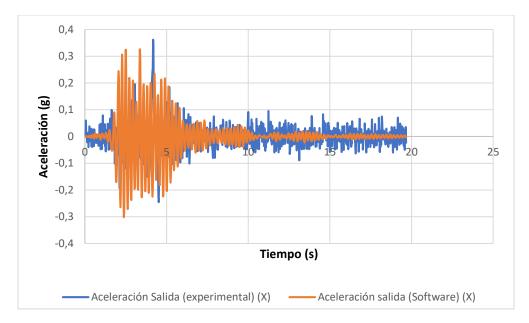


Figura 138. Comparación Tiempo - Historia en X del registro de la prueba experimental con el registro del software para el terremoto de Northridge.

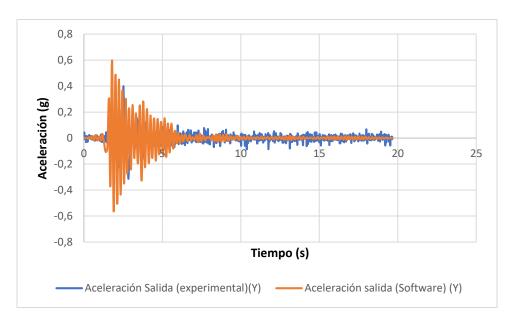


Figura 139. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro de la prueba experimental con el registro del software para el terremoto de Northridge.

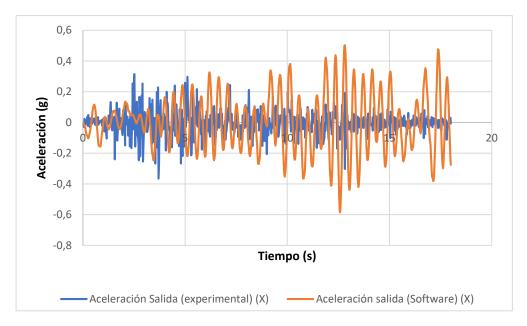


Figura 140. Comparación Tiempo - Historia en X del registro de la prueba experimental con el registro del software para el terremoto de Pedernales.

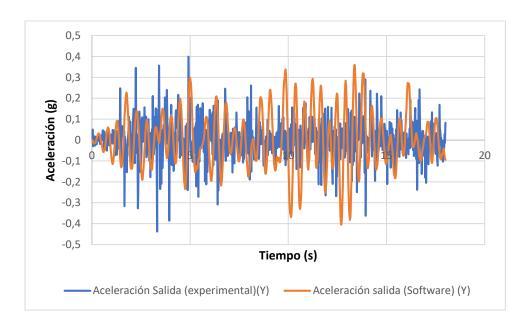


Figura 141. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro de la prueba experimental con el registro del software para el terremoto de Pedernales.

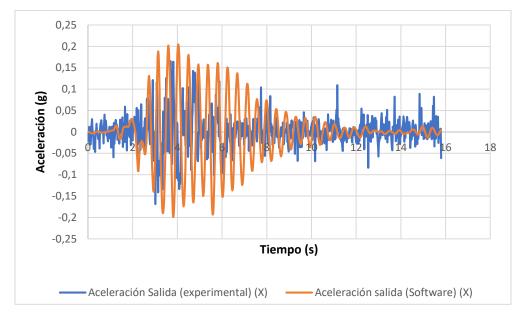


Figura 142. Comparación Tiempo - Historia en X del registro de la prueba experimental con el registro del software para el terremoto de El Centro.

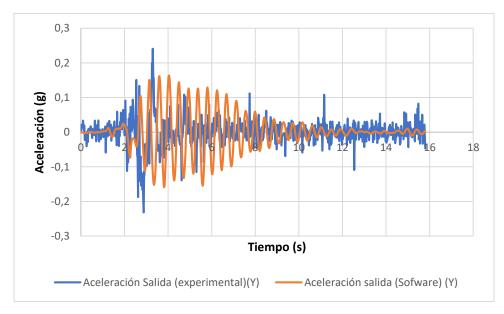


Figura 143. Comparación Tiempo - Historia en Y del registro de la prueba experimental con el registro del software para el terremoto de El Centro.

De acuerdo a los Acelerogramas se puede realizar una comparación de las aceleraciones máximas para los 3 terremotos (Tabla 38)

Tabla 38: *Comparación de las aceleraciones máximas*

Terremoto	Northri	dge	Pedernal	es	El Centr	0
Tiempo -Historia	a (X)	a(Y)	a (X)	a(Y)	a (X)	a(Y)
Prueba Experimental	0,3623	0,3994	0,3654	0,4382	0,1655	0,2406
Software	0,3261	0,5982	0,5847	0,4047	0,2046	0,1637
Variación	10%	50%	60%	8%	24%	32%

Se puede afirmar que ninguno tiene un mejor amortiguamiento que otro o viceversa pero en el caso del acelerograma obtenido del SAP2000 se puede decir que es simétrico respecto al eje x y no necesariamente se asemeja al original.

8.10. Resumen

Para realizar la simulación computacional se reconoció lo que corresponde un análisis Tiempo – Historia, el cual fue realizado para la validación de resultados. Se realizó el dimensionamiento del sistema en el software para luego determinar e ingresar las propiedades de los aisladores híbridos, luego de eso se ingresaron los registros Tiempo – Historia utilizados en el análisis experimental posteriormente se definieron los casos de carga donde se empleó el análisis modal, la carga muerta y los terremotos, estos actuando por separado por último se ejecuta el modelo y se obtienen los resultados, estos resultados tiene un amortiguamiento en las zonas de alta aceleración pero una aparente amplificación en las zonas de aceleración baja.

CAPÍTULO IV

9. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1. Conclusiones

- 1. Mediante el estudio del arte se pudo concluir que en el mundo no se ha implementado en gran cantidad dispositivos de aislamiento sísmico para edificaciones pequeñas ya que representaría un alto porcentaje en el costo de la vivienda, sin embargo si se desarrollan sistemas de baja complejidad de construcción se pueden reducir estos costos dando apertura a la implementación de sistemas de aislamiento de base en viviendas unifamiliares y bifamiliares en estructuras de pequeña masa sísmica.
- 2. Para el diseño del sistema híbrido se debe tomar en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales elasto plásticos y los materiales con un bajo coeficiente de Fricción aprovechando las ventajas de cada uno. Se emplearon aisladores friccionales para disipar mayor cantidad de energía sísmica y soportar la mayor parte de la carga vertical mientras la utilización del elastómero es para proporcionar una rigidez al sistema y garantizar el regreso de la estructura a su posición inicial después de ser sometida a un Sismo.
- 3. Mediante la construcción del prototipo se pudo verificar el diseño ya que tuvo una respuesta exitosa al ser sometido a los Terremotos de Northridge (1994), Pedernales (2016) y El Centro (1940) presentando reducciones en las aceleraciones máximas hasta en un 60%. Lo que en una vivienda unifamiliar ayudaría a evitar una posible falla.

- 4. El diseño se realizó para obtener un periodo efectivo de 2 segundos y mediante la prueba experimental de White noise se determinó una frecuencia característica aproximada a 0.5 Hz teniendo un período efectivo aproximado al deseado de 2 segundos.
- 5. Se presentaron limitaciones en la ejecución de la prueba experimental ya que el tiempo de entrada tenía que ser comprimido para tener un tiempo de salida menor a los 20 segundos ya que ese era el límite de salida de datos del sistema de prueba y el personal que opera sobre el mismo no conocía el motivo de aquello. Se concluye que esta limitación influye en los resultados obtenidos debido a que no es muy preciso comparar datos escalados de una manera diferente.
- 6. Se estableció una proximidad entre los datos experimentales y los datos obtenidos en la simulación computacional, en los dos casos se pudo observar una reducción en zonas de alta aceleración pero en la experimentación el acelerograma Tiempo Historia trataba de replicar la forma del acelerograma original ingresado, mientras que en los resultados obtenidos por el software se observó una gráfica decreciente en el tiempo pero esta no parecía tener mucha dependencia con el acelerograma original.
- 7. En la simulación experimental y computacional del Terremoto de Pedernales se tomó solo los datos de la parte más crítica del acelerograma ya que los registros originales llegaban a ser de 800 segundos y los datos de salida del sistema de prueba solo podían replicar 20 segundos y para poder establecer una comparación se realizó lo mismo en el ingreso de datos del modelamiento computacional.
- 8. El sistema híbrido de aislamiento de base (SHAB) planteado tuvo un funcionamiento favorable y su construcción e implementación. Son sencillas y no requieren procesos ni costos elevados.

9.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- Antes de realizar un modelamiento computacional se debe entender los principios físicos y
 las propiedades mecánicas de los elementos que formaran parte del modelo para tener un
 panorama más claro de lo que concierne al problema y poder plantear y desarrollar las
 alternativas de solución.
- 2. Trabajar y desarrollar elementos de instrumentación y adquisición de datos para la realización de pruebas experimentales y el manejo de programas computacionales de elementos finitos para el modelamiento previo de un caso de estudio ya que en ese campo se encuentra la evolución de la ingeniería de investigación.
- 3. El Ecuador carece de maquinaria para realizar este tipo de ensayos con dimensiones reales y se limitan la posibilidad de validar diseños hechos en el país, teniendo que realizar este tipo de pruebas en el extranjero por lo que se recomienda construir o adquirir maquinaria e instrumentación para la ejecución de este tipo de pruebas.
- 4. Realizar futuros estudios de varios tipos de aisladores en tamaño real y desarrollar nuevas configuraciones para comprobar la eficiencia de estos dispositivos con el fin de tener información comparativa y desarrollar conclusiones más exactas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, A. A. (19 de Junio de 2007). *Tipos de amortiguamiento*. Obtenido de https://dokumen.tips/documents/tipos-de-amortiguamiento.html
- AISC. (2010). Specification for Structural Steel Buildings.
- Aparicio, G., Armas, H., & Ciaccia, M. (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *Revista ingeniería UC. Vol. 14,Nº 1*, 57-63.
- ARQHYS. (2012). Analisis modal espectral de estructuras resistentes a los sismos. *ARQHYS*. Obtenido de https://www.arqhys.com/arquitectura/analisis-modal-espectral.html.
- Auqui, P. M. (2010). Análisis de Aisladores Sísmicos Elastoméricos construidos en Ecuador.

 Sangolquí. Obtenido de https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2614/1/T-ESPE-029822.pdf
- Brown, R. (1996). *Physical Testing of Rubber*, (Tercera ed.). Londres: Chapman and Hall.
- Brown, R. (1996). Physical testing of Rubber, Tercera Edición. Londres: Chapman and Hall.
- C. Christopopous, A. Filiatrault. (2008). *Principles of basic supelemental damping and seismic isolation*. Toronto, Canada: Multimedia Cartano.
- Campbell, T. I., & Kong, W. (1987). Laboratory Studies of Friction in TFE Slide Surfaces of Bridge Bearings. Report ME-89-94, Ministry of Transportation and Comunication, Ontario Canada.

Chalhoub, M. S., & Kelly, J. (01 de Enero de 1990). Sliders and tension controlled reinforced elastomeric bearings combined for earthquake isolation. *Earthquake Engineering & Sstructural Dynamics*, 19,3, 333-344.

Comission, California Buildings Standar. (2001).

docsity.com. (08 de 03 de 2018). *docsity.com*. Obtenido de docsity.com: https://www.docsity.com/en/stick-slip-behavior-seismology-lecture-slides/377729/#_=_

Edwards, H., & Penney, D. (2001). Ecuaciones Diferenciales. México: Pearson Prentice Hall.

Fujita, K. (1991). A World City and Flexible Specialization: Restructuring of the Tokyo Metropolis.

Tokio .

Gent, A. N., & Lindley, P. (1959). The compression of bonded rubber blocks. Londres.

Hills, D. (1971). Heat Transfer and Vulcanization of Rubber.

HRD. (2014). HRD. Obtenido de Base Isolated House: http://www.hrd-s.com/pro_base.html

Kelly, J. M., & Constantinidis, D. A. (2011). *Bearings for Seismic and Vibration Isolation* (Vol. 1). Berkeley, USA.

Krim, J. (1996). Friction at the Atomic Scale (Vol. 275). Scientific American.

Legrá, I., & Quiza, R. (2012). Solución de problemas de vibraciones mecánicas utilizando método de elementos finitos. Obtenido de Obtenido de Universidad de Matanzas "Camilo

Cienfuegos":

http://monografias.umcc.cu/monos/2012/facultad%20de%20ingenierias/mo12124.pdf

- M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Y. Kalpakidis, D.M. Fenz. (2007). *Performance of Seismic Isolation*. Buffalo, State of California.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2013). Diseño de Estructuras de acero. México: Alfaomega.
- Moehle, J. P. (2003). "A Framework for performance-based Earthquake Engineering",

 Procedings, Tenth US-Japan Workshop on inprovement of Building Seismic Desing and

 Constrution Practices, Report ATX-15-9, Applied technology Council. Redwood.
- Muñoz, J. (2013). Análisis y diseño de una estructura hospitalaria con aisladroes sísmicos en la ciudad de Arequipa. Arequipa.
- Naeim, F. (1989). Seismic Design Handbook. New York: Springer Science & Business Media.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice.
- Naeim, Kelly . (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice.
- NEC-SE-CG. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción (Cargas no sísmicas). Quito: Dirección de Comunicación Scial.
- NEC-SE-DS. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construción (Cargas sísmicas, Diseño sismo resistente). Quito.

NEC-SE-VIVIENDA. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción (Viviendas de hasta dos pisos con luces de 5m). Quito.

Quanser. (2012). Shake table III.

Rabinowicz, E. (1995). Friction and Wear of Materials. New York: Wiley & Sons,inc.

Staton, J., & Roeder, C. (1982). *Elastomeric Bearings Design, Construction and Materials*. NCHRCP Report 248, Washingtong, D.C.

Symans, M. (2010). Desing Examples Seismic Isolation Instructional.

Sysprotec. (8 de Enero de 2018). *Sysprotec.cl*. Obtenido de https://www.sysprotec.cl/products/aisladores-sismicos

UBC. (1997). Código Uniforme de la Edificación.

Vargas, C. D. (2016). Registro del Estudio Pionero en Chile de Aisladores Sísmicos Elastoméricos Para Aplicación en Edificios de Baja Altura. Santiago de chile.