

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**TESIS**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE  
AISLAMIENTO SÍSMICO DE BAJO COSTO Y BAJO  
AMORTIGUAMIENTO USANDO DIFERENTES TIPOS DE  
MATERIAL ELASTÓMERO”**

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

**ELABORADO POR  
DIEGO ALEJANDRO VELÁSQUEZ ACEVEDO  
ID: 0000-0003-1713-303X**

**ASESOR  
Dr. ROY ERICKSEN REYNA SALAZAR  
ID: 0000-0003-1378-1769**

**LIMA-PERÚ  
2024**

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados  
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,  
con fines estrictamente académicos.”**  
Velásquez Acevedo, Diego Alejandro  
dvelasqueza@uni.pe  
933918066

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres, y en especial a mi madre Melania por la confianza y el cariño que siempre me mostró; y a mis hermanos Jhomar y Deysi por ser un gran impulso para salir adelante. Espero que este logro los llene de felicidad tanto como a mí

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi asesor, el Dr. Roy Reyna, por la guía y confianza durante la realización de la presente investigación. A mis colegas por su apoyo y por los buenos momentos que pasamos juntos. Un agradecimiento especial al Laboratorio de Estructuras del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID y a su equipo técnico por el apoyo durante la realización de los ensayos de laboratorio.

## ÍNDICE

<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Prólogo.....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de símbolos y siglas .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo I: Introducción.....</b>	<b>17</b>
1.1 Generalidades.....	17
1.2 Descripción del problema de investigación .....	18
1.2.1 Objetivo General: .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos: .....	19
1.3 Hipótesis del estudio .....	19
1.4 Metodología .....	19
<b>Capítulo II: Marco teórico y conceptual .....</b>	<b>21</b>
2.1 Marco teórico .....	21
2.1.1 Aislamiento Sísmico .....	21
2.1.2 Modelamiento dinámico para edificios con aisladores sísmicos .....	26
2.1.3 Modelamiento Histerético para aisladores sísmicos .....	29
2.2 Marco conceptual .....	33
<b>Capítulo III: Diseño del prototipo de aislador sísmico .....</b>	<b>35</b>
3.1 Ensayo de módulo de corte del caucho.....	36
3.1.1 Materiales Elastómeros .....	36
3.1.2 Descripción del Espécimen .....	37
3.1.3 Procedimiento .....	38
3.1.4 Cálculo de Módulo de Corte .....	40

3.1.5	Resultados Experimentales .....	41
3.2	Procedimiento de diseño .....	45
3.2.1	Vivienda Objetivo .....	45
3.2.2	Metrado de Cargas.....	46
3.2.3	Distribución de Aisladores .....	48
3.2.4	Parámetros Iniciales para el Diseño .....	48
3.2.5	Cálculos de la Demanda de Diseño.....	50
3.2.6	Predimensionamiento de Aislador .....	54
3.2.7	Propiedades del Aislador.....	56
3.2.8	Modelo Bilineal .....	58
3.2.9	Desplazamiento total de la Edificación .....	61
3.2.10	Verificación de la estabilidad del aislador sísmico ABC .....	62
3.2.11	Características Finales.....	66
3.3	Algoritmo de diseño de aislamiento sísmico .....	67
<b>Capítulo IV: Ensayo experimental de aisladores .....</b>		<b>72</b>
4.1	Antecedentes .....	72
4.2	Descripción del espécimen.....	74
4.3	Procedimiento de ensayo .....	74
4.4	Resultados experimentales .....	78
4.4.1	Ensayo de fricción del sistema de rodaje.....	81
4.4.2	Resultados Experimentales de Prototipos de Aislamiento Sísmico (ABC) .....	82
4.5	Calibración de parámetros del modelo bilineal a las curvas experimentales .....	86
<b>Capítulo V: Análisis numérico tiempo-historia.....</b>		<b>89</b>
5.1	Escalamiento de registros .....	89
5.2	Capacidad de muros de albañilería .....	92
5.3	Simulación numérica .....	94

<b>Conclusiones .....</b>	<b>101</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>104</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>105</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>108</b>

## RESUMEN

En esta investigación, se propone el desarrollo de un dispositivo de Aislamiento de Bajo Costo (ABC) fabricado con diferentes tipos de caucho y reforzado con láminas de acero, con el fin de conocer experimentalmente su comportamiento histerético frente a cargas laterales cíclicas cuasi-estáticas y a una carga axial, según los requerimientos de ensayo de la Norma de Aislamiento Sísmico E.031. De esta manera, con la finalidad de obtener su módulo de corte se realizó ensayos según la norma ASTM D4014 a tres tipos de materiales provenientes del caucho: neopreno, caucho natural y caucho reciclado. De acuerdo a estos resultados experimentales se codificó un programa nombrado D'ABC para el diseño y verificación de aisladores elastómeros circulares, y se fabricó 3 dispositivos de Aislamiento de Bajo Costo (ABC) de diferente material de caucho. Posteriormente, se realizó ensayos cíclicos frente a cargas laterales que fueron conducidos por actuadores electro-hidráulicos y mediante un control automático de desplazamiento horizontal.

De los datos experimentales, se obtuvo las curvas cíclicas de carga-deformación para cada dispositivo de aislamiento ABC. Por otro lado, en base a investigaciones pasadas, se desarrolló el modelo matemático bilineal con el fin de caracterizar el comportamiento histerético del dispositivo que será calibrado con la data experimental obtenida en el ensayo cíclico.

Finalmente, se realizó una simulación numérica de una edificación informal de albañilería con y sin el uso de estos sistemas de Aislamiento de Bajo Costo (ABC), con el fin de estudiar su eficiencia y comportamiento de estos sistemas mediante comparaciones de desplazamientos, fuerzas inerciales, aceleraciones, distorsiones máximas, etc.

## ABSTRACT

In this research, the development of a Low-Cost Insulation (ABC) device made with different types of rubber and reinforced with steel sheets is proposed, in order to experimentally determine its hysteretic behavior against quasi-static cyclical lateral loads and an axial load, according to the test requirements of the Seismic Isolation Standard E.031. In this way, in order to obtain its cutting modulus, tests were carried out according to the ASTM D4014 standard to three types of materials from rubber: neoprene, natural rubber and rubber. According to these experimental results, a program named D'ABC was coded for the design and verification of circular elastomeric insulators, and 3 Low-Cost Insulation (ABC) devices of different rubber materials were manufactured. Subsequently, cyclical tests were carried out against lateral loads that were conducted by electro-hydraulic actuators and by means of an automatic control of horizontal displacement.

From the experimental data, the cyclic load-strain curves for each ABC isolation device were obtained. On the other hand, based on past research, the bilinear mathematical model was developed in order to characterize the hysteretic behavior of the device, which will be calibrated with the experimental data obtained in the cyclic test.

Finally, a numerical simulation of an informal masonry building was carried out with and without the use of these Low-Cost Insulation (ABC) systems, in order to study their efficiency and behavior of these systems through comparisons of displacements, inertial forces, accelerations, maximum drifts, etc.

## PRÓLOGO

En este trabajo, el autor ha realizado el desarrollo de un prototipo de aislador sísmico usando diferentes tipos de caucho para estudiar su comportamiento mediante ensayos experimentales cuasi estáticos, es decir estudiar las curvas de histéresis resultante por las cargas cíclicas y los desplazamientos medidos en laboratorio; con la finalidad de proponer un ajuste de las curvas experimentales a un modelo bilineal y realizar simulaciones numéricas tiempo-historia de la vivienda objetivo.

Para las simulaciones numéricas, se realizó el escalamiento de 5 registros históricos del Perú para las 2 estructuras evaluadas. Con ello, se comparó de desplazamientos relativos, aceleraciones, fuerzas inerciales y derivas entre la vivienda objetivo con aislamiento sísmico y la vivienda objetivo con base fija.

Las simulaciones se han realizado considerando una vivienda de albañilería, categorizada tipo “C” por la N.T.P E.030 “Diseño Sismorresistente”, construida en el año 2003, tomando en cuenta una losa en la base para conectar con los prototipos de aislamiento sísmico y modelar la estructura con base aislada. De las curvas fuerza-deformación obtenidas del ensayo, se calibró un modelo bilineal para los distintos tipos de caucho usados. Por otra parte, en el modelo de la estructura con base fija se consideró un modelo tetra-lineal para el comportamiento no lineal de los muros de albañilería.

La finalidad de esta tesis es estudiar experimentalmente los aisladores sísmicos usando el protocolo de la N.T.P E.030 “Aislamiento Sísmico” en Perú y estudiar el comportamiento de una vivienda de albañilería usando las curvas experimentales de los aisladores. En consecuencia, presentar una configuración óptima de ensayos experimentales de aisladores sísmicos para investigaciones futuras; asimismo, mostrar los resultados de las simulaciones realizadas.

Dr. Roy Ericksen Reyna Salazar  
Asesor de la tesis

## LISTA DE TABLAS

Tabla N° 3.1 Propiedades físicas de los materiales elastómeros usados.....	37
Tabla N° 3.2 Dispositivos de adquisición de datos.....	38
Tabla N° 3.3 Máximas Deformaciones y Cargas del Ensayo .....	41
Tabla N° 3.4 Parámetros Sísmicos de Vivienda Objetivo.....	46
Tabla N° 3.5 Parámetros iniciales para el diseño del aislador ABC-C.....	50
Tabla N° 3.6 Cálculo del factor de amortiguamiento $B_M$ .....	52
Tabla N° 3.7 Tabla de relación entre propiedades mecánicas del elastómero ...	63
Tabla N° 3.8 Propiedades Geométricas del Prototipo ABC-C .....	66
Tabla N° 3.9 Propiedades Mecánicas del Prototipo ABC-C .....	66
Tabla N° 4.1 Historia de Carga y Desplazamientos de los prototipos.....	76
Tabla N° 4.2 Rangos de deformación y carga de dispositivos .....	79
Tabla N° 4.3 Descripción funcional de dispositivos LVDT .....	80
Tabla N° 4.4 Rangos Máximos de Desplazamiento y Estado Final de Especímenes.....	80
Tabla N° 4.5 Energía Disipada de los prototipos de aislamiento sísmico (ABC)	86
Tabla N° 4.6 Parámetros Calibrados de Modelo Bilineal y sus errores relativos	87
Tabla N° 4.7 Rigidez y Amortiguamiento efectivos de prototipos ABC .....	88
Tabla N° 5.1 Datos de registros sísmicos usados para escalamiento .....	89
Tabla N° 5.2 Rango de periodos para escalamiento .....	90
Tabla N° 5.3 Resumen de puntos críticos del comportamiento de prototipos ABC.....	95
Tabla N° 5.4 Comparación de aceleraciones máximas en el último piso .....	98
Tabla N° 5.5 Comparación de desplazamientos relativos máximos en el último piso .....	98
Tabla N° 5.6 Comparación de fuerzas laterales máximas en el último piso .....	99
Tabla N° A.1 Propiedades típicas del adhesivo “Chemlok220”.....	109
Tabla N° F.1 Historia de carga y deformación de actuadores ABC-C.....	134
Tabla N° F.2 Historia de carga y deformación de actuadores ABC-N .....	135
Tabla N° F.3 Historia de carga y deformación de actuadores ABC-R .....	135

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Diferencia de flujo de ondas sísmicas entre una estructura empotrada y aislada .....	21
Figura N° 2.2 Variación de Periodo y Amortiguamiento entre una estructura empotrada y aislada .....	22
Figura N° 2.3 Configuración de Aisladores de Tipo LDRB y HDRB .....	23
Figura N° 2.4 Aisladores de Goma con Núcleo de Plomo (LRB) .....	24
Figura N° 2.5 Apoyo Deslizante Plano o Deslizador .....	25
Figura N° 2.6 Péndulo de Fricción Simple, Doble y Triple .....	26
Figura N° 2.7 Movimiento Sísmico de una estructura de 1GDL .....	27
Figura N° 2.8 Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de una estructura con aisladores sísmicos .....	27
Figura N° 2.9 Modelo Bilineal (LRB) – Segundo punto de vista matemático .....	29
Figura N° 2.10 Modelo Trilineal – Zona de Carga .....	31
Figura N° 2.11 Curva histerético general del modelo de Bouc-Wen .....	32
Figura N° 3.1 Diagrama de Flujo de Diseño de Aislador Sísmico Elastómero Circular .....	35
Figura N° 3.2 Espécimen para el ensayo de módulo de corte .....	38
Figura N° 3.3 Mecano del ensayo de Módulo de Corte .....	39
Figura N° 3.4 Historial de desplazamientos del ensayo .....	39
Figura N° 3.5 Curvas fuerza-extensión del ensayo de módulo de corte .....	40
Figura N° 3.6 Registro de Fuerza vs Desplazamiento - MCC .....	42
Figura N° 3.7 Registro de Fuerza vs Desplazamiento - MCN .....	42
Figura N° 3.8 Registro de Fuerza vs Desplazamiento - MCR .....	43
Figura N° 3.9 Módulo de Corte al 25% de deformación (a) MCC, (b) MCN y (c) MCR. ....	43
Figura N° 3.10 Curvas y fórmulas del M. de Corte vs Deformación (a) MCC, (b) MCN y (c) MCR. ....	44
Figura N° 3.11 Ensayo cíclico unidireccional de una vivienda representativa de albañilería informal .....	45
Figura N° 3.12 Dimensiones en planta de la Vivienda Objetivo .....	46
Figura N° 3.13 Distribución de Aisladores en Vivienda Objetivo .....	48

Figura N° 3.14 Aceleración Espectral correspondiente al nuevo periodo de diseño. ....	52
Figura N° 3.15 Histéresis Bilineal Teórica del Aislador ABC-C.....	61
Figura N° 3.16 Notación para el Área Reducida .....	62
Figura N° 3.17. Diagrama de Flexo-compresión del Aislador.....	63
Figura N° 3.18 Dimensiones de Aislador de Bajo Costo de Neopreno (ABC-C). 66	
Figura N° 3.19 Resultados de Aislador de Neopreno ABC-C en el programa D'ABC (a) Pestaña Inicial y (b) Pestaña Final .....	68
Figura N° 3.20 Resultados de Aislador de Caucho Natural ABC-N en el programa D'ABC (a) Pestaña Inicial y (b) Pestaña Final .....	69
Figura N° 3.21 Resultados de Aislador de Caucho Reciclado ABC-R en el programa D'ABC .....	70
Figura N° 3.22 Distribución de aisladores con sus códigos y diámetros.....	71
Figura N° 4.1 Láminas de caucho reciclado de llantas neumáticas.....	72
Figura N° 4.2 Espécimen ABC versión 1 .....	72
Figura N° 4.3 Historia de desplazamiento, espécimen ABC versión 1. ....	73
Figura N° 4.4 Mecano de ensayo de espécimen ABC versión 1. ....	73
Figura N° 4.5 Prototipos de Aislamiento Sísmico de Bajo Costo.....	74
Figura N° 4.6 Vistas Digitales del Mecano para montaje del Ensayo Cuasi Estático del Aislador.....	77
Figura N° 4.7 Ensamble del Mecano de Ensayo Cuasi-Estático del Aislador.....	77
Figura N° 4.8 Instrumentación - Transductores y Actuadores de Carga a) Vista Frontal y (b) Vista en Planta.....	79
Figura N° 4.9 Esquema dinámico del Ensayo .....	81
Figura N° 4.10 Mecano del Ensayo de Fricción del sistema de Rodajes - Vista Frontal.....	81
Figura N° 4.11 Fricción de Rodillos.....	82
Figura N° 4.12 Rigidez Axial del Sistema de Rodillos .....	82
Figura N° 4.13 Registro de fuerza axial en prototipos ABC.....	83
Figura N° 4.14 Registro de rigidez vertical de los prototipos ABC .....	84
Figura N° 4.15 Curvas de histéresis de los prototipos ABC .....	85
Figura N° 4.16 Algoritmo simplificado de segundo orden en Python.....	87
Figura N° 4.17 Modelo Bilineal Calibrado (a) ABC-C, (b) ABC-N y (c) ABC-R... 88	
Figura N° 5.1 Modelo Numérico de Viviendo con Base Fija (T=0.15s).....	90
Figura N° 5.2 Modelo Numérico de Viviendo con Base Aislada (T=0.85s) .....	90

Figura N° 5.3 Espectros Compatibles de vivienda con base fija en dirección EW.....	90
Figura N° 5.4 Espectros Compatibles de vivienda con base fija en dirección NS.....	90
Figura N° 5.5 Espectros Compatibles de vivienda con base aislada en dirección EW.....	91
Figura N° 5.6 Espectros Compatibles de vivienda con base aislada en dirección NS.....	91
Figura N° 5.7 Registros sísmicos escalados para la estructura en base fija y aislada .....	92
Figura N° 5.8 Sistema de Carga para Ensayo Cíclico de Muros de Albañilería..	93
Figura N° 5.9 Vista de primera planta - Modelo Matemático .....	94
Figura N° 5.10 Curvas tetra-lineal de muros – 1er piso.....	94
Figura N° 5.11 Vista de segunda planta - Modelo Matemático.....	94
Figura N° 5.12 Curvas tetra-lineal de muros– 2do piso.....	94
Figura N° 5.13 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - LIM1966 .....	95
Figura N° 5.14 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - HAZ1970 .....	96
Figura N° 5.15 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - LIM1974 .....	96
Figura N° 5.16 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - PIS2007.....	97
Figura N° 5.17 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - TAC2010 .....	97
Figura N° 5.18 Reducción de fuerzas laterales en ambos pisos (a) EW (b) NS .	99
Figura N° 5.19 Comparación de derivas máximas vs los índices de las normas peruanas E.030 y E.031 (a) EW (b) NS.....	100
Figura N° A.1 Arenado de placas rígidas.....	109
Figura N° A.2 Cubierta de adhesivo “Chemlok220”.....	109
Figura N° A.3 Matriz de vulcanizado para especímenes de módulo de corte...	110
Figura N° A.4 Planchas de material elastómero.....	110
Figura N° A.5 Recorte y cubierta de la primera capa de material elastómero ..	110
Figura N° A.6 Colocado de la segunda capa de material elastómero .....	110
Figura N° A.7 Colocado de las placas rígidas a la matriz de vulcanizado .....	110

Figura N° A.8 Vulcanizado de espécimen de módulo de corte.....	111
Figura N° A.9 Desmoldaje de la matriz de vulcanizado.....	111
Figura N° A.10 Especímen vulcanizado .....	111
Figura N° A.11 Especímenes embalados y entregados .....	111
Figura N° A.12 Pintado de especímenes de módulo de corte.....	111
Figura N° A.13 Especímenes finales para ensayar .....	111
Figura N° C.1 Interfaz Gráfica Completa del programa D'ABC.....	114
Figura N° C.2 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 1.....	115
Figura N° C.3 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 2 a.....	116
Figura N° C.4 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 2 b.....	116
Figura N° C.5 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 3.....	117
Figura N° C.6 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 4.....	118
Figura N° C.7 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 5.....	119
Figura N° C.8 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 6.....	120
Figura N° C.9 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 7 a.....	121
Figura N° C.10 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 7 b.....	122
Figura N° C.11 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 8 a.....	123
Figura N° C.12 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 8 b.....	124
Figura N° E.1 Sistema de rodillos para mecano de ensayo.....	127
Figura N° E.2 Distribución de carga última axial del sistema de rodillos .....	128
Figura N° E.3 Dimensiones del eje y rodillo .....	128
Figura N° F.1 Distribución de integrantes en la zona de ensayo.....	134
Figura N° F.2 Picos de Desplazamiento – Etapa Inicial, Media y Final .....	136

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### SIMBOLOS

$A_m$	: Área transversal del cojinete del espécimen de módulo de corte.
$A_1, A_2$	: Área transversal del aislador por compresión y corte.
$A$	: Área transversal del aislador.
$A_R$	: Área reducida.
$B_M$	: Factor de amortiguamiento.
$[C]$	: Matriz de Amortiguamiento.
$C$	: Factor de amplificación sísmica.
$D_y$	: Desplazamiento de Fluencia.
$D_m$	: Desplazamiento máximo.
$D_M$	: Desplazamiento lateral máximo.
$D_{TM}$	: Desplazamiento total máximo
$d, b$	: Distancias de la dirección más larga y corta de la estructura
$e_{mc}$	: Espesor del cojinete de caucho del espécimen de módulo de corte.
$e_{caucho}$	: Espesor de la capa de caucho.
$e_{acero}$	: Espesor de láminas de acero.
$E_c$	: Módulo de compresión.
$E_D$	: Energía disipada por ciclo.
$e_{ac\ x}, e_{ac\ y}$	: Excentricidad accidental en la dirección X e Y.
$E_o$	: Módulo elástico
$F_y$	: Carga en el punto de fluencia.
$F_m$	: Fuerza máxima.
$F_1, F_2$	: Fuerzas puntuales del sexto ciclo fuerza-extensión.
$f_h$	: Frecuencia horizontal.
$f_v$	: Frecuencia vertical.
$FS$	: Factor de Seguridad
$G$	: Módulo de corte.
$G_{25\%}, G_{100\%}$	: Módulo de corte a un 25% y 100% de deformación cortante.
$g$	: Gravedad (9.81m/s <sup>2</sup> ).

$H_r$	: Altura total del elastómero.
$H_t$	: Altura total interna del aislador sísmico.
$J$	: Vector Unitario.
$[K]$	: Matriz de Rigidez.
$K_1$	: Rigidez elástica inicial o pre-fluencia.
$K_2$	: Rigidez post-fluencia.
$K_3$	: Rigidez de ablandamiento o endurecimiento del modelo trilineal.
$K_{ef}$	: Rigidez efectiva.
$K_H$	: Rigidez horizontal de la estructura.
$K_{aH}$	: Rigidez horizontal de un aislador.
$K$	: Módulo de compresibilidad.
$K_v$	: Rigidez Vertical.
$k_m$	: Constante del material.
$m_b, c_b, k_b$	: Masa, amortiguamiento y rigidez del sistema de aislamiento sísmico.
$m_s, c_s, k_s$	: Masa, amortiguamiento y rigidez del sistema de un grado de libertad.
$[M]$	: Matriz de Masa.
$m_t$	: Masa total.
$N_{caucho}$	: Número de capas de caucho.
$N_{acero}$	: Número de láminas de acero.
$P_{max}$	: Carga máxima en un aislador.
$P_{crítico}$	: Carga crítica en aislador sísmico.
$Q$	: Fuerza característica.
$S_{aM}$	: Ordenada del espectro elástico de pseudo aceleraciones correspondiente al sismo máximo considerado.
$S$	: Factor de amplificación del suelo.
$S_f$	: Factor de Forma
$T_M$	: Periodo de la Estructura Aislada
$T_P$	: Periodo que define la plataforma del factor C.
$T_L$	: Periodo que define el Inicio de la zona del factor C.
$T$	: Periodo de la estructura.
$T_D$	: Periodo de diseño de la estructura aislada.

$u_b, \dot{u}_b, \ddot{u}_b$	: Desplazamiento, velocidad y aceleración relativa del sistema de aislamiento sísmico.
$u_s, \dot{u}_s, \ddot{u}_s$	: Desplazamiento, velocidad y aceleración relativa del sistema de un grado de libertad.
$U$	: Factor de Uso o Importancia.
$W(t)$	: Función de energía histerética disipada.
$x_g, \dot{x}_g$	: Desplazamiento y aceleración del terreno.
$x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0$	: Desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de aislamiento sísmico.
$x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$	: Desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema de un grado libertad.
$x, \dot{x}, \ddot{x}$	: Vectores correspondientes al desplazamiento, velocidad y aceleración.
$X_1, X_2$	: Extensiones puntuales del sexto ciclo fuerza-extensión.
$X_{max}, F_{max}$	: Extensión y fuerza máxima del sexto ciclo fuerza-extensión.
$y_x, y_y$	: Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislación y el elemento de interés en la dirección X e Y.
$z(t)$	: Desplazamiento Histerético del modelo de Bouc-Wen.
$Z$	: Factor de zona.
$\alpha, \beta, \gamma, n, A$	: Parámetros del modelo de Bouc-Wen.
$\beta_{ef}$	: Amortiguamiento efectivo del modelo bilineal.
$\beta_M$	: Amortiguamiento efectivo.
$\gamma$	: Deformación cortante.
$\gamma_s$	: Deformación por cortante máxima.
$\gamma_D$	: Deformación por corte debido deformación
$\gamma_C$	: Deformación por corte debido a compresión
$\gamma_\theta$	: Deformación por corte debido a deformación angular
$\gamma_t$	: Deformación total por corte
$\lambda$	: Razón entre la altura total del elastómero y desplazamiento de fluencia.
$\sigma$	: Esfuerzo cortante.
$\sigma_{ac}$	: Esfuerzo de compresión.
$\sigma_s$	: Tensión máxima en placas de anclaje.
$\sigma_{adm}$	: Tensión admisible.

$\sigma_y$	: Esfuerzo de fluencia del acero.
$\emptyset_{BW}(x)(t)$	: Fuerza restauradora del modelo de Bouc-Wen.
$\emptyset$	: Diámetro del área transversal del aislador sísmico.
$\omega_n$	: Frecuencia natural del sistema sin amortiguamiento.

## **SIGLAS**

ABC	: Aislador de Bajo Costo
ABC-C	: Aislador de Bajo Costo de Cloropreno (Neopreno)
ABC-N	: Aislador de Bajo Costo de caucho Natural
ABC-R	: Aislador de Bajo Costo de caucho Reciclado
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CISMID	: Centro de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres
CH	: Channel (Canal)
CM	: Carga Muerta
CN	: Carga de Nieve
CSH	: Carga Sísmica Horizontal
CSV	: Carga Sísmica Vertical
CV	: Carga Viva
CVMA	: Carga Vertical Máxima
CVMI	: Carga Vertical Mínima
CVP	: Carga Vertical Promedio
FPS	: Friction Pendulum System
HDRB	: High-Damping Rubber Bearing
LDRB	: Low-Damping Rubber Bearing
LRB	: Lead-plug Rubber Bearing
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCC	: Muestra de Corte de Cloropreno (Neopreno)
MCN	: Muestra de Corte de caucho Natural
MCR	: Muestra de Corte de caucho Reciclado
PGA	: Peak Ground Acceleration
PTFE	: Politetra Floruro Etileno

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

Los investigadores Turer y Özden (2008) realizaron ensayos a prototipos de aisladores usando como materia prima tiras de caucho reciclado, provenientes de llantas usadas. En esta investigación calcula módulo de corte y el módulo de compresión de los especímenes. Además, adapta el prototipo a una vivienda de albañilería a escala 1/4, para posteriormente ensayarla mediante señales sísmicas y obtener sus propiedades dinámicas de la estructura.

Reyna (2011) realizó ensayos de laboratorio para conocer el módulo de corte del caucho natural bajo la norma ASTM D4014. En esta investigación, se fabricaron tres especímenes, los cuales fueron ensayados bajo una carga de tensión cíclica con diferentes niveles de deformación. Se calculó el módulo de corte del caucho natural y se estudió la influencia de la deformación lateral en la variación del módulo de corte, proponiendo una ecuación que estima el módulo de corte del caucho natural en función de la deformación lateral que experimenta.

Los investigadores Adnan y otros (2011) realizaron ensayos en mesa vibratoria de un marco de acero en base fija en comparación con modelos idénticos de base aislada con cojinetes de caucho sólido y cojinetes huecos de caucho, respectivamente. Posteriormente los autores observaron en los resultados que la reducción del diámetro óptima recomendada es de aproximadamente el 40%.

Reyna y otros (2013) llevaron a cabo una simulación numérica del comportamiento de dos edificios con aislamiento sísmico en su base, por medio de un análisis tiempo-historia del sismo de Japón en el año 2011. Como parte de su investigación, se demostró el comportamiento no lineal del aislador sísmico y el comportamiento lineal de la superestructura, perteneciente a toda la edificación. Además, se propuso un modelo bilineal modificado para estimar dicho comportamiento, obteniendo buenos resultados.

Hace unos años, Muñoz y otros (2019) investigaron la aplicabilidad del prototipo ABC en una vivienda convencional y común de dos pisos de albañilería. Se realizó un análisis comparativo tiempo-historia del comportamiento sísmico de esta vivienda con y sin sistema de aislamiento (ABC), usando diferentes factores de tipo de suelo para el registro de aceleraciones de Pisco 2007. De esta manera se demostró que el uso del sistema de aislamiento con el prototipo ABC, reduce las distorsiones en aproximadamente la quinta parte.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Perú es un país ubicado en una zona de alto riesgo sísmico, debido a que pertenece al “Círculo de Fuego del Océano Pacífico” junto a países como Chile, Ecuador, Japón, Filipinas, entre otros. Debido a esto, varias normas internacionales para el diseño sísmico de edificaciones, entre ellos la norma de diseño sismorresistente de Perú (Norma E.030-2018) exige proteger las edificaciones esenciales con categoría A1, como los establecimientos del sector salud, con dispositivos de aislamiento sísmico. Con el fin de asegurar la vida de sus ocupantes, mantener la estructura y elementos no estructurales sin daños severos, y que la edificación permanezca operativa después de un desastre. Sin embargo, existe una informalidad actualmente en el país, principalmente de las edificaciones catalogadas como comunes por la norma sísmica, y que implicaría un alto grado de vulnerabilidad ante un evento sísmico esperado. Además, el aislamiento sísmico de edificaciones es relativamente caro y la mayor parte de los existentes son proveniente de otros países. Es por ello que esta investigación tiene por finalidad, desarrollar un prototipo de aislamiento sísmico de bajo costo y aplicarlo en edificaciones no esenciales. Por otra parte, se busca desarrollar un mecanismo óptimo para el ensayo de aisladores sísmicos de acuerdo a la norma de Aislamiento Sísmico (Norma E.031-2019).

### 1.2.1 Objetivo General:

Desarrollar un prototipo de Aislador de Bajo Costo (ABC) y bajo amortiguamiento, usando distintos tipos de caucho y láminas de acero, para proteger edificaciones no esenciales según la N.T.P. E.030-2018.

### 1.2.2 Objetivos Específicos:

- Programar un algoritmo orientado al diseño y verificación del aislador sísmico para una mejor interpretación y rapidez de cálculos.
- Ensayar óptimamente el prototipo de aislamiento sísmico según el protocolo de ensayo de la N.T.P. E.031-2019 “Aislamiento Sísmico”
- Analizar comparativamente la respuesta sísmica de una vivienda con y sin prototipo de aislador.

### 1.3 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

Se espera que al diseñar el dispositivo de aislamiento sísmico de bajo costo (ABC) y bajo amortiguamiento, se comporte de tal manera que pueda reducir la demanda sísmica y cumpla el protocolo de ensayo de la N.T.P. E.031-2019.

### 1.4 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para la presente tesis es la siguiente:

- Revisión Bibliográfica
  - a. Antecedentes e información concerniente con la investigación (tesis, conferencias, artículos científicos, estado del arte).
  - b. Acceso a normas concernientes con la investigación.
  - c. Análisis de la información recopilada.
- Estudio experimental y computacional
  - a. Ensayo de Módulo de Corte de especímenes de caucho para el diseño de los aisladores sísmicos.
  - b. Desarrollo de un algoritmo computacional para la optimización y rapidez del cálculo de dimensiones y propiedades dinámicas del aislador sísmico.
  - c. Ensayo cuasi estático de los prototipos de aisladores sísmicos según la secuencia y ciclos del Anexo III de la Norma Técnica Peruana E.031 “Aislamiento Sísmico”
  - d. Desarrollar modelos computacionales de la vivienda objetivo, agregándole las curvas de comportamiento de los materiales usados para un análisis tiempo-historia.

- Análisis concluyente del estudio desarrollado
  - a. Análisis de resultados.
  - b. Elaboración de tablas y gráficos.
  - c. Evaluación final y conclusiones.
  
- Redacción del informe de tesis y presentación
  - a. Ordenamiento de información desarrollada durante la investigación.
  - b. Ordenamiento de panel fotográfico de ensayos.
  - c. Redacción del informe de tesis.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1 Aislamiento Sísmico

El aislamiento sísmico es una metodología de configuración estructural, que busca el desacoplamiento del flujo de ondas sísmicas entre la estructura y el terreno, en el instante del siniestro. Asimismo, al momento de la ocurrencia de un evento sísmico, el sistema de aislamiento sísmico busca absorber y disipar la energía sísmica a través de las deformaciones plásticas, fricción u otro medio, a través de las partes que la componen.

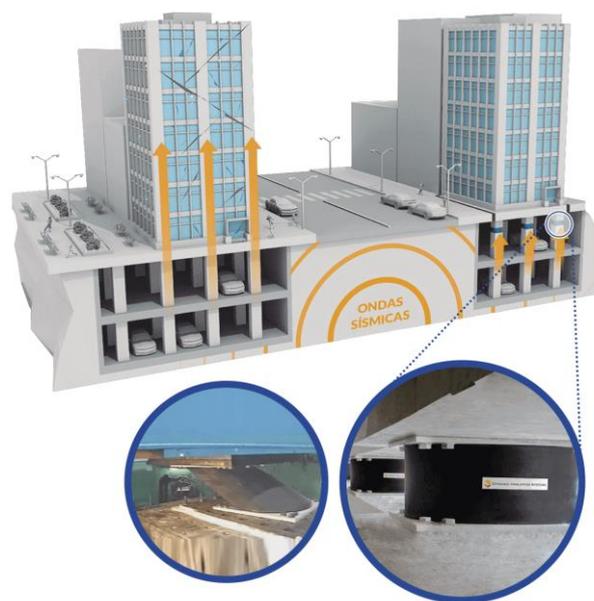


Figura N° 2.1 Diferencia de flujo de ondas sísmicas entre una estructura empotrada y aislada  
(Fuente: <https://www.cdvperu.com>)

Entre las características más importantes del aislamiento sísmico tenemos:

- Soportar las cargas verticales de demanda de la estructura.
- Rigidez vertical alta, para evitar la amplificación vertical o balanceo de la estructura.
- Rigidez horizontal baja, para hacer flexible a la estructura y permita aumentar el periodo de la estructura ante cargas laterales. (Ver Figura N° 2.2)

- Mantener su estabilidad vertical bajo movimientos sísmicos severos.
- Ser capaz de soportar deformaciones por corte bajo movimientos sísmicos severos.
- Ser efectivo durante la ocurrencia de un sismo severo y después de él.
- Mantener una vida útil igual o mayor que la estructura, o en todo caso estar habilitado para el cambio parcial o total del dispositivo.

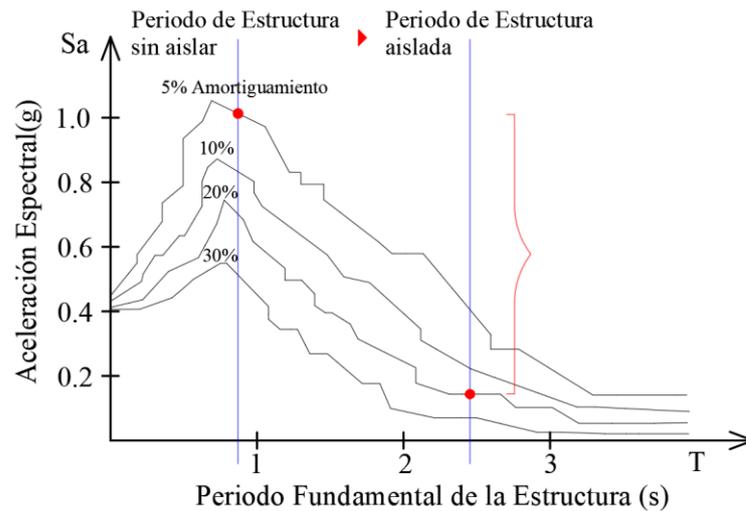


Figura N° 2.2 Variación de Periodo y Amortiguamiento entre una estructura empotrada y aislada  
(Fuente: Elaboración Propia)

Entre los tipos de aislamientos sísmicos más utilizados, tenemos a los aisladores elastómeros y a los deslizantes o friccionales. A continuación, se comenta brevemente las características generales de los aisladores mencionados.

### 2.1.1.1 Aisladores Elastómeros

Estos tipos de aisladores están conformados por un conjunto de láminas de acero intercalado con capas de caucho internos. La unión de estos materiales se realiza mediante un proceso de vulcanización y su forma por lo general es circular o cuadrada. Las capas de caucho otorgan flexibilidad horizontal al dispositivo, debidos a características propias del material y las láminas de acero aportan a una mayor rigidez vertical; estas dos funciones de los materiales idealizan los conceptos de aislamiento sísmico. El comportamiento de los aisladores depende del desplazamiento para el cuál será diseñado y se debe tener en consideración

su cuidado ante agentes externos como la temperatura, el fuego, el envejecimiento, etc. Entre los aisladores elastómeros más conocidos, tenemos

- ✓ Aisladores de goma de bajo amortiguamiento (LDRB, Low-Damping Rubber Bearing).
- ✓ Aisladores de goma de alto amortiguamiento (HDRB, High-Damping Rubber Bearing).
- ✓ Aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead-plug Rubber Bearing)

- *Aisladores elastómeros de bajo amortiguamiento (LDRB)*

Son los dispositivos más básicos dentro del grupo de aisladores de elastómeros, presentan un amortiguamiento del 10% como máximo. Presentan la ventaja de ser más fáciles de fabricar, por su simplicidad en su arquitectura. Además, estos dispositivos por lo general utilizan unos dispositivos de disipación de energía, lo cual provee amortiguamiento adicional al sistema, un ejemplo son los dispositivos "Steel U-Damper". (Ver Figura N° 2.3)

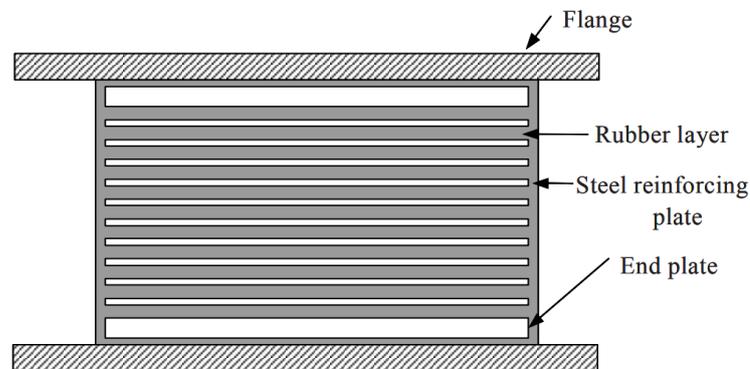


Figura N° 2.3 Configuración de Aisladores de Tipo LDRB y HDRB

(Fuente: Kang J. & Kang S., 2009)

- *Aisladores elastómeros de alto amortiguamiento (HDRB)*

Los aisladores elastómeros de alto amortiguamiento, son dispositivos fabricados en base a caucho natural y acero intercalado, como los dispositivos LDRB. La diferencia está en la mezcla del caucho usado, ya que la variación en su composición hace que estos dispositivos mejoren su amortiguamiento y llegue a un rango de 10 a 15%.

- *Aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB)*

Los aisladores elastómeros con núcleo de plomo, son dispositivos fabricados en base a caucho natural y acero intercalado, como los dispositivos HDRB y LDRB. La diferencia está en la inclusión de un núcleo de plomo en el centro del dispositivo, el cuál brinda un amortiguamiento mayor o igual al 20% y llega a absorber una mayor capacidad del movimiento horizontal. (Ver Figura N° 2.4)

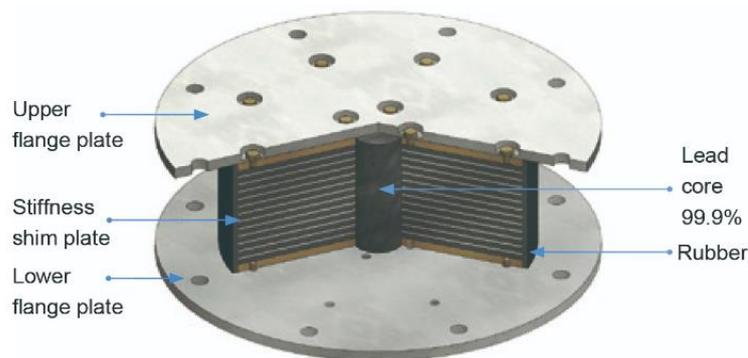


Figura N° 2.4 Aisladores de Goma con Núcleo de Plomo (LRB)  
(Fuente: <https://www.wellink.com.tw/en/lead-rubber-bearing/>)

### 2.1.1.2 Aisladores Deslizantes

Estos tipos de aisladores, llamados también aisladores friccionales, funcionan de acuerdo al coeficiente de fricción del material. Se puede diferenciar dos tipos:

- ✓ Aisladores deslizantes planos o deslizadores.
- ✓ Péndulo de Fricción (FPS, Friction Pendulum System)

- *Apoyos deslizantes planos o deslizadores*

Los apoyos deslizantes planos son tipos de aisladores deslizantes más simples. Se forman por una superficie de contacto de acero inoxidable sobre la cual desliza una superficie de acero revestida con Politetra Fluoro Etileno (PTFE) llamada también teflón y por encima de esto la superestructura (Ver Figura N° 2.5). Estos dispositivos otorgan desplazamiento horizontal a la estructura y disipan energía mediante la fricción generada por la zona de contacto. El coeficiente de fricción regula las aceleraciones y las fuerzas son limitadas por el valor resultante entre el peso y el coeficiente de fricción.

La desventaja de este tipo de aislador es que no poseen fuerza restauradora, es decir, no tienen la capacidad de retornar a su posición inicial. Es por ello, que estos dispositivos trabajan en paralelo con dispositivos de aislamiento elastómeros.



Figura N° 2.5 Apoyo Deslizante Plano o Deslizador  
(Fuente: <http://www.sismica.cl/?portfolio=deslizadores>)

- *Péndulo de Fricción (FPS)*

Los aisladores de péndulo de fricción a diferencia de los apoyos deslizantes planos presentan una fuerza restauradora, lo que hace que tengan una característica auto centrante. Posee una superficie de deslizamiento esférica cóncava de acero inoxidable sobre la cual se mueve un deslizador articulado que está revestido de un material de baja fricción.

Para niveles de carga baja la estructura se comporta como base fija ya que las fuerzas laterales producidas por el viento o por eventos sísmicos de baja escala son menores a las fuerzas de rozamiento, y pueden ser soportadas sin que la estructura se deslice. Sin embargo, cuando el evento sísmico es de gran magnitud, la estructura se comporta como un péndulo libre, y su respuesta se controla por las características mecánicas (fricción, rigidez y amortiguamiento) y dinámicas (periodo natural del péndulo) de los dispositivos de fricción. (Jangid, 2005)

La Figura N° 2.6 muestra los tres tipos de generaciones de péndulo de fricción que se tiene hoy en día, que han sido mejorando el comportamiento de la estructura: Péndulo de Fricción Simple, Péndulo de Fricción Doble y Péndulo de Fricción Triple.

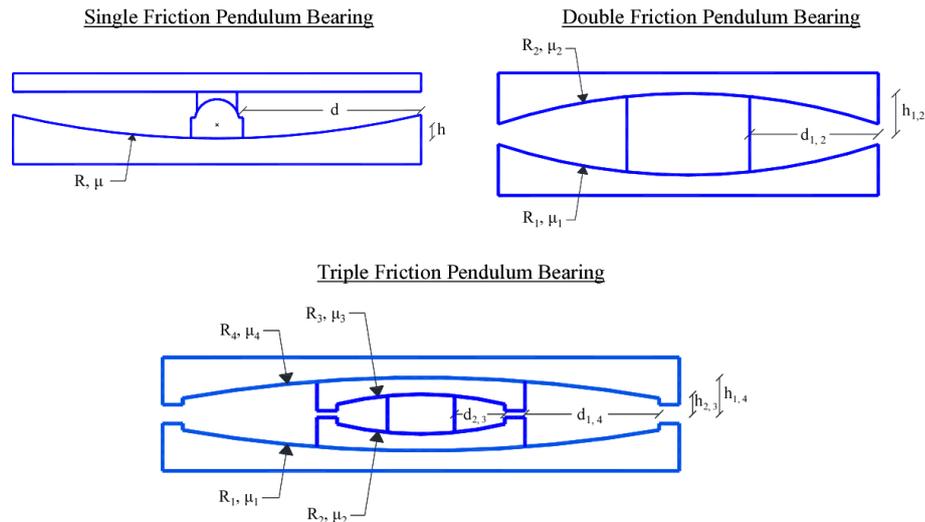


Figura N° 2.6 Péndulo de Fricción Simple, Doble y Triple  
 (Fuente: Kavvadias et al., 2017)

### 2.1.2 Modelamiento dinámico para edificios con aisladores sísmicos

Para una estructura que puede ser representada por un grado de libertad y dispositivos de aislamiento sísmico como muestra la Figura N° 2.7, se considera una masa  $m$ ; y se define propiedades mecánicas como la rigidez lateral  $k$  que es la oposición de la fuerza lateral ante un desplazamiento dado y el amortiguamiento viscoso  $c$  que se relaciona con la capacidad de disipación de energía y es dependiente de la velocidad de movimiento de la estructura. El comportamiento de los dispositivos de aislamiento sísmico conlleva la incursión en el rango no lineal de los dispositivos, sin embargo, se aceptará en el desarrollo del capítulo la hipótesis de considerar el comportamiento lineal con el fin de ilustrar los efectos principales de esta nueva configuración estructural.

El desarrollo de la solución del comportamiento de una estructura ante movimientos sísmicos, no es posible resolverse por métodos convencionales. Para su solución es necesario utilizar métodos numéricos de integración para hallar respuestas aproximadas y tener cuidado en la precisión y error de cálculo, algunos de esos métodos son: Método de Diferencia Central, Método de Aceleración Lineal, Método de Aceleración Promedio, Método de Wilson, etc.

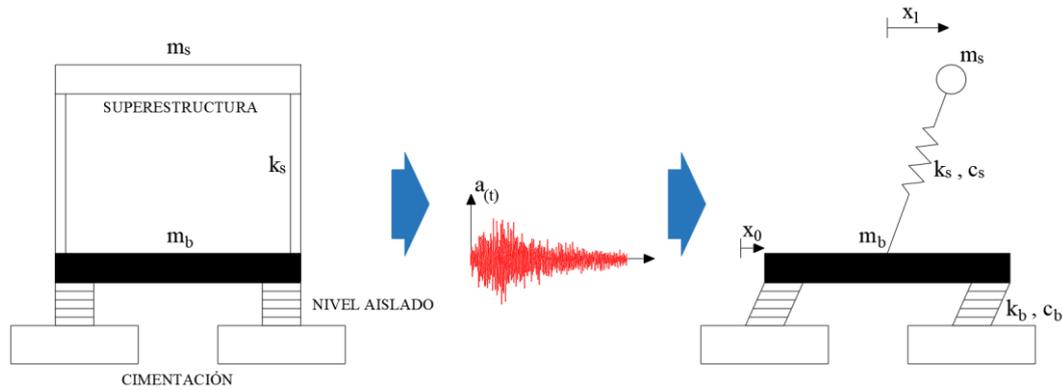


Figura N° 2.7 Movimiento Sísmico de una estructura de 1GDL

(Fuente: Elaboración Propia)

Una vez establecido la forma de una estructura con sus propiedades, se puede formular las siguientes ecuaciones mecánicas mediante un equilibrio de fuerzas usando la primera Ley de Newton:

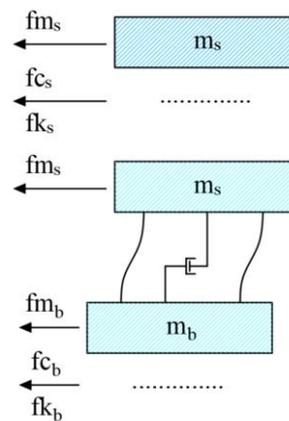


Figura N° 2.8 Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de una estructura con aisladores sísmicos

(Fuente: Elaboración Propia)

$$m_s \ddot{x}_1 + m_0 \ddot{x}_0 + c_b (\dot{x}_0 - \dot{x}_g) + k_b (x_0 - x_g) = 0 \quad (2.1)$$

$$m_s \ddot{x}_1 + c_s (\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_s (x_1 - x_0) = 0 \quad (2.2)$$

Además, definimos los desplazamientos relativos de la estructura y del sistema de aislamiento respectivamente de la siguiente forma:

$$u_s = x_1 - x_0 \quad (2.3)$$

$$u_b = x_0 - x_g \quad (2.4)$$

Reescribiendo las ecuaciones (2.1) y (2.2), con los movimientos relativos se tiene:

$$(m_s \ddot{u}_s + m_s \ddot{u}_b + m_b \ddot{u}_b) + c_b (\dot{u}_b) + k_b (u_b) = -(m_s + m_b) \ddot{x}_g \quad (2.5)$$

$$(m_s \ddot{u}_s + m_s \ddot{u}_b) + c_s (\dot{u}_s) + k_s (u_s) = -m_s \ddot{x}_g \quad (2.6)$$

Expresado de forma matricial, se tiene:

$$\begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) se puede generalizar como:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -MJa(t) \quad (2.8)$$

En donde  $[M]$ ,  $[C]$  y  $[K]$  son las matrices de masa, el amortiguamiento y la rigidez de la estructura; los vectores  $x$ ,  $\dot{x}$  y  $\ddot{x}$  son los correspondiente a desplazamiento, velocidad y aceleración;  $a(t) = \ddot{x}_g$  es definido por la aceleración proveniente del suelo;  $J$  es el vector unitario.

Se sabe que:

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

Además, para la estructura de ejemplo mostrada en la Figura N° 2.7, la ecuación (2.5) se reescribe de la siguiente manera:

$$(m_b + m_s) \ddot{u}_b + m_s \ddot{u}_s + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = -(m_s + m_b) \ddot{x}_g \quad (2.9)$$

Definimos a la masa total como:

$$m_t = m_b + m_s \quad (2.10)$$

Entonces de la ecuación (2.9):

$$m_t \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = -m_t \ddot{x}_g - m_s \ddot{u}_s \quad (2.11)$$

Aproximando que  $\ddot{u}_s = 0$ , resulta:

$$m_t \ddot{x}_0 + c_b \dot{x}_0 + k_b x_0 = -m_t a(t) \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) corresponde a un sistema de 1GDL, y de esta ecuación se tiene:

$$\frac{2\pi}{T_M} = \sqrt{\frac{k_b}{m_t}} \quad (2.13)$$

De esta ecuación  $T_M$  es el periodo de la estructura aislada. Esta ecuación es la base para el diseño de estructuras con aislamiento sísmico, que se desarrollará en los próximos capítulos.

### 2.1.3 Modelamiento Histerético para aisladores sísmicos

#### 2.1.3.1 Modelo Bilineal

El modelo Bilineal es el modelo más conocido para simular numéricamente el comportamiento histerético, su simplicidad matemática origina su aplicación en el modelamiento del comportamiento no lineal de diferentes dispositivos y uno de ellos son los aisladores sísmicos. El modelo Bilineal emplea tres parámetros fundamentales: Rigidez Pre-Fluencia, Rigidez Post-Fluencia y la Fuerza en la carga del punto de fluencia.

Los investigadores Markou y Manolis (2016) comentaron de dos posibles formulaciones mecánicas que corresponden al mismo modelo bilineal desde un punto de vista matemático. El primero consiste en un resorte elástico lineal conectado en serie con un sistema en paralelo compuesto por un deslizador plástico y un resorte elástico lineal, mientras que el segundo comprende un resorte elástico lineal conectado en paralelo con un sistema elástico-perfectamente plástico (Ver Figura N° 2.9).

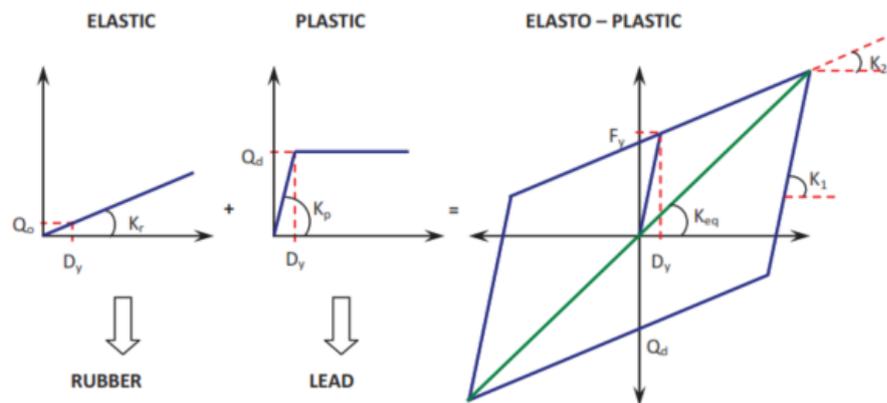


Figura N° 2.9 Modelo Bilineal (LRB) – Segundo punto de vista matemático

(Fuente: Reyna et al., 2013)

La histéresis del modelo bilineal se representa por las siguientes ecuaciones:

- Etapa de Carga

$$F_x = K_1 x \quad , \quad 0 \leq x < D_y \quad (2.14)$$

$$F_x = F_y + K_2(x - D_y) \quad , \quad D_y \leq x \leq D_m \quad (2.15)$$

- Etapa de Descarga

$$F_x = F_m - K_1(D_m - x) \quad , \quad D_m > x \geq D_m - 2D_y \quad (2.16)$$

- Etapa de Recarga

$$F_x = F_m - 2K_1D_y - K_2(D_m - 2D_y - x) \quad , \quad D_m - 2D_y > x \geq -D_m \quad (2.17)$$

- Termina del ciclo (Zona espejo de la parte inicial de la curva)

$$F_x = -F_m - K_1(-D_m - x) \quad , \quad -D_m < x \leq -D_m + 2D_y \quad (2.18)$$

$$F_x = -F_m + 2K_1D_y + K_2(x + D_m - 2D_y) \quad , \quad -D_m + 2D_y < x < D_y \quad (2.19)$$

En donde  $x$ ,  $F_x$  es el desplazamiento y fuerza respectivamente de un punto;  $F_y$  es la carga en el punto de fluencia;  $K_1$ ,  $K_2$  son las rigideces pre-fluencia y post-fluencia,  $D_y$  es el desplazamiento de fluencia;  $D_m$ ,  $F_m$  es el desplazamiento y fuerza máximo respectivamente de la curva.

La rigidez efectiva  $K_{ef}$  del modelo, se calcula de la siguiente forma:

$$K_{ef} = \frac{|F_m^+| + |F_m^-|}{|D_m^+| + |D_m^-|} \quad (2.20)$$

Los signos de la ecuación (2.20), indican las fuerzas máximas y los desplazamientos máximos en el sector positivo y negativo de la curva.

El amortiguamiento efectivo  $\beta_{ef}$  de la curva, viene relacionado con la energía disipada de la curva y viene definido como:

$$\beta_{ef} = \frac{2E_{ciclo}}{K_{ef}\pi(|D_m^+| + |D_m^-|)^2} \quad (2.21)$$

En donde  $E_{ciclo}$  es la energía disipada del lazo histerético.

### 2.1.3.2 Modelo Trilineal

El modelo trilineal es un modelo extendido del modelo bilineal en el cuál considera en la zona final de su curva los efectos de ablandamiento o endurecimiento. El modelo trilineal tiene aplicaciones en su mayor parte en el acero y en muros de albañilería; sin embargo, su capacidad de representar el efecto de endurecimiento, hace que sea posible modelar a los aisladores sísmicos elastómeros. (Kang & Kang, 2009)

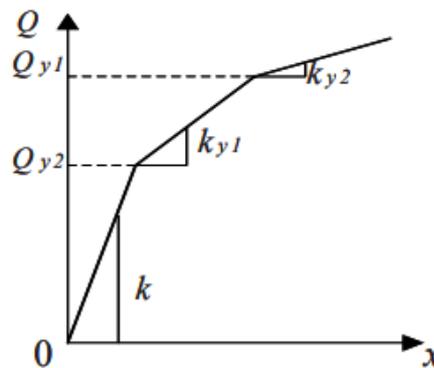


Figura N° 2.10 Modelo Trilineal – Zona de Carga  
(Fuente: Kang J. & Kang S., 2009)

La Figura N° 2.10 a diferencia de la Figura N° 2.9 en su zona de carga, implementa una tercera pendiente representada por  $k_{y2}$  que para nosotros será renombrado como  $K_3$  y denota los efectos antes mencionados.

La fuerza máxima del modelo trilineal se denota como:

$$F_m = K_1x_1 + K_2x_2 + K_3x_3 \quad (2.22)$$

En donde  $K$  es la pendiente de las diferentes zonas de la curva.

### 2.1.3.3 Modelo de Bouc-Wen

“El modelo de Bouc-Wen, ampliamente utilizado en ingeniería estructural y mecánica, ofrece una descripción analítica de un comportamiento histerético suave” (Ikhouane et al., 2007, pág. 197). Debido a su versatilidad y desarrollo manejable, se usa en diferentes campos de la ingeniería civil, mecánica y eléctrica. Además, sus variantes y extensiones para la descripción de sistemas histeréticos no lineales es utilizado en el control estructural para modelos de aisladores

sísmicos, amortiguadores magneteorológicos, respuestas de impacto, modelamiento de marcos de acero, entre otros.

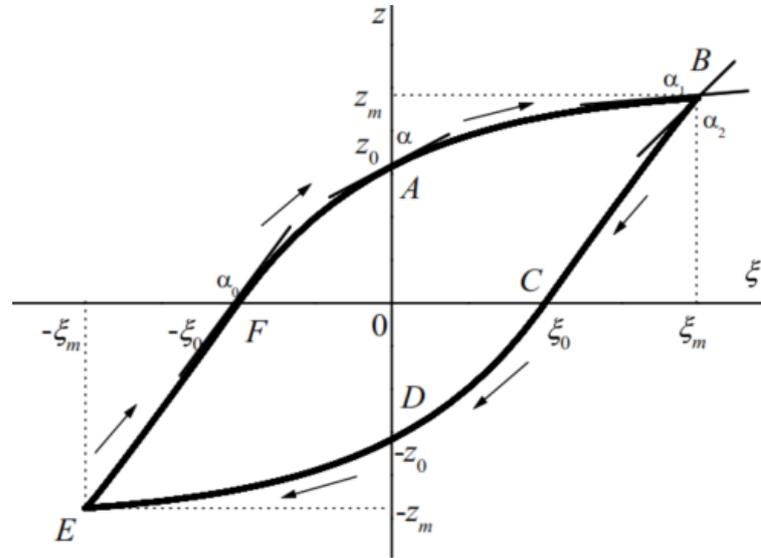


Figura N° 2.11 Curva histerético general del modelo de Bouc-Wen  
(Fuente: Giuclea et al., 2009)

De la ecuación general de movimiento (2.8) para un grado de libertad y considerando el modelo de Bouc-Wen, se transcribe de la siguiente manera:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + \phi_{BW}(x)(t) = -mja(t) \quad (2.23)$$

La histéresis del modelo de Bouc-Wen se representa por las ecuaciones (2.24) y (2.25)

$$\phi_{BW}(x)(t) = \alpha kx(t) + (1 - \alpha)kz(t), \quad (2.24)$$

$$\dot{z}(t) = A\dot{x}(t) - \beta|\dot{x}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{x}|z(t)|^n \quad (2.25)$$

La ecuación (2.24) representa la fuerza restauradora del modelo, y se compone de una parte elástica y otra inelástica(histerética).

Los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $A$  son variables adimensionales que dan forma a los lazos histeréticos del modelo; en donde  $\alpha$  es la razón de la componente elástica e inelástica de la fuerza,  $\beta$  y  $\gamma$  ajustan la curvatura de la gráfica,  $n$  regula la continuidad de la curva en la zona elástica a la inelástica, y  $A$  es el factor de escala general que por razones de redundancia entre los parámetros del modelo se le coloca el valor de  $A = 1$ .

Teniendo las ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25), se busca la forma de resolver este sistema de ecuaciones, para resolver parámetros de las estructuras y de los dispositivos de aislamiento sísmico. Es por ello, que se utilizan métodos numéricos como por ejemplo Saito (2022) desarrolló el modelo de Bouc-Wen con la implementación de la degradación de material realizada por Baber y Noori en 1985, usando el método de Newton-Raphson; otros autores como por ejemplo Peldoza (2002) desarrolló el sistema de ecuaciones mediante el método de Euler y Runge-Kutta.

La energía histerética disipada del modelo se calcula como el área encerrada de los lazos de la curva fuerza-desplazamiento, de esta forma la energía se cuantifica en:

$$W(t) = \int_{x(0)}^{x(t)} \frac{(1 - \alpha)kz(t)}{m} dx = (1 - \alpha) \frac{k}{m} \int_0^t z(t)\dot{x}(t) dt \quad (2.26)$$

Como se sabe que  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , la ecuación (2.11), se puede reescribir a:

$$W(t) = (1 - \alpha)\omega_n^2 \int_0^t z(t)\dot{x}(t) dt \quad (2.27)$$

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

**AISLAMIENTO SÍSMICO:** Es la formación de un sistema verticalmente muy rígido y lateralmente flexible entre el suelo y una estructura, para aislar las fuerzas sísmicas inducidas por terremotos aumentando el periodo natural de la estructura. (Turer & Özden, 2008)

**AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO:** Valor del amortiguamiento viscoso equivalente correspondiente a la energía disipada en la respuesta cíclica del sistema de aislamiento sísmico, expresado como fracción del amortiguamiento crítico. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019)

**ANÁLISIS NUMÉRICO TIEMPO – HISTORIA:** Es un análisis dinámico en el cual se utiliza un modelo matemático de la estructura que considere directamente el comportamiento histerético de los elementos, determinándose la respuesta frente a un conjunto de aceleraciones del terreno mediante integración directa de las

ecuaciones de equilibrio. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018)

**ENSAYOS CUASI ESTÁTICOS:** En este tipo de ensayos el espécimen se somete a una historia predefinida de desplazamientos o fuerzas mediante una velocidad lenta, en comparación con las velocidades de deformación esperables durante un terremoto. Para materiales convencionales como el acero, el hormigón o la mampostería, el hecho de realizar la prueba a baja velocidad no cambia considerablemente los resultados y, a cambio, permite obtener mejor calidad en el control de la historia impuesta, así como en las mediciones. (Molina et al., 1999)

**MODELOS DE HISTERESIS:** Es un bosquejo que simplifica y generaliza las características comunes de las relaciones de resistencia-deformación observadas en las pruebas de laboratorio y tiene por finalidad expresar la relación de resistencia-deformación bajo cualquier historia de cargas y descargas.

### CAPÍTULO III: DISEÑO DEL PROTOTIPO DE AISLADOR SÍSMICO

El procedimiento a seguir para el diseño del aislador se realizó por desarrollo de investigaciones de diferentes autores y la verificación está basado en la Norma Técnica Peruana E.031 “Aislamiento Sísmico”, en el presente trabajo se propuso seguir la siguiente secuencia:

- Obtener las características del lugar de la vivienda objetivo.
- Escoger el tipo de Aislador a diseñar.
- Establecer los parámetros iniciales para el diseño.
- Obtener un predimensionamiento.
- Obtener las propiedades dinámicas
- Comprobar el diseño del Aislador

De manera práctica, se resume esta secuencia mediante el siguiente diagrama de flujo, para un aislador elastómero circular:

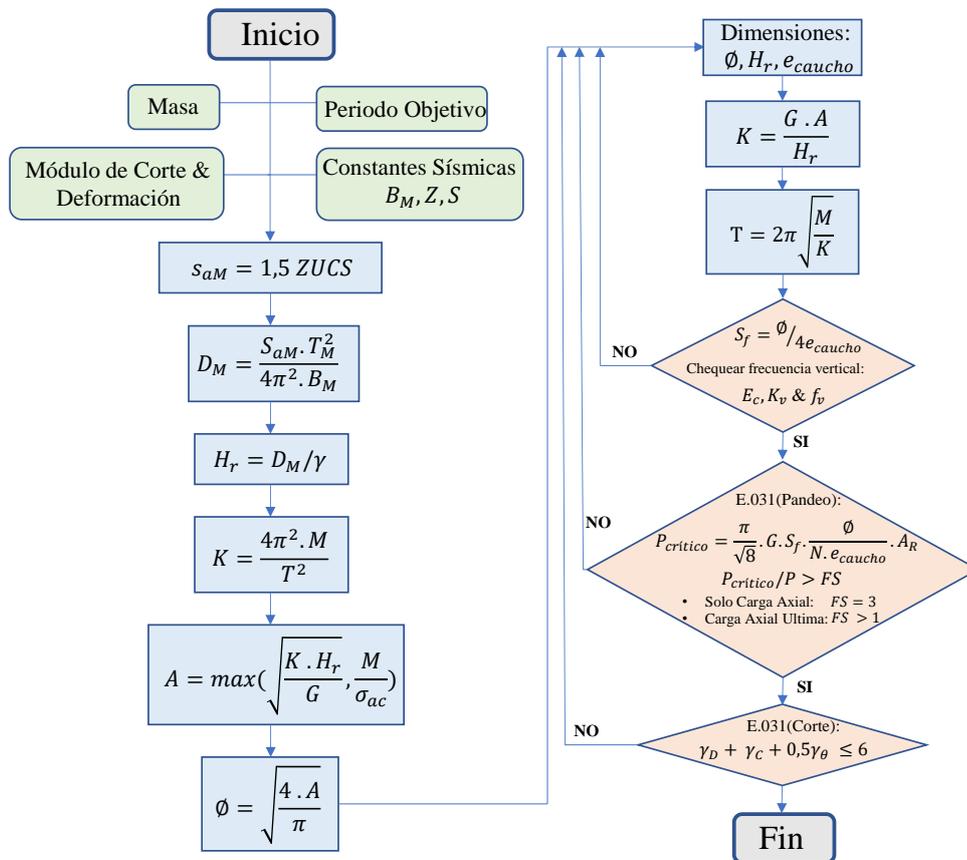


Figura N° 3.1 Diagrama de Flujo de Diseño de Aislador Sísmico Elastómero Circular

(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.1 ENSAYO DE MÓDULO DE CORTE DEL CAUCHO

#### 3.1.1 Materiales Elastómeros

En la presente investigación se usó los siguientes elastómeros: Neopreno, Caucho Natural y Caucho Reciclado. A continuación, se describe y se nombra las características propias de cada material.

##### 3.1.1.1 Neopreno

El neopreno es el nombre genérico con que se designan los elastómeros sintéticos a base de cloropreno. Los neoprenos constituyen uno de los primeros cauchos sintéticos. El neopreno tiene buenas propiedades físicas; pero son muy superiores a la oxidación, la luz solar, la flexión, el calor y las llamas. La resistencia da las llamas es probablemente su propiedad más singular, y es debida a su contenido de cloro.

- Características:
  - ✓ Resiste a la degradación a causa del sol, el ozono y el clima
  - ✓ Presenta resistencia aceptable a solventes y agentes químicos
  - ✓ Es resistente a daños causados por la flexión y la torsión
  - ✓ Buena resistencia a soluciones ácidas, pH 3.5

##### 3.1.1.2 Caucho Natural

El caucho natural, gracias a sus propiedades mecánicas es particularmente apreciada en entornos sometidos a desgaste moderado por rozamiento o expuestos a impactos. Se caracteriza por una buena elasticidad, repelencia al agua y resistencia moderada eléctrica.

- Características:
  - ✓ Buenas propiedades mecánicas, semi-antiabrasiva y de tracción.
  - ✓ Baja compresión set y buena resiliencia.
  - ✓ Buenas propiedades eléctricas y dinámicas.
  - ✓ Moderado soporte a soluciones ácidas y alcalinas diluidas

### 3.1.1.3 Caucho Reciclado

El caucho reciclado está elaborado a base de caucho natural (60%) y polvillo de caucho reciclado (40%), guardando características similares al caucho natural. Es usado para protecciones de bajas exigencias.

- Características:
  - ✓ Baja resistencia mecánica.
  - ✓ Baja compresión set y buena resiliencia.
  - ✓ Bajas propiedades eléctricas y dinámicas.
  - ✓ Moderado soporte a soluciones acidas y alcalinas diluidas.

Las propiedades físicas generales de los tres tipos de material de neopreno, caucho natural, neopreno y caucho reciclado son mostradas en la Tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1 Propiedades físicas de los materiales elastómeros usados

Propiedades Mecánicas	Neopreno	Caucho Natural	Caucho Reciclado
Dureza (ASTM D2240)	60 ± 5 Shore-A	60-65 Shore-A	60-65 Shore-A
Densidad (ASTM D792)	1.3 ± 0.1 g/cm <sup>3</sup>	1.2 ± 0.1 g/cm <sup>3</sup>	1.3 ± 0.1 g/cm <sup>3</sup>
Elongación (ASTM D412)	≥ 350%	≥ 350%	200%
Resistencia a la Tracción (ASTM D412)	≥ 8 MPa	≥ 6 MPa	≥ 4 MPa
Rango de Temperatura	-10°C a 100°C	-20°C a 70°C	-20°C a 70°C

(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.1.2 Descripción del Espécimen

La norma ASTM D4014-03 (2018) en su anexo 1, limita las dimensiones y describe el proceso de vulcanizado del espécimen. En esta tesis se fabricó tres muestras de neopreno (MCC), tres muestras de caucho natural (MCN) y tres muestras de caucho reciclado (MCR). Estas muestras cuentan con cuatro cojinetes idénticos unidos por cuatro placas rígidas. Así también, el espesor de cada cojinete  $e_{mc}$  es de 10mm y una sección cuadrada de 50mm x 50mm. Las placas rígidas son de acero con un ancho de 75 mm y un largo de 150mm para las placas exteriores y un largo de 200mm para las interiores. Todas las placas rígidas poseen un espesor de 5mm. El espécimen de módulo de corte puede verse en la Figura N° 3.2 y su procedimiento de fabricación se detalla en el ANEXO A.

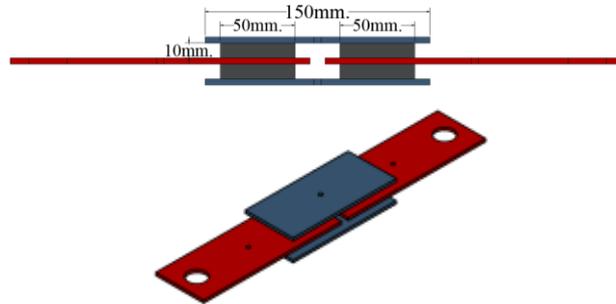


Figura N° 3.2 Especimen para el ensayo de módulo de corte  
 (Fuente: Elaboración Propia)

### 3.1.3 Procedimiento

Según los requerimientos de la norma ASTM D-4014 para estimar el módulo de corte del material caucho, el espécimen a ser ensayado descrito en la sección anterior debe ser tensionado en seis ciclos. Dicha deformación de cada ciclo es igual al espesor promedio de los cuatro apoyos que conforman el espécimen. La deformación antes mencionada correspondería a un 50% de deformación unitaria de las láminas de caucho. El espécimen deberá emplazarse adecuadamente en un mecanismo de acero llamado comúnmente como mecano de ensayo. El mecano de ensayo proveerá al espécimen una estabilidad y condiciones de carga y desplazamientos óptimos y seguros para el desarrollo del ensayo. Dicho mecanismo puede verse en la Figura N° 3.3.

Para la adquisición de datos se usó 5 canales, de los cuales el CH-00 pertenece al transductor de carga o celda de carga de la gata hidráulica. Los canales CH-01 hasta CH-05 miden la deformación del espécimen en los lugares predeterminados con unos apoyos de acero horizontales. El rango y tipo de medición de los sensores usados durante el ensayo son mostrados en la Tabla N° 3.2.

Tabla N° 3.2 Dispositivos de adquisición de datos

Canal	Dispositivo	Rango
CH-00	Celda de Carga	25 tonf
CH-01	LVDT	100 mm
CH-02	LVDT	100 mm
CH-03	LVDT	50 mm
CH-04	LVDT	50 mm
CH-05	LVDT	25 mm

(Fuente: Elaboración Propia)

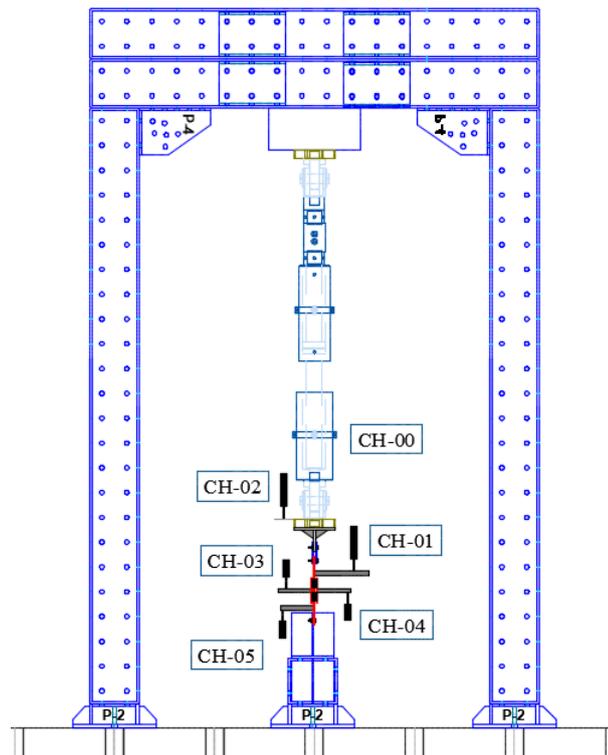


Figura N° 3.3 Mecano del ensayo de Módulo de Corte  
 (Fuente: Elaboración Propia)

Debido a la necesidad de conocer el comportamiento experimental del módulo de corte de los tres tipos de caucho propuestos en este estudio, el patrón de deformaciones a ser usado en este ensayo queda definido por 6 ciclos de tensión de diferentes niveles de deformación del espécimen, correspondientes a: 25%, 50%, 75%, 100%, 150%, 200%, 250%, 300% del espesor del apoyo elastómero. Dicha historia de desplazamientos es mostrada en la Figura N° 3.4.

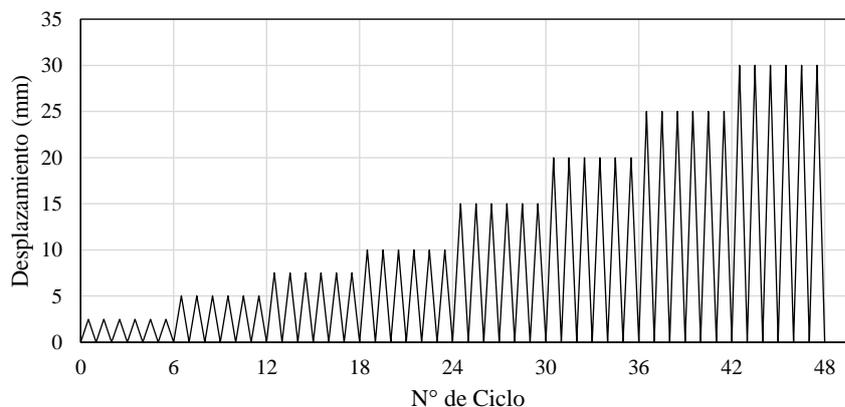


Figura N° 3.4 Historial de desplazamientos del ensayo  
 (Fuente: Elaboración Propia)

### 3.1.4 Cálculo de Módulo de Corte

El módulo de corte deberá ser estimado con la curva fuerza-deformación mostrada en la gráfica de la Figura N° 3.5 para la sexta extensión o ciclo de carga, según lo que indica la norma ASTM D-4014. Se toma un origen de fuerza efectiva  $F_1$ , para una extensión  $X_1$ . Donde  $F_1$  es el 2 % de la fuerza máxima del sexto ciclo. Además, se determina un valor  $F_2$  el cual corresponde a la fuerza para una extensión  $X_2$  con una deformación unitaria del caucho de 25%, donde  $X_2 = X_1 + 0.5e_{mc}$ , siendo  $e_{mc}$  el espesor del cojinete elastómero. De esta forma, el módulo de corte se calcula con la expresión (3.1):

$$G = \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{\frac{F_2 - F_1}{2A_m}}{\frac{X_2 - X_1}{2X_{max}}} = \frac{(F_2 - F_1)X_{max}}{(X_2 - X_1)A_m} \quad (3.1)$$

Reemplazando  $X_2$  en la ecuación (3.1):

$$G = \frac{(F_2 - F_1)X_{max}}{(X_1 + 0.5X_{max} - X_1)A_m} = \frac{(F_2 - F_1)X_{max}}{(0.5X_{max})A_m} \quad (3.2)$$

Finalmente:

$$G = \frac{2(F_2 - F_1)}{A_m} \quad (3.3)$$

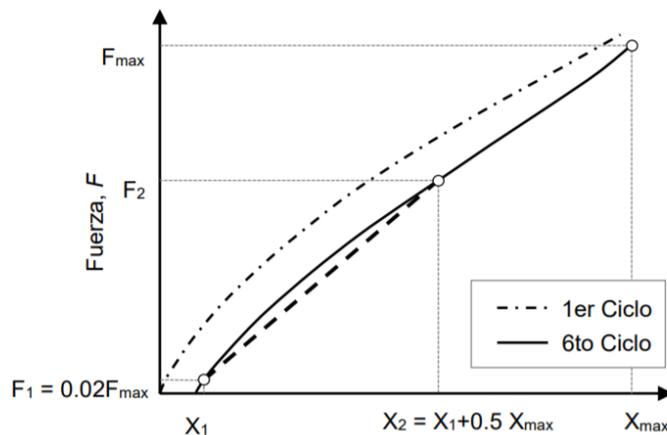


Figura N° 3.5 Curvas fuerza-extensión del ensayo de módulo de corte  
(Fuente: Adaptado de ASTM D4014-03, 2018)

### 3.1.5 Resultados Experimentales

Se realizó el ensayo de Módulo de Corte a 3 especímenes de cada tipo de elastómero: Neopreno (MCC), Caucho Natural (MCN) y Caucho Reciclado (MCR).

El ensayo se controló manualmente a través de una gata vertical que enganchaba a una placa rígida del espécimen, obteniendo datos de la fuerza y desplazamiento a través de 6 canales, uno de fuerza y 5 de desplazamiento, ubicados como se muestra en la Figura N° 3.3. El canal CH-01 y canal CH-02, se colocaron con el fin de obtener datos de desplazamiento equivalente al doble del espécimen, el canal CH-03 y canal CH-04 se colocaron con el fin de obtener los desplazamientos del espécimen y el canal CH-05 se colocó como seguridad ante un posible desplazamiento de la base, lo cual no ocurrió.

El patrón de deformación de los especímenes Neopreno (MCC), Caucho Natural (MCN) y Caucho Reciclado (MCR) corresponde al canal CH-01, además se muestran las curvas experimentales de Fuerza vs Desplazamiento de cada espécimen, tanto para la deformación total (CH-01, CH-02), como para deformaciones de la lámina de caucho (CH-03, CH-04), indicadas en las Figura N° 3.6, Figura N° 3.7 y Figura N° 3.8.

Tabla N° 3.3 Máximas Deformaciones y Cargas del Ensayo

Especimen	Deformación Máxima (mm)	Carga Máxima (tonf)
MCC-1	31.67	2.33
MCC-2	26.51	1.88
MCC-3	20.66	1.53
MCN-1	40.13	2.16
MCN-2	31.64	1.39
MCN-3	30.00	1.33
MCR-1	35.29	1.46
MCR-2	32.31	1.20
MCR-3	30.52	1.28

(Fuente: Elaboración Propia)

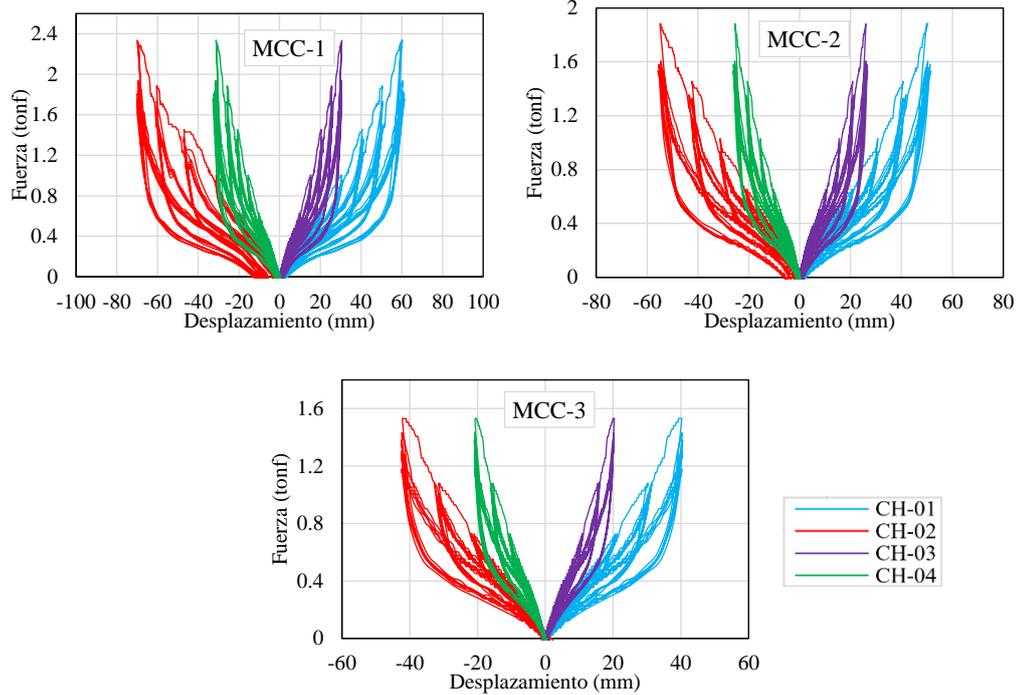


Figura N° 3.6 Registro de Fuerza vs Desplazamiento - MCC  
(Fuente: Elaboración Propia)

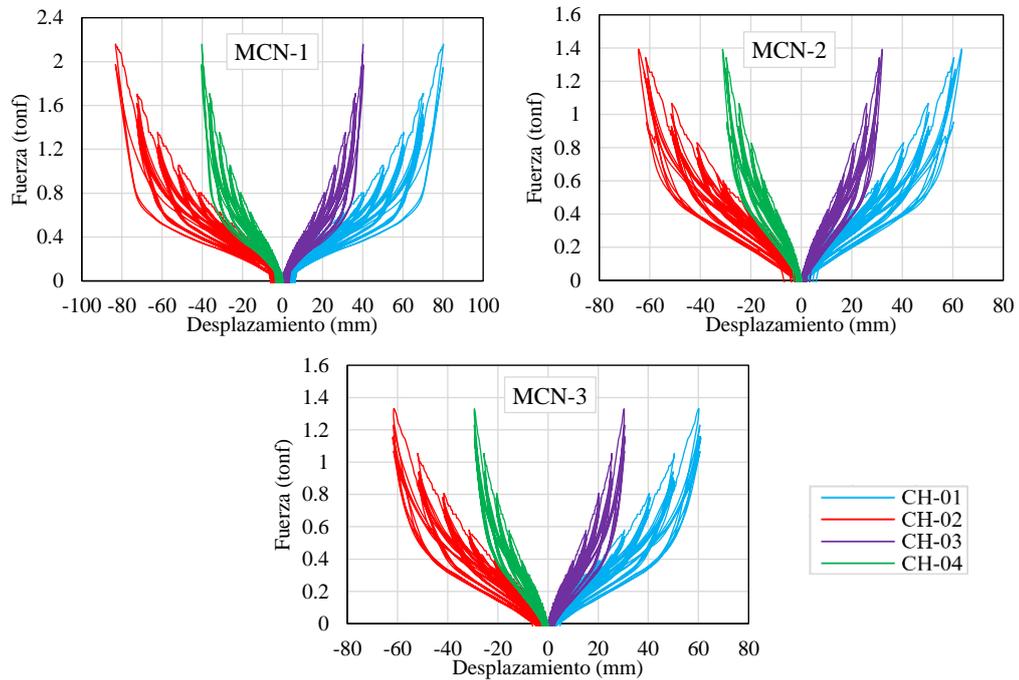


Figura N° 3.7 Registro de Fuerza vs Desplazamiento - MCN  
(Fuente: Elaboración Propia)

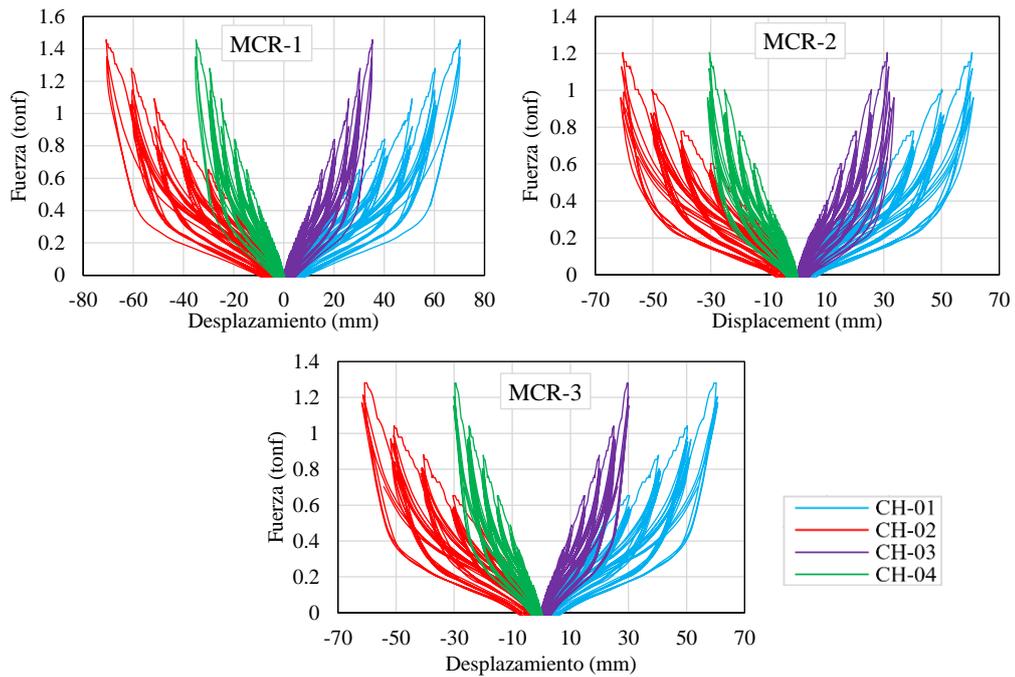


Figura N° 3.8 Registro de Fuerza vs Desplazamiento - MCR  
(Fuente: Elaboración Propia)

De acuerdo a la norma ASTM D-4014, a un nivel de deformación del espécimen del 50% (10mm de extensión de la gata hidráulica), equivalente al 25% de deformación de la lámina de caucho, se realizó 6 ciclos para observar la variación del módulo de corte y calcular el módulo de corte promedio por cada tipo de material.

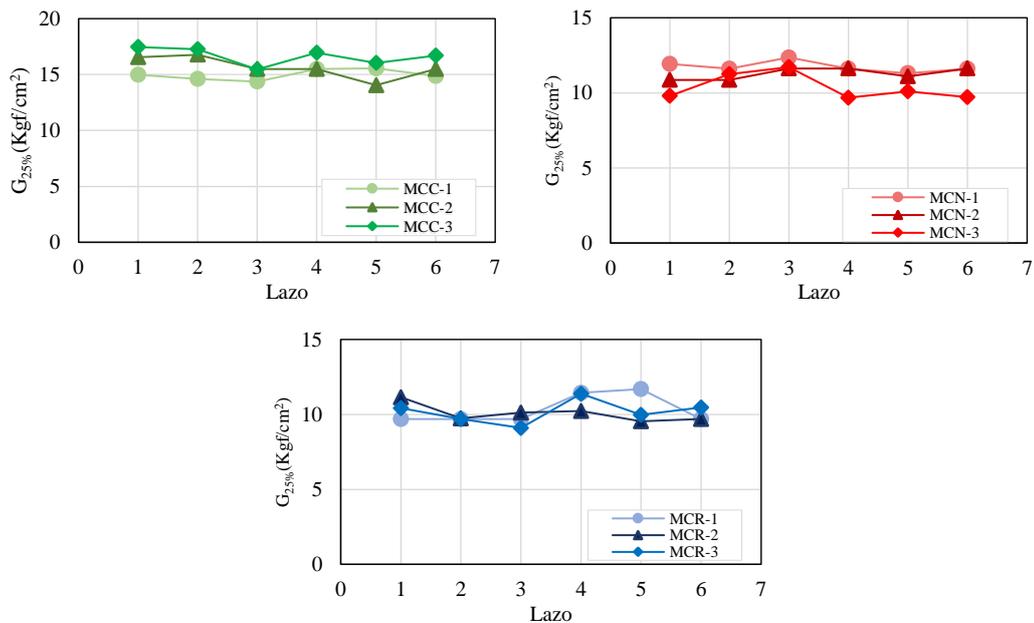


Figura N° 3.9 Módulo de Corte al 25% de deformación (a) MCC, (b) MCN y (c) MCR.  
(Fuente: Elaboración Propia)

El cálculo del módulo de corte de acuerdo a la norma ASTM D-4014 se repitió para otras deformaciones mayores a 25%, específicamente a 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 200%, 250% y 300%. Adicionalmente se plotearon los datos de Módulo de Corte de la norma ASTM D-4014 respecto a su deformación, para los especímenes MCC, MCN y MCR, trazando una curva de tendencia y calculando una función polinómica de 2° grado, con el fin de establecer un valor matemáticamente de Módulo de Corte, respecto a su deformación variable.

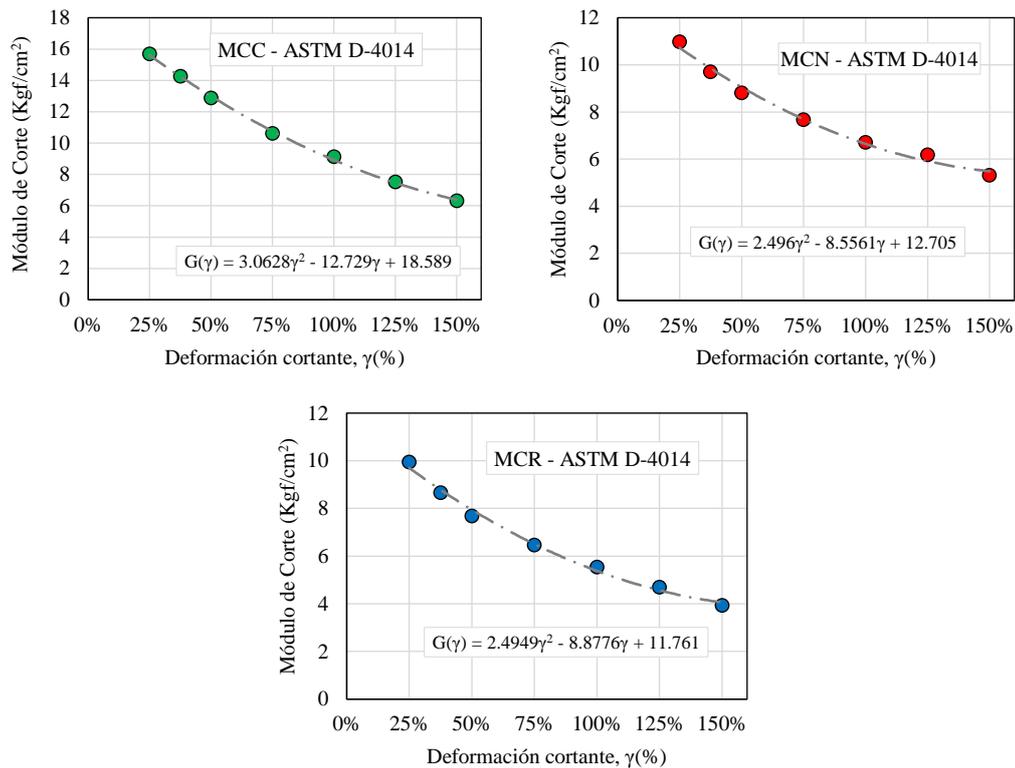


Figura N° 3.10 Curvas y fórmulas del M. de Corte vs Deformación (a) MCC, (b) MCN y (c) MCR.  
 (Fuente: Elaboración Propia)

Para el desarrollo del prototipo de aislamiento se tomó en cuenta el Módulo de Corte del Neopreno, Caucho Natural y Caucho Reciclado según la norma ASTM D-4014 y a una deformación igual al 100%.

- Neopreno (MCC):  $G_{100\%} = 9.12 \text{ Kg/cm}^2 \approx 894.40 \text{ kN/m}^2$
- Caucho Natural (MCN):  $G_{100\%} = 6.71 \text{ Kg/cm}^2 \approx 658.03 \text{ kN/m}^2$
- Caucho Reciclado (MCR):  $G_{100\%} = 5.54 \text{ Kg/cm}^2 \approx 543.29 \text{ kN/m}^2$

## 3.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

### 3.2.1 Vivienda Objetivo

Los investigadores Zavala y Kaminosono (2003) condujeron una investigación experimental para estudiar el comportamiento de una vivienda representativa de albañilería informal bajo un sismo severo. El espécimen fue ensayado a escala real mediante un ensayo cíclico de carga cuasi-estática unidireccional en la dirección más flexible (ver Figura N° 3.11). Este estudio mostró la baja capacidad sísmica que tienen las viviendas informales en el país bajo un sismo severo, que representan aproximadamente el 70 % de las viviendas construidas anualmente.



Figura N° 3.11 Ensayo cíclico unidireccional de una vivienda representativa de albañilería informal  
(Fuente: Zavala & Kaminosono, 2003)

En la presente investigación se plantea el diseño de un sistema de aislamiento con un prototipo de aislador de bajo costo que será emplazado en una vivienda de dos pisos de albañilería informal con similares características en planta detallado en el ANEXO B. De esta forma, la vivienda objetivo tiene un área techada de 51m<sup>2</sup> con dos niveles de 2.5m de altura típica, y una losa rígida de en la base para conectar los aisladores a la superestructura. La edificación está localizada en el distrito del Rímac, departamento de Lima en el Perú; donde el suelo es un terreno gravoso con una capacidad de resistencia de 4 kgf/cm<sup>2</sup> y una velocidad de propagación de onda de corte entre 500 m/s y 1500 m/s. Los parámetros sísmicos según la norma peruana E.030 Diseño Sismorresistente son colocados en la Tabla N° 3.4.

Tabla N° 3.4 Parámetros Sísmicos de Vivienda Objetivo

Parámetro	Valor
Zona Sísmica	Zona 4
Factor de Suelo	S1
Factor de Uso	U = 1
$T_L$	0.4s
$T_P$	2.5s

(Fuente: Elaboración Propia)

Asimismo, las dimensiones de los elementos estructurales pueden ser observado en la vista en planta de la Figura N° 3.12.

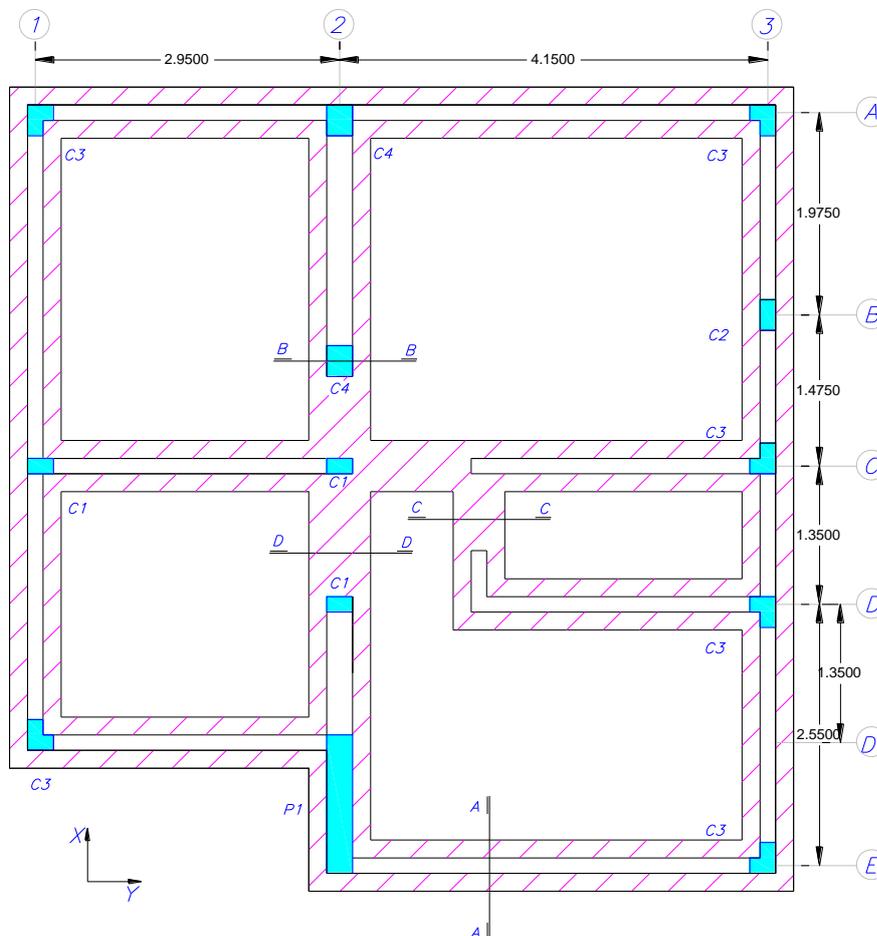


Figura N° 3.12 Dimensiones en planta de la Vivienda Objetivo

(Fuente: Zavala & Kaminosono, 2003)

### 3.2.2 Metrado de Cargas

Con el fin de determinar el peso sísmico de la estructura, se realizó un metrado de carga de la vivienda objetivo, como se muestra a continuación:

- Carga Muerta:

Vigas:

$$V1: 2(3.85m)(0.25m)(0.20m)(2.4tonf/m^3) = 0.924 tonf$$

$$V2: 2(6.5m)(0.15m)(0.20m)(2.4tonf/m^3) = 0.936tonf$$

$$V3: 2(13m)(0.15m)(0.20m)(2.4tonf/m^3) = 1.872tonf$$

$$V4: 2(10.35m)(0.15m)(0.30m)(2.4tonf/m^3) = 2.236tonf$$

$$V5: 2(6.45m)(0.25m)(0.30m)(2.4tonf/m^3) = 2.322tonf$$

$$Total = 8.29 tonf$$

Columnas:

$$C1: 2(3)(2.5m)(0.15m)(0.25m)(2.4tonf/m^3) = 1.35tonf$$

$$C2: 2(1)(2.5m)(0.15m)(0.30m)(2.4tonf/m^3) = 0.54tonf$$

$$C3: 2(6)(2.5m)(0.06m^2)(2.4tonf/m^3) = 4.32 tonf$$

$$C4: 2(2)(2.5m)(0.25m)(0.30m)(2.4tonf/m^3) = 1.8tonf$$

$$Total = 8.01 tonf$$

Placa:

$$P1: 2(1.2m)(2.5m)(0.25m)(2.4tonf/m^3) = 3.6tonf$$

$$Total = 3.6 tonf$$

Muros de Albañilería:

$$M1: 2(26.7m)(2.5m)(15cm)(19kgf/(m^2 \cdot cm)) = 38.05tonf$$

$$M2: 2(2.05m)(2.5m)(25cm)(19kgf/(m^2 \cdot cm)) = 4.85tonf$$

$$Total = 42.9 tonf$$

Losa:

$$Aligerado: 2(300kgf/m^2)(51m^2) = 30.6tonf$$

$$Acabado: 2(80kgf/m^2)(51m^2) = 8.16tonf$$

$$Total = 38.8 tonf$$

Losa Rígida de base:

$$Lr: 56.2 m^2(0.20m)(2.4tonf/m^3) = 33.72tonf$$

$$Acabado de Piso: 51m^2(80kgf/m^2) = 4.08tonf$$

$$Total = 37.8 tonf$$

- Carga Viva (Uso Familiar):

$$Losa Típica: 2\left(\frac{200kgf}{m^2}\right)(51m^2) = 20.44 tonf$$

$$Losa Techo: 1(100kgf/m^2)(51m^2) = 5.11tonf$$

$$Pprom = 1.0CM + 0.5CV = 139.4tonf + 0.5(25.55tonf) = 152.17tonf$$

$$\approx 1516.22kN$$

El diseño se realizará con un peso de edificación de 1520 kN

### 3.2.3 Distribución de Aisladores

Se diseñará un Aislador Sísmico Elastómero de Bajo Costo (ABC), el cual tendrá una geometría circular. La distribución de estos aisladores obedecerá la vista en la Figura N° 3.13. Se colocaron 14 Aisladores distribuidos espacialmente de acuerdo a la geometría de la vivienda.

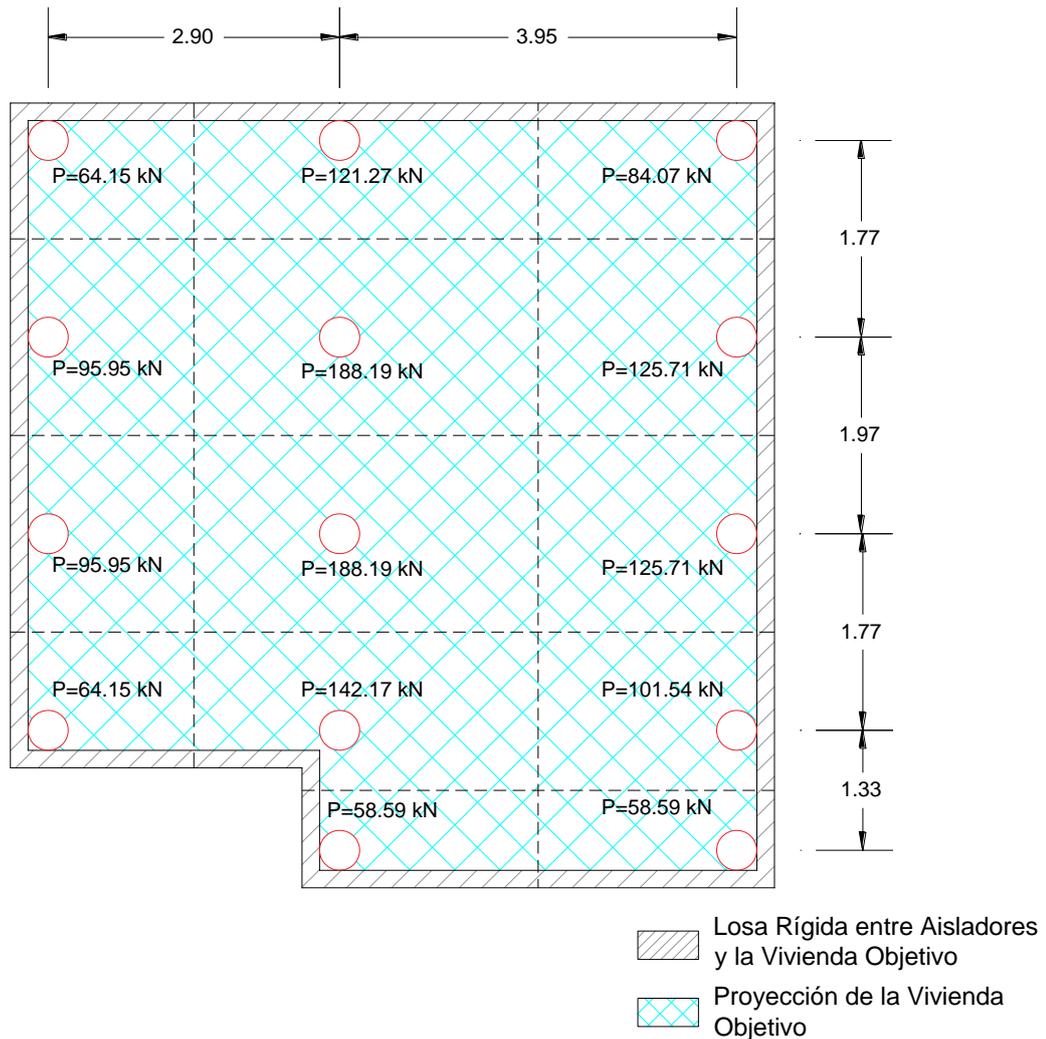


Figura N° 3.13 Distribución de Aisladores en Vivienda Objetivo

(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.2.4 Parámetros Iniciales para el Diseño

Para un diseño de aislador sísmico se necesita estos datos iniciales para su desarrollo, se escogerán 3 aisladores críticos para ser diseñados con los distintos tipos de caucho y se presentará el diseño paso a paso del aislador de Neopreno

(ABC-C) y se verificará los resultados con el programa D'ABC, como se muestra en la Figura N° 3.19. Los otros aisladores de caucho natural (ABC-N) y caucho reciclado (ABC-R) serán diseñados y comprobados con el programa de diseño.

Para un diseño de aislador sísmico se necesita estos datos iniciales para su desarrollo:

- El módulo de Corte: Es la relación entre el esfuerzo de corte y su deformación.
- La deformación cortante: Es el máximo desplazamiento que se puede deformar lateralmente del elastómero respecto su altura.
- El esfuerzo de compresión: Es la capacidad máxima que tiene el elastómero ante una carga de compresión.
- El Peso total de la edificación: Se puede realizar mediante el metrado de carga o con un programa de análisis.
- La Carga Máxima: Se refiere a la mayor demanda de carga respecto un aislador.
- El número de aisladores: Es la cantidad de aisladores distribuidos en la planta baja.
- El amortiguamiento efectivo: Es aquel amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico para el desplazamiento traslacional  $D_M$ .
- El Periodo de Diseño: Es el periodo al cual se proyecta nuestra estructura con aislamiento sísmico, se recomienda que sea mayor o igual a 3 veces el periodo fundamental de la estructura con base fija y menor a 5s.
- El Espesor de capa de caucho: Es la altura que tendrá las capas de caucho intercaladas con las láminas de acero interno.
- El espesor de láminas de acero: Es la altura que tendrá las capas de acero intercaladas con las capas de goma, se recomienda que sean mayor o igual a 2mm.
- El esfuerzo de fluencia del acero: Es el parámetro con el cual el acero interno llega al límite del comportamiento elástico.
- El espesor de las placas de Anclaje: Es la altura de las placas exteriores del aislador sísmico.
- El módulo de compresibilidad de la goma: Es la resistencia que tiene el material ante una compresión uniforme.

- El diámetro interior inicial: Es el diámetro del vacío interior que puede tener el aislador.
- El coeficiente  $\lambda$ : Es la fracción de la altura del elastómero, con el cuál podremos aproximar el desplazamiento del aislador en el rango lineal. Este factor es aproximadamente de 0.05 a 0.1.

Tabla N° 3.5 Parámetros iniciales para el diseño del aislador ABC-C

Parámetros Iniciales - Diseño	Valor
Módulo de Corte (kN/m <sup>2</sup> )	894.4
Deformación por Cortante	1.5
Esfuerzo de Compresión (kN/m <sup>2</sup> )	15000
Peso total de la Estructura (kN)	1520
Carga Máxima (kN)	188.19
N° de Aisladores	14
Amortiguamiento Efectivo(%)	10
Periodo de Diseño (s)	1.2
Espesor propuesto de Capa de Goma (mm)	6
Espesor propuesto de Lámina de Acero (mm)	2
Esfuerzo de fluencia de Acero (kN/m <sup>2</sup> )	250000
Espesor de Placas de Anclaje (cm)	2.5
Módulo de Compresibilidad de la Goma (kN/m <sup>2</sup> )	2000000
Diámetro Interior Inicial (cm)	0
Coficiente $\lambda$	0.1

(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.2.5 Cálculos de la Demanda de Diseño

#### 3.2.5.1 Cálculo de la Ordenada del Espectro de Pseudo-aceleraciones

Se debe conocer los parámetros espectrales de la norma E.030 Diseño Sismorresistente para su cálculo, está definida por la siguiente expresión:

$$S_{aM} = 1.5ZUCSg \quad (3.4)$$

En donde  $Z$  es definido como el factor de zona,  $S$  corresponde al factor de amplificación del suelo,  $U$  es el factor de uso o importancia el cuál equivale a 1 según la N.T.P. E031,  $C$  es el factor de amplificación sísmica y  $g$  es la gravedad equivalente a 9.81m/s<sup>2</sup>.

$$C = 1 + 7.5\left(\frac{T}{T_p}\right), \quad T < 0.2T_p \quad (3.5)$$

$$C = 2.5, \quad 0.2T_p < T < T_p \quad (3.6)$$

$$C = 2.5\left(\frac{T_p}{T}\right), \quad T_p < T < T_L \quad (3.7)$$

$$2.5\left(\frac{T_p * T_L}{T^2}\right), \quad T > T_L \quad (3.8)$$

En donde  $T$  es definido como el periodo de la estructura,  $T_p$  es el periodo que define la plataforma del factor  $C$ , y  $T_L$  es el periodo que define el inicio de la zona del factor  $C$ .

Se calcula el coeficiente  $C$ , teniendo en cuenta el dominio del periodo de diseño según las ecuaciones (3.5), (3.6), (3.7) y (3.8). Según la Tabla N° 3.5 se tiene que:

$$T_D = 1.2 \text{ s.}$$

Como:

$$T_p < T_D = 1.2 \text{ s.} < T_L \quad :$$

Se reemplaza en la ecuación (3.7):

$$C = 2.5\left(\frac{T_p}{T}\right) = 2.5\left(\frac{0.4}{1.2}\right)$$

$$C = 0.833$$

Finalmente, la ordenada del espectro de pseudo-aceleraciones de la ecuación (3.4) es igual a:

$$S_{aM} = 1.5(0.45)(1)(0.833)(1)g$$

$$S_{aM} = 0.56g$$

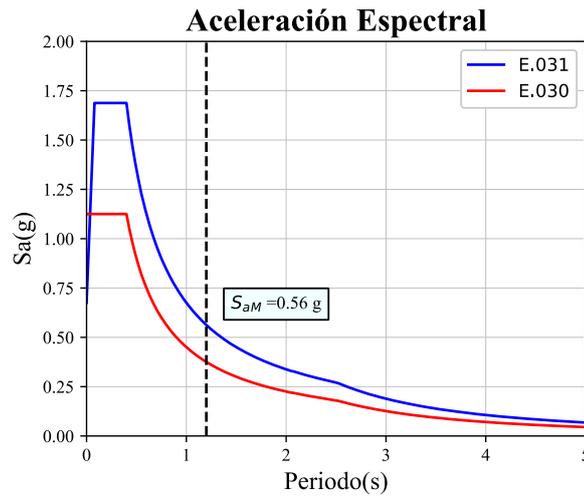


Figura N° 3.14 Aceleración Espectral correspondiente al nuevo periodo de diseño.  
(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.2.5.2 Desplazamiento Lateral

El cálculo del desplazamiento lateral del aislador considera los efectos de la aceleración espectral de un sismo máximo esperado, esta expresado de la siguiente manera (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019):

$$D_M = \frac{S_{aM} T_D^2}{4\pi^2 B_M} \quad (3.9)$$

\$S\_{aM}\$, corresponde a la ordenada del espectro elástico de pseudo aceleraciones correspondiente al sismo máximo considerado, \$T\_D\$ es el periodo de diseño del aislador y \$B\_M\$ es definido como el factor de amortiguamiento (Ver Tabla N° 3.6)

Tabla N° 3.6 Cálculo del factor de amortiguamiento \$B\_M\$

Amortiguamiento Efectivo \$\beta_M\$	Factor \$B_M\$
\$\leq 2\$	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9

(Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019)

Según la Tabla N° 3.5, se consideró un amortiguamiento efectivo \$\beta\_M\$ en un rango de 10% aproximadamente, por ello su factor \$B\_M\$ según la Tabla N° 3.6 sería:

$$B_M = 1.2$$

Luego se reemplaza los valores en la ecuación (3.9):

$$D_M = \frac{0.56(9.81 \text{ m/s}^2)(1.2 \text{ s})^2}{4(3.1416)^2(1.2)} = 0.168 \text{ m}$$

### 3.2.5.3 Cálculo de la Carga Vertical

Para la carga vertical, la N.T.P. E.031 "Aislamiento Sísmico" propone las siguientes combinaciones de carga.

- Carga Vertical Promedio (CVP):

$$CVP = 1.0CM + 0.5CV \quad (3.10)$$

$$CVP = CM + 0.5CV = 20.4 \text{ Ton} = 188.19 \text{ kN}$$

- Carga Vertical Máxima (CVMA):

$$CVMA = 1.0CM + 0.5CV \quad (3.11)$$

$$CVMA = 1.25(CM + CV) + 1.0(CSH + CSV) = 40.8 \text{ Ton} = 376.88 \text{ kN}$$

- Carga Vertical Mínima (CVMI):

$$CVMI = 0.9CM - 1.0(CSH + CSV) \quad (3.12)$$

$$CVMI = 0.9CM - 1.0(CSH + CSV) = 25.93 \text{ kN}$$

$CM$ ,  $CV$  son definidas como la carga muerta y viva respectivamente;  $CSH$ ,  $CSV$  son la carga sísmica horizontal y vertical, y  $CN$  es la carga de nieve en caso se presente.

### 3.2.5.4 Rigidez Lateral

Se procede en este punto, estimar la resistencia a las deformaciones de la estructura y el aislador, usando los criterios del capítulo 2.1.2. Se transcribe de la siguiente manera:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{M_T}{K_H}} \quad (3.13)$$

Despejando:

$$K_H = \frac{4\pi^2 M_T}{T_D^2} \quad (3.14)$$

Rigidez Horizontal de Aislador:

$$K_{aH} = \frac{4(3.1416)^2(204kN)}{(9.81 \text{ m/s}^2)(1.2)^2} = 525.93 \text{ kN/m}$$

Con estos valores se calcula las dimensiones principales del Aislador ABC-C.

### 3.2.6 Predimensionamiento de Aislador

Se calcula las dimensiones del aislador, sin embargo, estas deberán verificar las restricciones de la N.T.P. E.031 "Aislamiento Sísmico", caso contrario se deberán de redimensionar.

#### 3.2.6.1 Altura del Elastómero $H_r$ :

Se hace un predimensionamiento sabiendo por ensayos la deformación máxima que puede tener el material de caucho y el desplazamiento traslacional a la cual se va a diseñar. Se calcula de la siguiente forma:

$$H_r = \frac{D_M}{\gamma_s} \quad (3.15)$$

Donde  $\gamma_s$  es definida como la deformación por cortante máxima

Reemplazando las variables:

$$H_r = \frac{0.168 \text{ m}}{1.5} = 0.112 \text{ m}$$

Finalmente se consideró un  $H_r = 0.114 \text{ m}$ .

#### 3.2.6.2 Diámetro $\phi$

- Cálculo de área  $A$  por compresión:

$$A_1 = \frac{P_{max}}{\sigma_{ac}} \quad (3.16)$$

Donde  $P_{max}$  es la carga máxima en un aislador,  $\sigma_{ac}$  es el esfuerzo de compresión.

Reemplazando:

$$A_1 = \frac{188.19 \text{ kN}}{15000 \text{ kN/m}^2} = 125.46 \text{ cm}^2$$

- Cálculo de área  $A$  por corte:

$$A_2 = \frac{K_a H_r}{G} \quad (3.17)$$

Donde  $G$  es el módulo de corte.

Reemplazando:

$$A_2 = \frac{(525.93 \text{ kN/m})(0.114 \text{ m})}{894.4 \text{ kN/m}^2} = 670.39 \text{ cm}^2$$

Con estas dos expresiones se calculan las distintas áreas y se usa el máximo valor de estos. Dependiendo si el aislador es de geometría cuadrada o circular, se calcula su lado o su diámetro respectivamente. En caso sea sección circular y esta tenga un área central vacía, al área máxima calculada anteriormente se debe considerar el área vacía y calcular su nuevo diámetro exterior. Se considera  $A = 670.39 \text{ cm}^2$  por ser la mayor entre las dos y se reemplaza en la siguiente ecuación:

$$\phi = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.18)$$

El diámetro resultaría:

$$\phi = \sqrt{\frac{4(670.39 \text{ cm}^2)}{3.1416}} = 29 \text{ cm}$$

Del cual se consideró un diámetro de 29cm. para poder considerar un recubrimiento de espesor igual a 0.5cm, obteniendo finalmente un aislador de diámetro final igual a 30cm.

### 3.2.6.3 Número de capas de caucho y láminas de acero

Después de obtener el diámetro del aislador y la altura del elastómero, se procede a hacer el cálculo del número de capas de caucho, el número de capas de acero la altura total interna del aislador con las siguientes fórmulas:

$$N_{\text{caucho}} = \frac{H_r}{e_{\text{caucho}}} \quad (3.19)$$

$$N_{acero} = N_{caucho} - 1 \quad (3.20)$$

$$H_t = N_{caucho} * e_{caucho} + N_{acero} * e_{acero} \quad (3.21)$$

Donde  $N_{caucho}$ ,  $N_{acero}$  son la cantidad de capas de caucho y láminas acero que hay en el prototipo de aislador sísmico;  $e_{caucho}$ ,  $e_{acero}$  son los espesores de caucho y acero, y el  $H_t$  es la altura total interna del aislador.

El número de capas de caucho y láminas de acero es:

$$N_{caucho} = \frac{0.114}{0.006} = 19$$

$$N_{acero} = 22 - 1 = 18$$

La altura de caucho y la altura total interna, respectivamente, es igual a:

$$H_r = 19(0.006m) = 0.114m$$

$$H_t = 19(0.006) + 18(0.002) = 0.15 m.$$

### 3.2.7 Propiedades del Aislador

#### 3.2.7.1 Factor de Forma

El factor de forma  $S_f$  relaciona el diámetro y el espesor de la capa de goma, este factor es muy importante ya que controla la flexibilidad horizontal e influye en la rigidez vertical, se recomienda que su valor sea mayor a 10, en aisladores (Kang & Kang, 2009; Naeim & Kelly, 1999). En caso el valor de S sea bajo, cambiar el espesor de goma y recalcularlo.

$$S_f = \frac{\emptyset}{4e_{caucho}} \quad (3.22)$$

$$S_f = \frac{\emptyset}{4e_{goma}} = \frac{0.29 m}{4(0.006)} = 12.08 > 10 \text{ Cumple!}$$

#### 3.2.7.2 Módulo de Compresión.

El módulo de compresión  $E_c$ , se encuentra definido por la siguiente ecuación (Kelly, 1997). El valor del módulo de compresión  $E_c$  para una sola capa está controlado por el factor de forma  $S$ . Existen varias fórmulas empíricas para el

cálculo del  $E_c$ , sin embargo, esta es la más usada para aisladores circulares considerando el factor de compresibilidad:

$$E_c = \left( \frac{1}{6GS_f^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (3.23)$$

Donde  $K$  es el módulo de compresibilidad del elastómero

Reemplazando los valores de la Tabla N° 3.5, se tiene:

$$E_c = \left( \frac{1}{6(894.4 \text{ kN/m}^2)(12.08)^2} + \frac{4}{3(2000000 \text{ kN/m}^2)} \right)^{-1} = 514684.1 \text{ kN/m}^2$$

### 3.2.7.3 Rigidez Vertical

La rigidez vertical  $K_v$  del aislador sísmico se estima de la siguiente expresión.

$$K_v = \frac{E_c A}{H_r} \quad (3.24)$$

La rigidez vertical equivale:

$$K_v = \frac{(514684.1 \text{ kN/m}^2)(0.0661 \text{ m}^2)}{19(0.006 \text{ m})} = 298209.7 \text{ kN/m}$$

### 3.2.7.4 Frecuencias del Aislador

Se debe verificar que el sistema de aislación posea una rigidez vertical  $f_v$  considerable de manera que disminuya deformaciones verticales y amplificaciones de las aceleraciones, esto se logra con una frecuencia vertical que sea superior a 10Hz.

$$f_h = \frac{1}{T_D} \quad (3.25)$$

$$f_v = \sqrt{6} S_f f_h \quad (3.26)$$

Reemplazando:

$$f_h = \frac{1}{1.2} = 0.83 \text{ Hz}$$

$$f_v = \sqrt{6}(12.08)(0.8 \text{ Hz}) = 24.67 \text{ Hz} > 10 \text{ Hz} \text{ Cumple!}$$

### 3.2.7.5 Esfuerzo en láminas de Acero

De la Tabla N° 3.5 se propone un valor de espesor para las láminas de acero  $e_{acero}$ , y se verifica que la tensión de trabajo no exceda el valor admisible. Primero, se calcula el valor de la tensión máxima en las placas  $\sigma_s$  la cual depende de la razón entre los espesores de la capa de caucho, la de acero y de la tensión de compresión máxima en el aislador; finalmente, la tensión admisible  $\sigma_{adm}$  debe ser mayor o igual que  $\sigma_s$  para que cumpla ( $\sigma_s \leq \sigma_{adm}$ ).

$$\sigma_s = 1.5 \frac{e_{caucho}}{e_{acero}} \sigma_c \quad (3.27)$$

$$\sigma_{adm} = 0.75 \sigma_y \quad (3.28)$$

Donde  $\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia del acero.

La tensión máxima en las placas equivale:

$$\sigma_s = 1.5 \left( \frac{0.006m}{0.002m} \right) (15000 \text{ kN}/\text{m}^2) = 67500 \text{ kN}/\text{m}^2$$

Finalmente, la tensión admisible es:

$$\sigma_{adm} = 0.75 \sigma_y$$

$$\sigma_{adm} = 0.75 (250000 \text{ kN}/\text{m}^2) = 187500 \text{ kN}/\text{m}^2$$

$$\therefore \sigma_s < \sigma_{adm}$$

### 3.2.8 Modelo Bilineal

Las propiedades mecánicas del prototipo de aislador ABC se obtendrán del modelo Bilineal explicado en el capítulo 2.1.3.1.

Debido a que el área del aislador fue obtenida para un diámetro de 30 cm, se recalcula la rigidez horizontal del aislador, con la ecuación (3.17). Entonces resultaría:

$$K_{aH} = \frac{GA}{H_r} = \frac{894.4 \text{ kN}/\text{m}^2 (661 \text{ cm}^2)}{19(0.006 \text{ m})} = 518.22 \text{ kN}/\text{m}$$

Se define  $E_D$  como la energía disipada por ciclo y es considerada como el área encerrada en cada ciclo de histéresis, limitada por el desplazamiento lateral máximo positivo y negativo en cada ciclo.

$$E_D = 2\pi K_{aH} D_M^2 \beta \quad (3.29)$$

Reemplazando:

$$E_D = 2(3.1416)(518.22 \text{ kN/m})(0.168\text{m})^2(0.10) = 9.19 \text{ kN.m}$$

La deformación elástica está dada como un porcentaje  $\lambda$  de la altura total del elastómero, como muestra la siguiente expresión:

$$D_y = \lambda H_r \quad (3.30)$$

$$D_y = 0.1(0.114\text{m}) = 0.011 \text{ m}$$

Así también:

$$E_D = 4Q(D - D_y) \quad (3.31)$$

Reordenando la ecuación (3.31), se obtiene la fuerza característica  $Q$ , como:

$$Q = \frac{E_D}{4(D_M - D_y)}$$

$$Q = \frac{9.19 \text{ kN.m}}{4(0.168\text{m} - 0.011\text{m})} = 14.67 \text{ kN}$$

Obtenida la fuerza característica  $Q$ , la rigidez post-fluencia  $K_2$  se calcula como:

$$K_2 = K_{aH} - \frac{Q}{D_M} \quad (3.32)$$

Reemplazando:

$$K_2 = K_{aH} - \frac{Q}{D_M}$$

$$K_2 = 518.22 \text{ kN/m} - \frac{14.67 \text{ kN}}{0.168\text{m}} = 430.89 \text{ kN/m}$$

Rigidez pre-fluencia o elástica  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{Q}{D_y} + K_2 \quad (3.33)$$

$$K_1 = \frac{14.67 \text{ kN}}{0.011 \text{ m}} + 430.89 \text{ kN/m} = 1717.82 \text{ kN/m}$$

La rigidez efectiva  $K_{eff}$  puede ser expresada en parámetros de fuerza característica  $Q$  y rigidez postfluencia  $K_2$  con el correspondiente desplazamiento lateral máximo  $D_M$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D_M} \quad (3.34)$$

La fuerza de fluencia  $F_y$ , se determina con la siguiente expresión:

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad (3.35)$$

$$F_y = 14.67 \text{ kN} + 430.89 \frac{\text{kN}}{\text{m}} (0.011 \text{ m}) = 19.58 \text{ kN}$$

El amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  se define como:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (3.36)$$

Para un desplazamiento  $D_M = 0.168 \text{ m}$ , la razón de amortiguamiento efectivo será:

$$\beta_{eff} = \frac{4(14.52 \text{ kN})(0.168 - 0.011)}{2\pi(518.22 \text{ kN/m})(0.168^2)} = 10\%$$

El periodo de diseño  $T_M$ , puede ser calculado nuevamente mediante la ecuación (2.13)

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{M_T}{K_{eff}}}$$

$$T_M = 2(3.1416) \sqrt{\frac{188.19 \text{ kN}}{(9.81 \text{ m/s}^2)(518.22)}} = 1.21 \text{ s}$$

Para graficar el modelo bilineal es necesario seguir la secuencia mostrada en el capítulo 2.1.3.1 (Ver Figura N° 3.15). De este modelo se puede conocer propiedades mecánicas del aislador, como su rigidez pre-fluencia, rigidez post-fluencia y la fuerza de fluencia para el diseño de los elementos estructurales de la estructura objetivo.

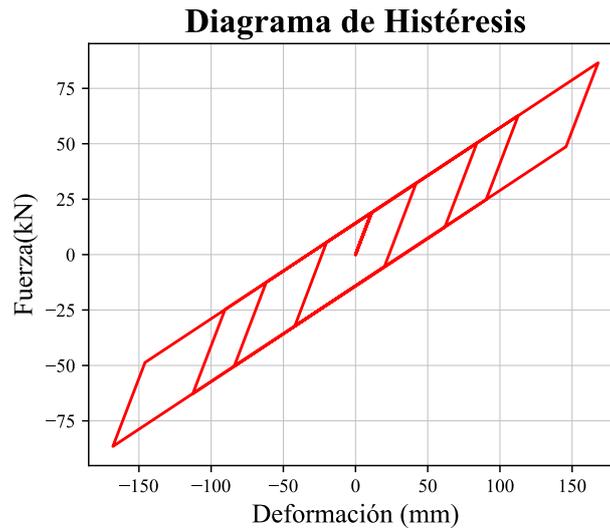


Figura N° 3.15 Histéresis Bilineal Teórica del Aislador ABC-C  
(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.2.9 Desplazamiento total de la Edificación

En este punto se considera un desplazamiento adicional al traslacional, producto de la torsión real y accidental de la estructura objetivo y se calcula de la siguiente manera (Naeim & Kelly, 1999):

$$D_{TM} = D_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (3.37)$$

Donde  $d, b$  son las distancias de la dirección más larga y corta de la estructura, respectivamente,  $y$  es la distancia, entre el centro de rigidez del sistema de aislación y el elemento de interés (Aislador más alejado medido perpendicularmente a la dirección del sismo considerado), y  $e$  es la excentricidad real medida entre el centro de masa de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, más una excentricidad tomada como el 5% de la dimensión en planta más larga de la estructura perpendicular a la dirección de la fuerza que se examina.

De la vivienda objetivo (Ver Figura N° 3.12), se puede obtener las siguientes distancias:

$$d = 7.50m$$

$$b = 7.25m$$

La distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislación y el elemento de interés en ambas direcciones es igual a:

$$y_x = 0.5(7.5m) = 3.75m$$

$$y_y = 0.5(7.5m) = 3.75m$$

Se considera una excentricidad real igual a 0.10m en las 2 direcciones.

- Excentricidad accidental es:

$$e_{ac\ x} = 0.05(7.50m) = 0.375m$$

$$e_{ac\ y} = 0.05(7.25m) = 0.363m$$

Reemplazo las variables en la ecuación (3.23):

$$D_{TM\ x} = 0.168\left[1 + 3.75\left(\frac{12(0.1 + 0.375)}{7.25^2 + 7.5^2}\right)\right] = 0.201m$$

$$D_{TM\ y} = 0.168\left[1 + 3.625\left(\frac{12 * (0.1 + 0.3625)}{7.25^2 + 7.5^2}\right)\right] = 0.199m$$

Finalmente, se verifica que el desplazamiento total  $D_{TM}$  debe ser el mayor valor hallado en la ecuación anterior y el  $D_{TM}$  deberá ser menor a  $1.15D_M$ , caso contrario, se debe demostrar que el sistema de aislamiento pueda resistir la torsión en consecuencia.

$$1.15D_M = 1.15(0.168m) = 0.193m$$

$$D_{TM} = 0.201m > 0.193m$$

### 3.2.10 Verificación de la estabilidad del aislador sísmico ABC

La verificación del diseño está referido a los requerimientos y fórmulas del Anexo 2 de la N.T.P E.031 "Aislamiento Sísmico". La Figura N° 3.16 muestra el área reducida de acción de la carga axial cuando el aislador sísmico sufre una deformación lateral D.

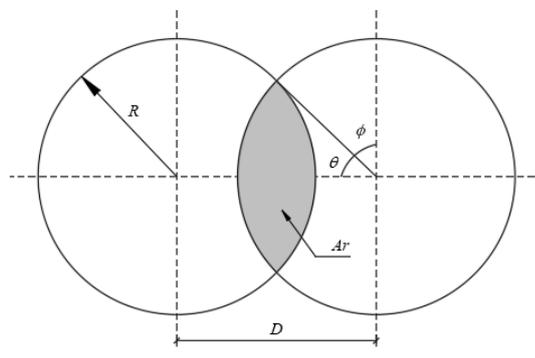


Figura N° 3.16 Notación para el Área Reducida

(Fuente: Naeim & Kelly, 1999)

Asimismo, la Tabla N° 3.7 muestra las propiedades mecánicas aproximadas para un elastómero de caucho.

Tabla N° 3.7 Tabla de relación entre propiedades mecánicas del elastómero

Dureza IRHD±2	Módulo de Young E (MPa)	Módulo de cortante G (MPa)	Constante del Material $k_m$	Elongación a la ruptura mínima
37	1.35	0.40	0.87	650
40	1.50	0.45	0.85	600
45	1.80	0.54	0.80	600
50	2.20	0.64	0.73	500
55	3.25	0.81	0.64	500
60	4.45	1.06	0.57	400

(Fuente: Leyton, 2017)

### 3.2.10.1 Capacidad de Pandeo

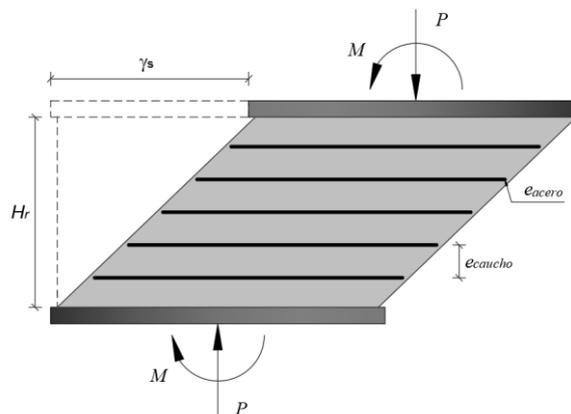


Figura N° 3.17. Diagrama de Flexo-compresión del Aislador

(Fuente: Adaptado de Kelly, 1997)

Módulo Elástico:

$$E_o = 4(0.89MPa) = 3.58 MPa \langle \rangle 3580 kN/m^2$$

Módulo de Compresión:

$$E_C = E_o(1 + 2kS_f^2) \quad (3.38)$$

El valor de k se calcula de la

$$\frac{1.06 - 0.81}{1.06 - 0.89} = \frac{0.57 - 0.64}{0.57 - k}$$

$$k = 0.616$$

Reemplazando en la ecuación de Módulo de Compresión:

$$E_C = 3.58 MPa(1 + 2(0.616)(12.08^2))$$

$$E_C = 646.76 MPa \langle \rangle 646760 kN/m^2$$

Área reducida (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2019):

$$A_R = A(2) \left( \frac{\left[ \phi^2 \sin^2 \left( \frac{\sqrt{\phi^2 - D_{TM}^2}}{\phi} \right) - D_{TM} \sqrt{\phi^2 - D_{TM}^2} \right]}{\pi \phi^2} \right) \quad (3.39)$$

- Pandeo para solo la carga axial:

El área reducida va ser igual al área del aislador sin el recubrimiento o espesor de caucho de la zona exterior del aislador.

La carga axial se estimó a la combinación 1.4D + 1.7L:

$$P_u = 320.0 \text{ kN}$$

La carga crítica está definida por la siguiente ecuación:

$$P_{\text{crítico}} = \frac{\pi}{\sqrt{8}} G S_f \frac{\phi}{N_{\text{caucho}} \cdot e_{\text{caucho}}} A_R \quad (3.40)$$

Factor de Seguridad (FS):

- ✓ Solo para carga axial, FS=3.0
- ✓ Para carga axial última a  $D_{TM}$ , FS>1.0

$$P_{\text{crítico}} = \frac{3.14}{\sqrt{8}} (894.4 \text{ kN/m}^2)(12.08) \left( \frac{0.29\text{m}}{19(0.006\text{m})} \right) (0.0661\text{m}^2) = 2016.43 \text{ kN}$$

$$\therefore \frac{P_{\text{crítico}}}{P_u} = 6.3 > 3 \text{ Cumple!}$$

- Pandeo para Carga Axial Máxima

El área reducida estará dada por:

$$A_R = 0.066\text{cm}^2 (2) \left( \frac{\left[ (0.29\text{cm})^2 \left( \sin^2 \left( \frac{\sqrt{(0.29\text{cm})^2 - (0.20\text{cm})^2}}{0.29} \right) \right) - 0.25(\sqrt{0.04}) \right]}{(3.14)(0.29\text{cm})^2} \right)$$

$$A_R = 0.01284 \text{ m}^2$$

La carga axial se asigna la carga vertical máxima (CVMA):

$$P_u = 376.88 \text{ kN}$$

Reemplazando los valores en la ecuación (3.40) se obtiene:

$$P_{crítico} = \frac{3.14}{\sqrt{8}} (894.4 \text{ kN/m}^2)(12.08) \left( \frac{0.29\text{m}}{19(0.006\text{m})} \right) (0.0128\text{m}^2)$$

$$P_{crítico} = 392.04 \text{ kN}$$

$$\therefore \frac{P_{crítico}}{P_u} = 1.04 > 1 \text{ Cumple!}$$

### 3.2.10.2 Deformación por Corte

- Deformación por corte debido deformación:

$$\gamma_D = \frac{D_{TM}}{H_r} \leq 2.5 \quad (3.41)$$

$$\gamma_D = \frac{0.201}{0.114} = 1.76 \leq 2.5 \text{ Cumple!}$$

- Deformación por corte debido a compresión:

$$\gamma_C = \frac{6PS_f}{E_c A_R} \quad (3.42)$$

$$\gamma_C = \frac{6(376.38\text{kN})(12.08)}{(646760 \text{ kN/m}^2)(0.01284\text{m}^2)} = 3.28$$

- Deformación por corte debido a deformación angular

$$\gamma_\theta = \frac{0.375\phi^2\theta}{e_{caucho}H_t} \quad (3.43)$$

$$\theta = 0.005 \geq 0.003 \text{ en radianes}$$

$$\gamma_\theta = \frac{0.375(0.29\text{m})^2(0.005\text{rad})}{(0.006\text{m})(0.15\text{m})} = 0.18$$

- Deformación total por corte:

$$\gamma_t = \gamma_D + \gamma_C + 0.5\gamma_\theta \leq 6 \quad (3.44)$$

$$\gamma_t = 1.76 + 3.28 + 0.5(0.18) = 5.14 < 6 \text{ Cumple!}$$

### 3.2.11 Características Finales

Una vez verificado todos los requerimientos de diseño de la N.T.P. E.031 “Aislamiento Sísmico”, se presentan las propiedades geométricas y mecánicas finales para el prototipo ABC en la Tabla N° 3.8 y Tabla N° 3.9, respectivamente.

Además, un esquema gráfico del prototipo diseñado es mostrado en la Figura N° 3.18.

Tabla N° 3.8 Propiedades Geométricas del Prototipo ABC-C

Propiedades Geométricas	Resultado
Diámetro Exterior	0.30 m
Altura Total	0.15 m
Espesor de Capa de Caucho	6 mm
Número de Capas de Caucho	19
Espesor de Láminas de Acero	2 mm
Número de Láminas de Acero	18

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla N° 3.9 Propiedades Mecánicas del Prototipo ABC-C

Propiedades Mecánicas	Resultado
Rigidez Horizontal	518.22 kN/m
Rigidez Vertical	298209.7 kN/m
Rigidez Post-fluencia	430.89 kN/m
Rigidez Elástica o Pre-fluencia	1717.82 kN/m
Fuerza de Fluencia	19.58 kN/m

(Fuente: Elaboración Propia)

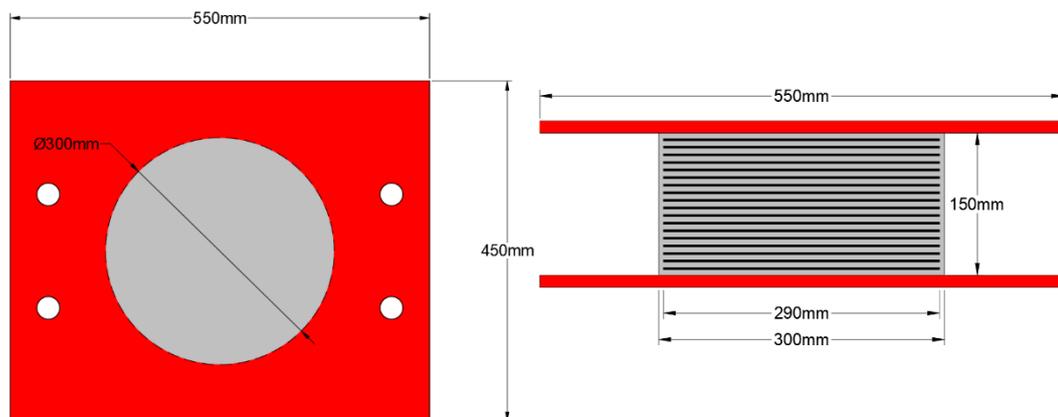
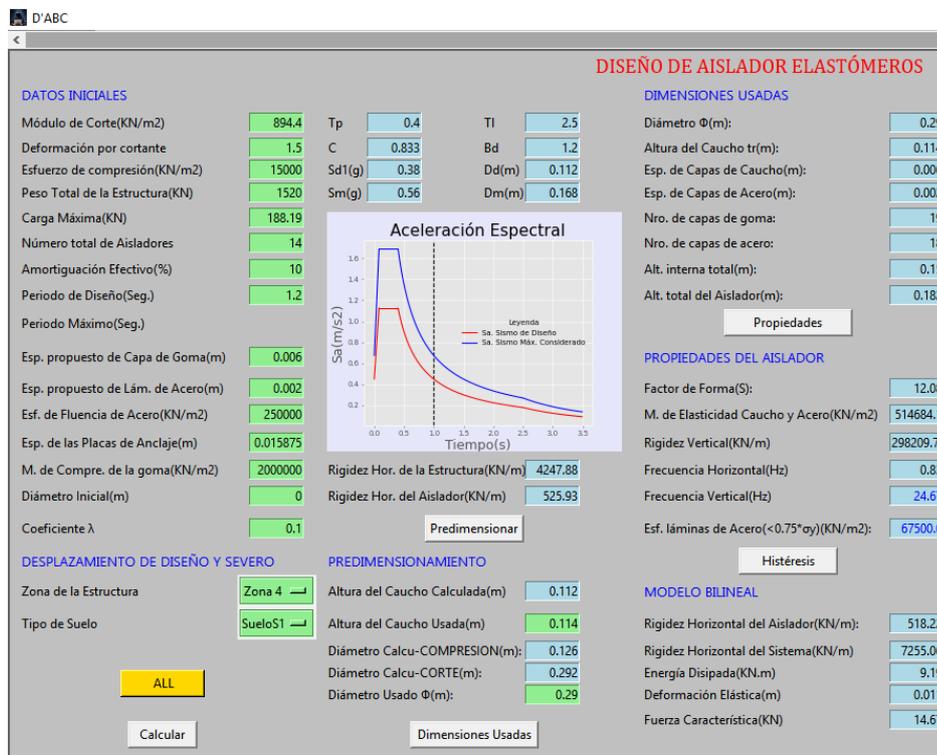


Figura N° 3.18 Dimensiones de Aislador de Bajo Costo de Neopreno (ABC-C)

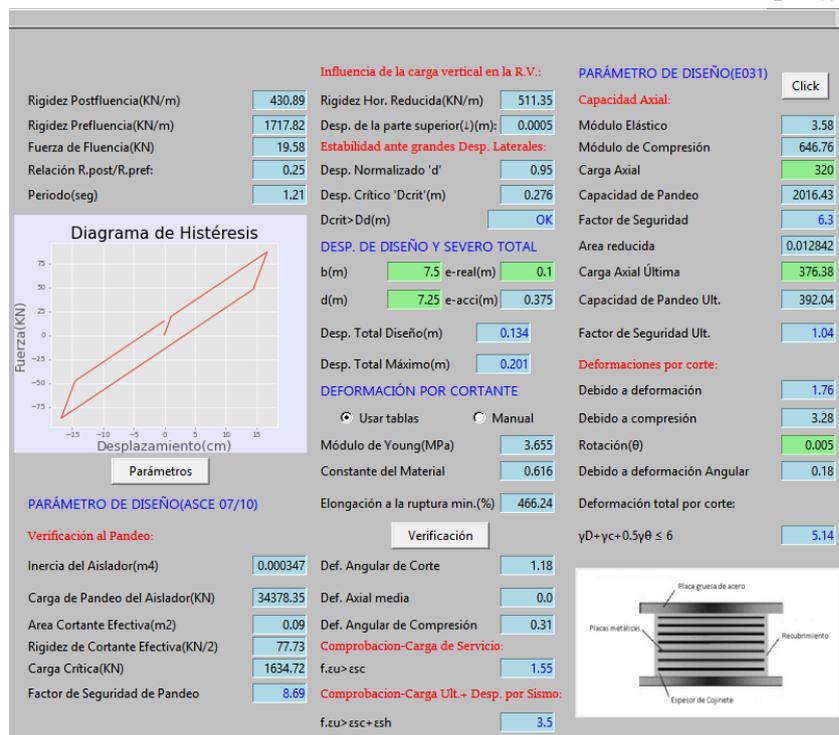
(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.3 ALGORITMO DE DISEÑO DE AISLAMIENTO SÍSMICO

Con el fin de optimizar el tiempo de diseño de un aislador sísmico circular bajo los requerimientos de la N.T.P. E.031 “Aislamiento Sísmico”, se desarrolló un programa de cómputo nombrado en esta investigación como D’ABC. Este programa fue desarrollado en lenguaje Python mediante una interfaz gráfica amigable para el usuario. El Manual de usuario del programa D’ABC es detallado en el ANEXO C, en donde se describe los valores de ingreso y los valores de salida del programa. Como modo de ejemplo, en esta sección se muestra el diseño del prototipo ABC-C desarrollado anteriormente, con el programa desarrollado.



(a)



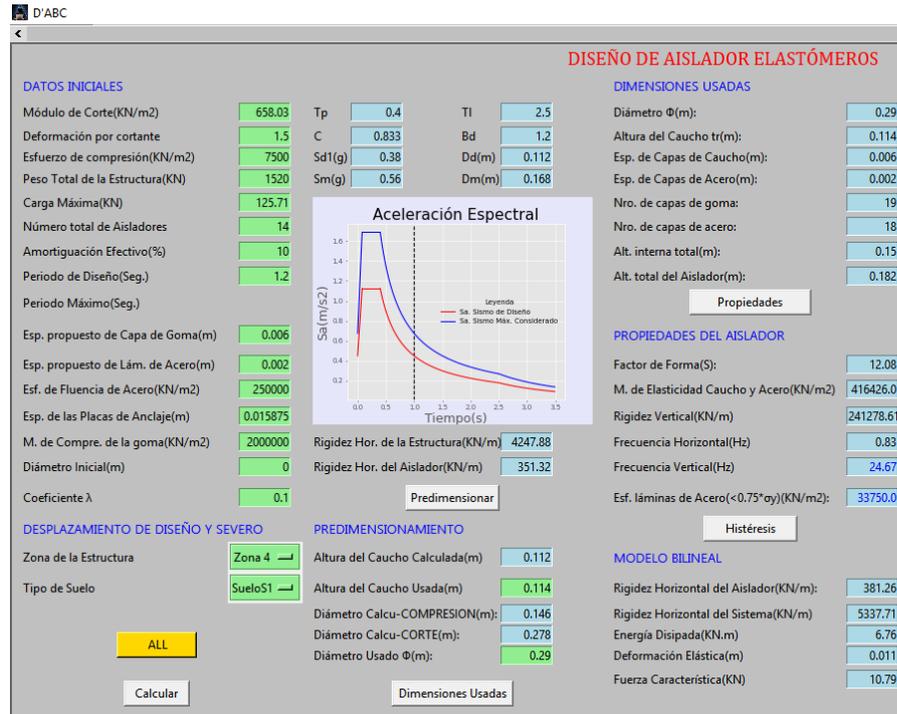
(b)

Figura N° 3.19 Resultados de Aislador de Neopreno ABC-C en el programa D'ABC (a) Pestaña Inicial y (b) Pestaña Final  
(Fuente: Elaboración Propia)

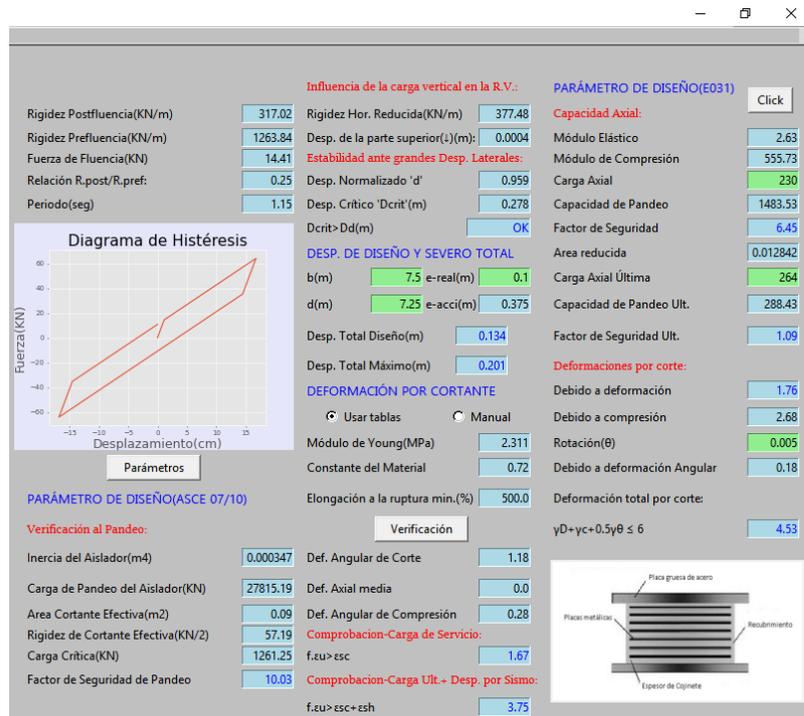
Se observa valores iguales a los calculados en el capítulo anterior. Además, se realizó mediante el programa, el diseño y verificación de los aisladores de Caucho Natural (ABC-N) y Caucho Reciclado (ABC-R).

El diseño del aislador ABC-N corresponde al aislador ubicado en el Eje C y Eje 2 o en el Eje C y Eje 3, ya que estos aisladores tienen como carga axial un valor igual a 125.71 kN y cumple con la verificación según la N.T.P E.031.

El diseño del aislador ABC-R corresponde al aislador ubicado en el Eje C y Eje 4, ya que este aislador tiene como carga axial un valor igual a 101.54kN y cumple con la verificación según la N.T.P E.031.



(a)

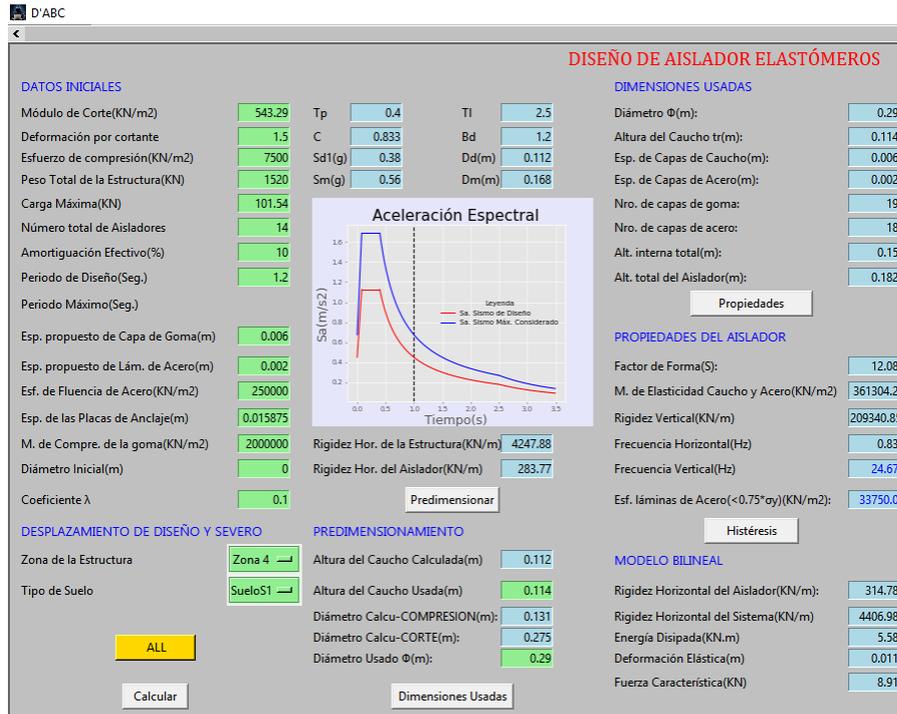


(b)

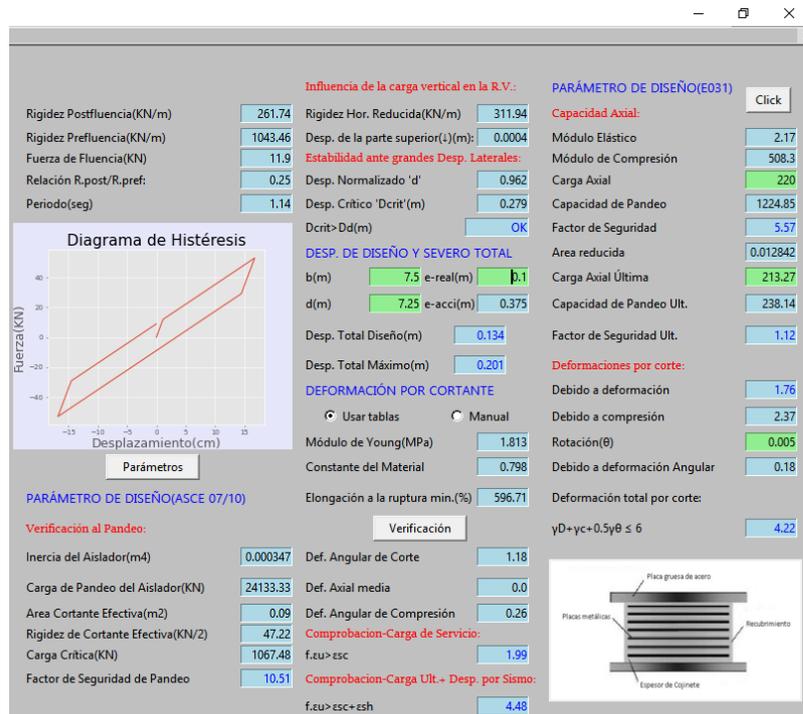
Figura N° 3.20 Resultados de Aislador de Caucho Natural ABC-N en el programa D'ABC (a)

Pestaña Inicial y (b) Pestaña Final

(Fuente: Elaboración Propia)



(a)



(b)

Figura N° 3.21 Resultados de Aislador de Caucho Reciclado ABC-R en el programa D'ABC

(a) Pestaña Inicial y (b) Pestaña Final

(Fuente: Elaboración Propia)

Los diseños anteriores, correspondientes al Caucho Natural y Caucho Reciclado, cumplen con un espesor de 7 mm y puede disminuir el costo ya que habría menor

cantidad de láminas de acero; sin embargo, la altura de la matriz fabricada para el vulcanizado, tiene una altura definida e igual a 15 cm. Por lo cual, si se usa un espesor de 7mm habría problemas en la altura respecto a esta matriz, es por eso, que se decidió conservar el espesor de caucho del prototipo ABC-C(Ver Figura N° 3.18)

Finalmente se muestra la distribución de los aisladores respecto a la vivienda objetivo con sus respectivos códigos de prototipos y sus distintas cargas promedio.

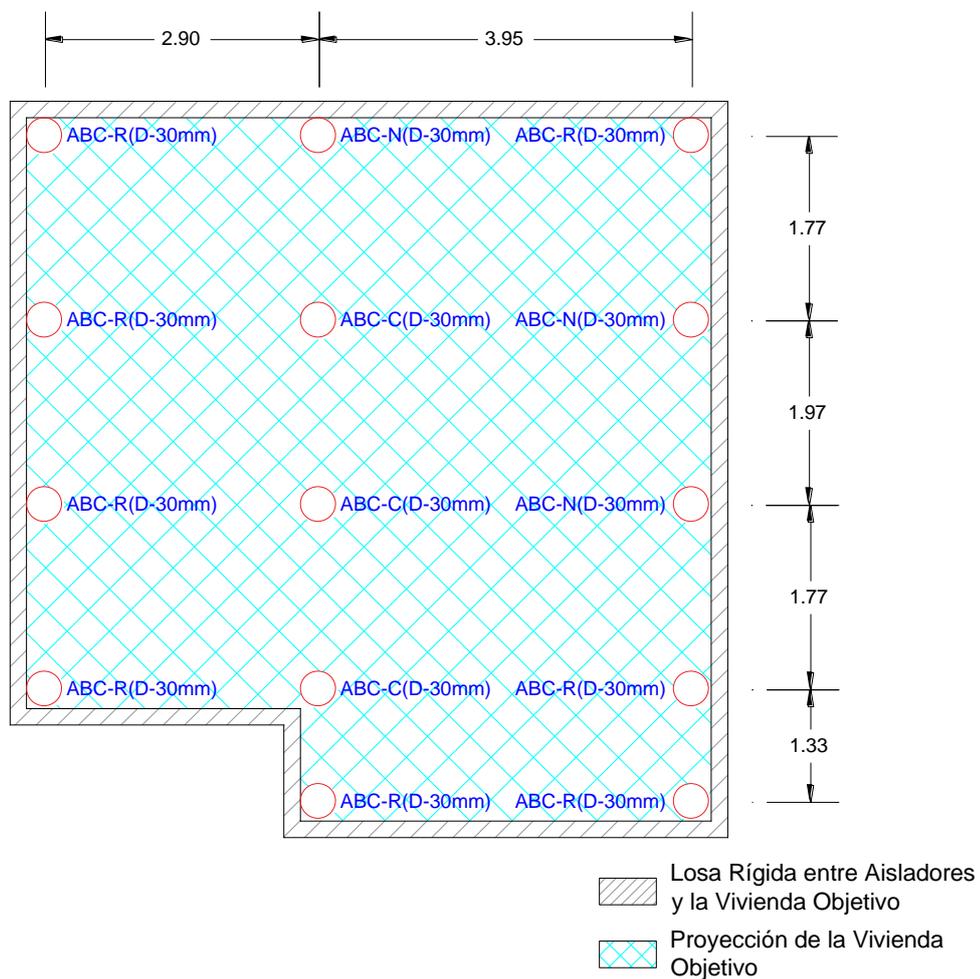


Figura N° 3.22 Distribución de aisladores con sus códigos y diámetros  
 (Fuente: Elaboración Propia)

## CAPÍTULO IV: ENSAYO EXPERIMENTAL DE AISLADORES

### 4.1 ANTECEDENTES

En 2019 se desarrolló un prototipo de aislamiento sísmico de bajo costo en el Laboratorio de Estructuras del CISMID usando caucho reciclado de llantas (Muñoz et al., 2019). El prototipo de aislamiento fue fabricado usando laminas cuadradas de 200 x 200 x 11 mm (ver Figura N° 4.1), las cuales pasaron por un proceso de vulcanizado obteniéndose un espécimen de 200 x 200 x 60 mm, como se observa en la Figura N° 4.2.



Figura N° 4.1 Láminas de caucho reciclado de llantas neumáticas  
(Fuente: Muñoz et al., 2019)



Figura N° 4.2 Especimen ABC versión 1  
(Fuente: Muñoz et al., 2019)

Tres especímenes ABC versión 1 fueron ensayados para estimar su comportamiento bajo cargas cíclicas cuasi-estáticas. La historia de desplazamiento se observa en la Figura N° 4.3.

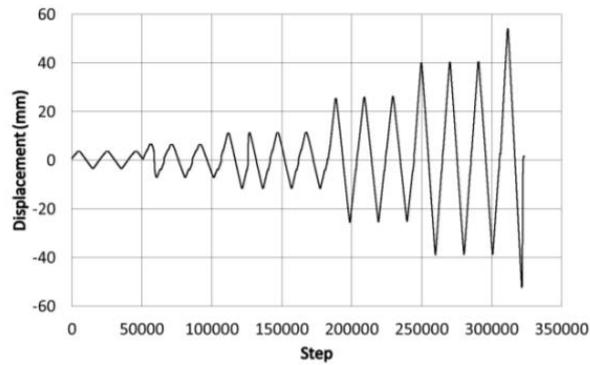


Figura N° 4.3 Historia de desplazamiento, espécimen ABC versión 1.

(Fuente: Reyna et al., 2018)

Así también, la Figura N° 4.4 muestra el mecano de ensayo usado en ese estudio, en donde se observa la aplicación de dos actuadores “Shimadzu” usados para la carga lateral y vertical. Además, en la parte baja del aislador se tiene un sistema de rodillos el cual fue colocado con el fin de ser la plataforma de rodadura de la viga que realiza el desplazamiento lateral del aislador. Sin embargo, en ese estudio se determinó que dicho sistema de rodillo causaba una disipación de energía por fricción extra al comportamiento histerético del espécimen. Esto era causado por el hecho de que dicho sistema no contaba con un sistema de rodajes, el cual ha sido implementado en el presente estudio.



Figura N° 4.4 Mecano de ensayo de espécimen ABC versión 1.

(Fuente: Reyna et al., 2018)

Se ensayó 3 especímenes ABC versión 1, en donde se observó que las mallas de alambre propias de las láminas de caucho reciclado de llantas no eran suficientes para proporcionar una rigidez axial adecuada. Por este motivo, la carga axial

durante los ensayos de carga cíclica lateral estuvo entre 8 a 12 tonf. Así también, el desplazamiento que se alcanzó antes de la falla fue de un desplazamiento igual a su altura (deformación unitaria de 100%). Finalmente, el modelo matemático histerético de Bouc-Wen fue ajustado al comportamiento histerético experimental, obteniéndose una buena aproximación. Debido a las dificultades obtenidas en este estudio, se generó recomendaciones para mejorar la presente versión, dichas recomendaciones están siendo subsanadas en la presente tesis.

#### 4.2 DESCRIPCIÓN DEL ESPECIMEN

Se fabricaron 3 especímenes de prototipo de aislamiento sísmico (1 de material neopreno, 1 de caucho natural y 1 de caucho reciclado). Las dimensiones del caucho y las láminas internas se muestran en la, las cuales se sometieron a un proceso de vulcanizado, detallados en el ANEXO D y se agregaron dos placas de acero de 55 cm x 45 cm x 1/2" con 4 huecos de 1" de diámetro en sus extremos, con el fin de conectar al mecano de ensayo. Una foto de cada espécimen es mostrada en la Figura N° 4.5.



Figura N° 4.5 Prototipos de Aislamiento Sísmico de Bajo Costo

(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Los ensayos de carga lateral cíclica de los 3 prototipos de aislamiento sísmico de bajo costo serán realizados en el Laboratorio de Estructuras del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), el cual

cuenta con la capacidad de realizar ensayos de carga cuasi-estática mediante actuadores “Shimadzu” los cuales tienen una capacidad máxima de carga de 75 tonf y 400 mm de desplazamiento total de su cabezal. Debido a esto, se seguirá el procedimiento propuesto por la Norma Técnica Peruana E.031 de Aislamiento Sísmico, el cual propone una serie de desplazamientos objetivos con cierta carga axial referidas a las combinaciones propuestas en la misma norma. El orden de ensayo es el siguiente:

Secuencia de carga axial igual a la combinación de carga de  $1.0 CM + 0.5 CV$ :

1. Veinte ciclos completos de carga y descarga correspondientes a la fuerza lateral de diseño para viento.
2. Tres ciclos completos de carga y descarga correspondientes a los desplazamientos de  $0.25 D_M$ ,  $0.50 D_M$ ,  $0.67 D_M$  y  $1.00 D_M$ , donde  $D_M$  es el desplazamiento lateral traslacional de diseño.
3. Tres ciclos completos de carga y descarga correspondientes al desplazamiento traslacional  $1.00 D_M$ .
4. Diez ciclos completos de carga y descarga correspondientes a  $0.75 D_M$ .

Secuencia de carga axial igual a la combinación de carga de  $1.25 (CM + CV) + 1.00 (SCH + CSV) + 0.20 N$ :

5. Tres ciclos completos de carga y descarga correspondientes a los desplazamientos de  $0.25 D_M$ ,  $0.50 D_M$ ,  $0.67 D_M$  y  $1.00 D_M$ , donde  $D_M$  es el desplazamiento lateral traslacional de diseño.

Secuencia de carga axial igual a la combinación de carga de  $0.90 CM - 1.0 (SCH + CSV)$ :

6. Tres ciclos completos de carga y descarga correspondientes a los desplazamientos de  $0.25 D_M$ ,  $0.50 D_M$ ,  $0.67 D_M$  y  $1.00 D_M$ , donde  $D_M$  es el desplazamiento lateral traslacional de diseño.

Secuencia de carga axial igual a la combinación de carga de  $CSMA$ :

7. Un ciclo completo de carga y descarga correspondientes al desplazamiento de  $1.00 D_{TM}$ . Donde  $D_{TM}$ , es el desplazamiento traslacional considerando torsión en planta de la estructura.

Secuencia de carga axial igual a la combinación de carga de *CSMI*:

8. Un ciclo completo de carga y descarga correspondientes al desplazamiento de  $1.00 D_{TM}$ . Donde  $D_{TM}$ , es el desplazamiento traslacional considerando torsión en planta de la estructura

Tabla N° 4.1 Historia de Carga y Desplazamientos de los prototipos

N° de Ciclos	Desplazamiento Relativo	Desplazamiento (mm)	Carga Axial (kN)		
			ABC - C	ABC - N	ABC - R
3	0.25D <sub>M</sub>	42			
3	0.50D <sub>M</sub>	84			
3	0.67D <sub>M</sub>	112.6	184.8	123.5	99.7
3	1.00D <sub>M</sub>	168			
3	1.00D <sub>M</sub>	168			
10	0.75D <sub>M</sub>	126			
3	0.25D <sub>M</sub>	42			
3	0.50D <sub>M</sub>	84	376.9	251.8	203.4
3	0.67D <sub>M</sub>	112.6			
3	1.00D <sub>M</sub>	168			
3	0.25D <sub>M</sub>	42			
3	0.50D <sub>M</sub>	84	25.9	17.3	14.0
3	0.67D <sub>M</sub>	112.6			
3	1.00D <sub>M</sub>	168			

(Fuente: Elaboración Propia)

De esta forma, se propuso realizar un mecano de ensayo con el fin de asegurar estructuralmente la transmisión de carga unidireccional del actuador electro-hidráulico hacia el espécimen y dirigir de una forma segura la ejecución del ensayo, mejorando la versión 1 mostrada en la Figura N° 4.4. Dicho mecano de carga puede ser visto en la Figura N° 4.6 y Figura N° 4.7 y el plano más detallado en el ANEXO G.

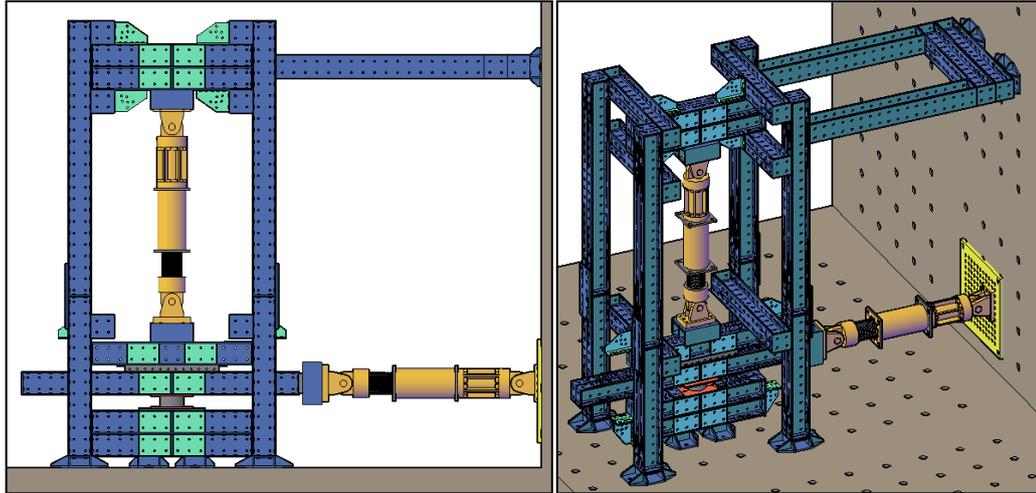


Figura N° 4.6 Vistas Digitales del Mecano para montaje del Ensayo Cuasi Estático del Aislador  
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura N° 4.7 Ensamble del Mecano de Ensayo Cuasi-Estático del Aislador  
(Fuente: Elaboración Propia)

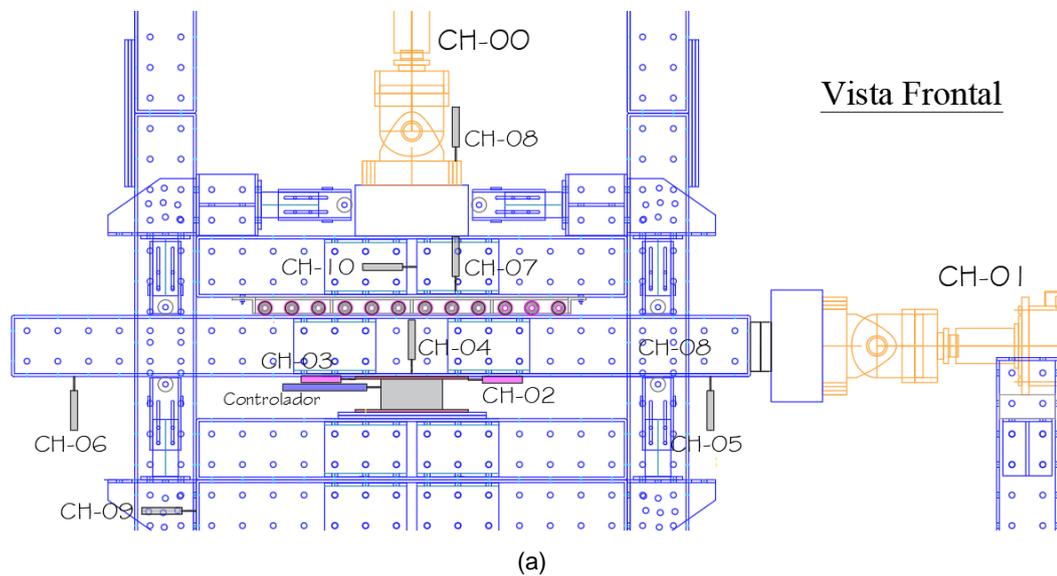
Se observa, en la parte superior de la viga de anclaje conectada al actuador horizontal, la implementación de una pieza metálica que cuenta con un sistema de rodillos el cual dará movilidad a la carga lateral impuesta por el actuador horizontal. De esta forma, el actuador horizontal tendrá libertad de desplazarse junto al espécimen de aislamiento sísmico a un desplazamiento lateral que se le imponga. Dicho sistema de rodillos ha sido verificado bajo cargas máximas estáticas con el fin de ser factible su uso durante el ensayo cíclico lateral del prototipo ABC. Dicha verificación estructural se muestra en el ANEXO E.

Además, el ensayo fue ejecutado por un grupo de personas que cumplían diferentes responsabilidades detalladas en un “protocolo de ensayo” interno, aprobado por el Jefe de Proyecto. En el ANEXO F, se presenta la función del equipo de ensayo, las acciones realizadas en las diferentes etapas de ensayo y un esquema del área de trabajo.

#### 4.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El ensayo se controló paralelamente, es decir, el actuador horizontal mediante un programa computarizado y compatible al controlador del actuador “Shimadzu” y el actuador vertical, manualmente a través del controlador de fábrica del actuador.

Para el registro de deformaciones y carga del ensayo se utilizaron 9 transductores de desplazamiento (a uno de ellos se le llamo controlador, ya que, era el transductor que se conectaba directamente con la computadora y del cual dependía un ensayo ideal) y 2 actuadores respectivamente, su distribución se muestra en la Figura N° 4.8 y el rango de los dispositivos en la



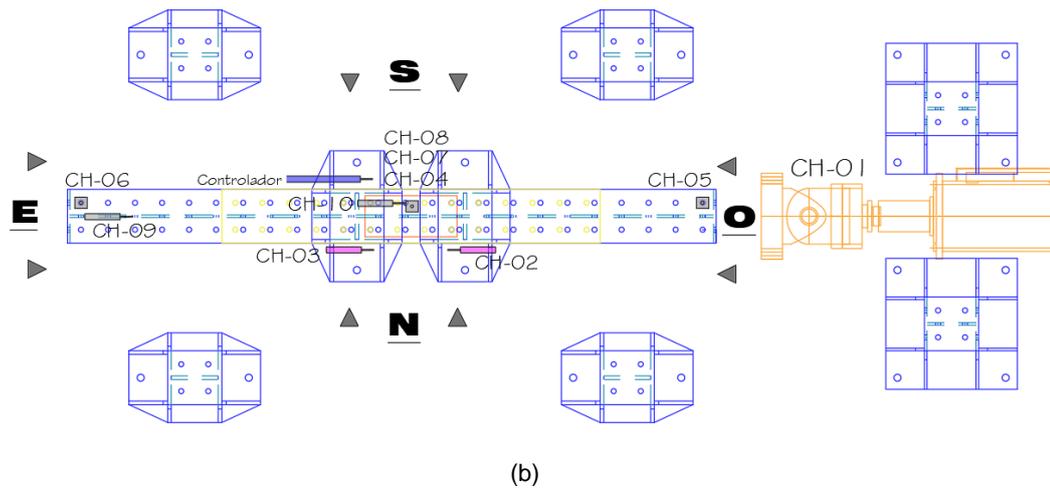


Figura N° 4.8 Instrumentación - Transductores y Actuadores de Carga (a) Vista Frontal y (b) Vista en Planta

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla N° 4.2 Rangos de deformación y carga de dispositivos

Canales	Dispositivos	Rango	Símbolo
CH-00	Actuador	$\pm 750$ kN	
CH-01	Actuador	$\pm 750$ kN	
CH-02	LVDT	$\pm 100$ mm	
CH-03	LVDT	$\pm 100$ mm	
CH-04	LVDT	$\pm 25$ mm	
CH-05	LVDT	$\pm 50$ mm	
CH-06	LVDT	$\pm 50$ mm	
CH-07	LVDT	$\pm 25$ mm	
CH-08	LVDT	$\pm 25$ mm	
CH-09	LVDT	$\pm 25$ mm	
CH-10	LVDT	$\pm 25$ mm	
Controlador	LVDT	$\pm 200$ mm	

(Fuente: Elaboración Propia)

En el esquema se muestra las posiciones de los canales que se usaron en el ensayo en vista frontal y en planta, cada uno de ellos se ubicó estratégicamente cumpliendo funciones específicas que se describe en la Tabla N° 4.3.

Tabla N° 4.3 Descripción funcional de dispositivos LVDT

Dispositivo	Descripción
Controlador	Es el LVDT más importante del ensayo, el cual como su nombre dice, sirve para controlar el movimiento del ensayo, mediante un programa de control elaborado por el Bach. Luis Núñez en el CISMID.
CH0	Canal encargado del registro de la carga axial que se aplica al dispositivo
CH1	Canal encargado del registro de la carga horizontal que se aplica al dispositivo para cada caso de deformación.
CH2	Canal encargado del registro de desplazamiento horizontal del espécimen, cuando este se mueva en la dirección este del mecano.
CH3	Canal encargado del registro de desplazamiento horizontal del espécimen, cuando este se mueva en la dirección oeste del mecano.
CH4	Canal encargado del registro de desplazamiento vertical del espécimen.
CH5	Canal encargado del registro de desplazamiento vertical en el extremo derecho de la viga móvil.
CH6	Canal encargado del registro de desplazamiento vertical en el extremo izquierdo de la viga móvil.
CH7	Canal encargado del registro de desplazamiento vertical total del espécimen y rodillos.
CH8	Canal encargado del registro de desplazamiento vertical total del espécimen, rodillos y posibles deformaciones de los elementos de acero del mecano.
CH9	Canal encargado del registro de desplazamiento horizontal de la base (precaución).
CH10	Canal encargado del registro de desplazamiento horizontal del actuador vertical (precaución).

(Fuente: Elaboración Propia)

El rango de deformación de los especímenes ensayados se muestra a continuación en la Tabla N° 4.4, identificándose un vulcanizado no tan eficaz en la zona de unión entre las placas de anclaje y el caucho de los prototipos, sin embargo, la mayoría de dispositivos culminaron la historia de desplazamiento para la carga promedio.

Tabla N° 4.4 Rangos Máximos de Desplazamiento y Estado Final de Especímenes

Especímen	Tipo de Carga	Desp. Máximo	Estado
ABC-C	Máximo	168mm	Falló
ABC-N	Mínimo	168mm	Falló
ABC-R	Promedio	168mm	Falló

(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.4.1 Ensayo de Fricción del sistema de rodaje

Con la finalidad de verificar el buen funcionamiento y mejoramiento de la nueva propuesta del mecano con sistemas de rodaje, se realizó un ensayo adicional, con el propósito físico de estudiar la fricción producida por el sistema de rodajes y determinar su coeficiente de fricción dinámico y su rigidez vertical.

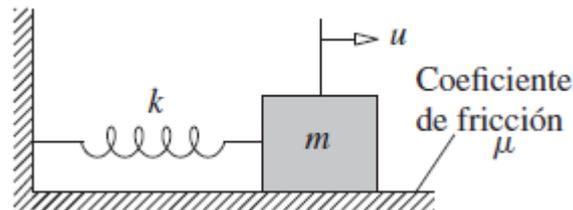


Figura N° 4.9 Esquema dinámico del Ensayo  
 (Fuente: Chopra,2014)

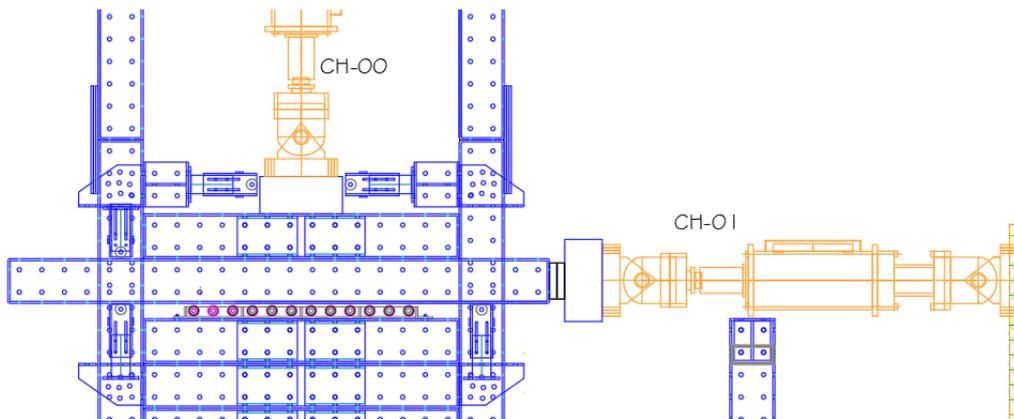


Figura N° 4.10 Mecano del Ensayo de Fricción del sistema de Rodajes - Vista Frontal  
 (Fuente: Elaboración Propia)

En este ensayo se invirtió la posición de los rodillos (Ver Figura N° 4.10), y se fue aumentando gradualmente la carga axial cada 100 kN hasta un total de 400 kN y sumando la carga muerta propia de las piezas metálicas equivalente aproximadamente a 11.48 kN. Los datos experimentales se linealizaron, obteniendo así de este ensayo un coeficiente de fricción dinámico del sistema de rodaje igual a 0.0133 y una rigidez vertical de 41.14 kN/mm, con un coeficiente de determinación mayor al 90%. (Ver Figura N° 4.11 y Figura N° 4.12)

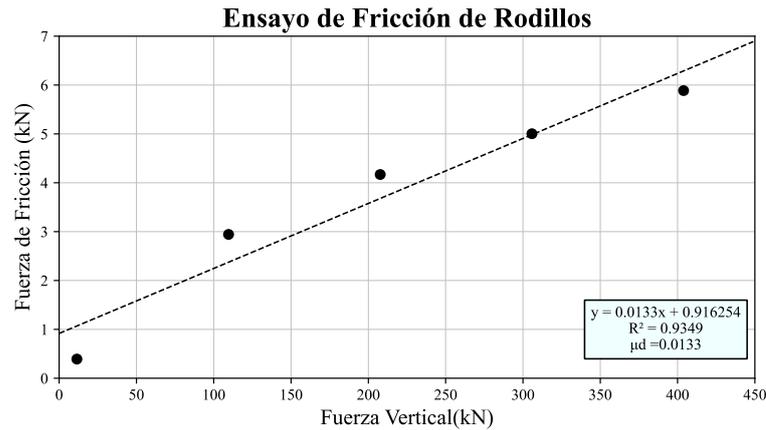


Figura N° 4.11 Fricción de Rodillos  
 (Fuente: Elaboración Propia)

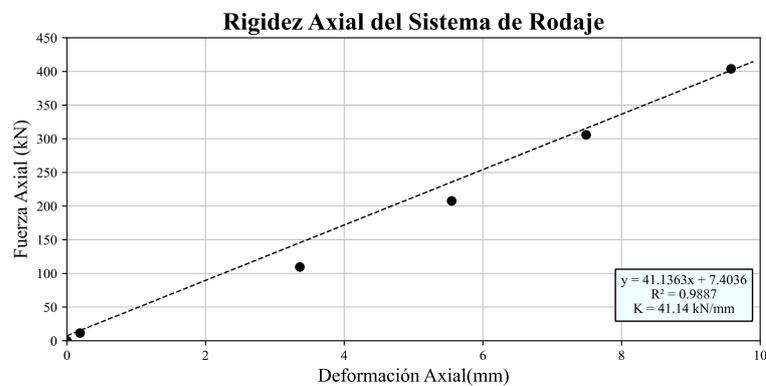


Figura N° 4.12 Rigidez Axial del Sistema de Rodillos  
 (Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.4.2 Resultados Experimentales de Prototipos de Aislamiento Sísmico (ABC)

##### 4.4.2.1 Carga Axial de Ensayo

En concordancia con lo mostrado en la Tabla N° 4.1, cada espécimen se sometió a diferentes cargas axiales. Sin embargo, debido a la precaución del personal de investigación y los equipos del laboratorio, el control del actuador vertical (fuerza axial) se realizó por desplazamiento y no por fuerza, debido a un posible evento de falla del prototipo. Este registro de fuerza axial fue adquirido por el canal CH0 y en la Figura N° 4.13 se muestra su variación respecto a su deformación.

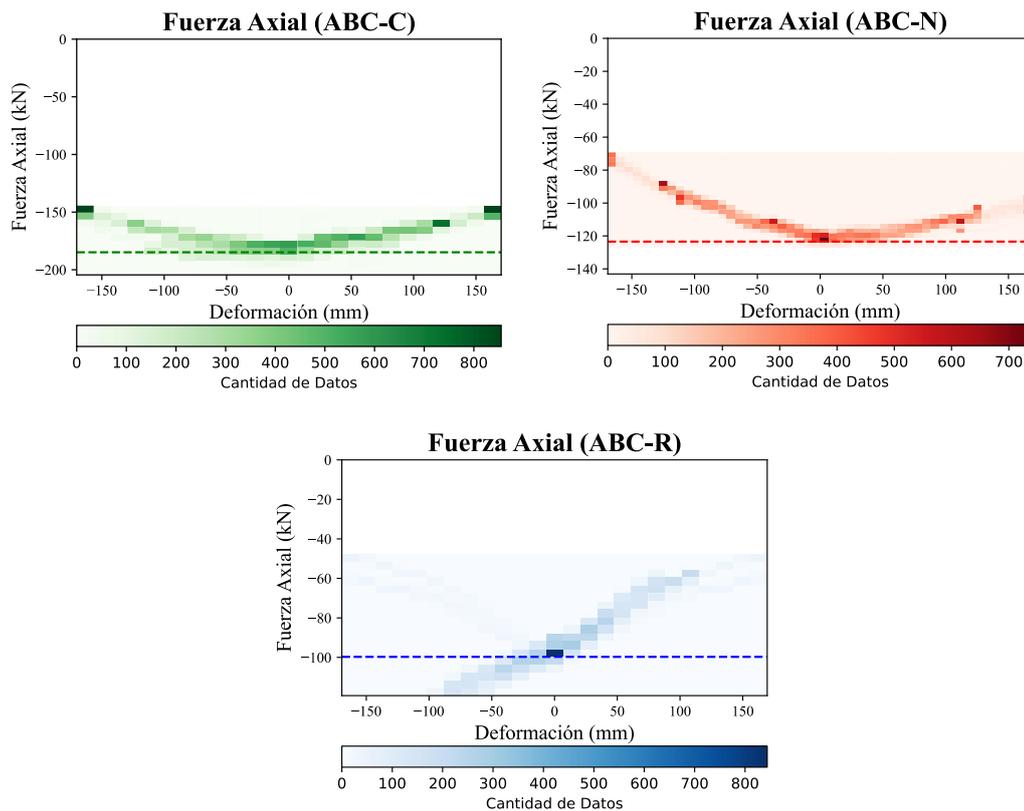


Figura N° 4.13 Registro de fuerza axial en prototipos ABC  
 (Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.4.2.2 Rigidez Vertical de Aisladores

Para el cálculo de rigidez vertical, se analizó los canales CH-00 y CH-04, correspondientes a la fuerza axial y al desplazamiento vertical del aislador. Los ensayos cíclicos de los prototipos iniciaron con el aumento de la carga axial y posteriormente realizar los procesos de carga, descarga y recarga. La Figura N° 4.14 muestra el cociente del registro de fuerza del canal CH-00 y el desplazamiento del CH-04, correspondiente a los pasos de la etapa inicial del ensayo. En este registro se calculó el promedio de las ordenadas correspondientes a cada paso, obteniendo así una rigidez vertical de 590.6 kN/mm para el prototipo ABC-C, 114.2 kN/mm para el prototipo ABC-N y 221.3 kN/mm para el prototipo ABC-R.

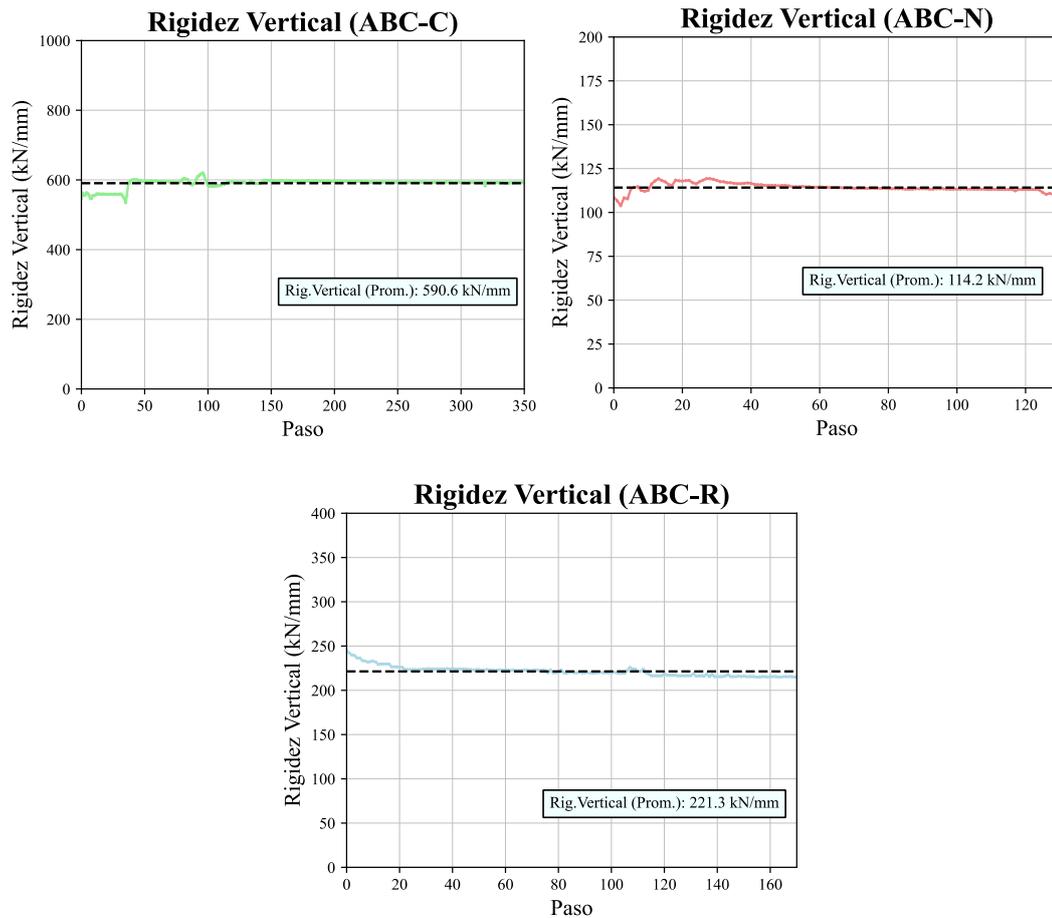


Figura N° 4.14 Registro de rigidez vertical de los prototipos ABC  
(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.4.2.3 Curvas de Histéresis

En la Figura N° 4.15 se muestran las curvas de histéresis de los especímenes, en el cual se muestra en el eje X, la deformación del espécimen correspondiente al canal del controlador, y en el eje Y, la carga lateral del ensayo. Estas curvas se procesaron eliminando las pausas del ensayo, y a través de una media móvil, se mejoró los efectos del ruido y la sensibilidad de los dispositivos de medición.

Los efectos de fricción del sistema de rodajes (Sección 4.4.1), se procesó mediante una diferencia directa entre la fuerza lateral (CH-01) y el producto del coeficiente de fricción dinámico y la fuerza axial registrada (CH-00).

$$F = F_{lateral} - \mu d(F_{axial}) \quad (4.1)$$

Las curvas tienden a elevarse en los últimos picos, lo cual es una característica habitual de los materiales elastómeros. Además, se muestran en las gráficas los límites superior e inferior de las fuerzas y desplazamientos del ensayo.

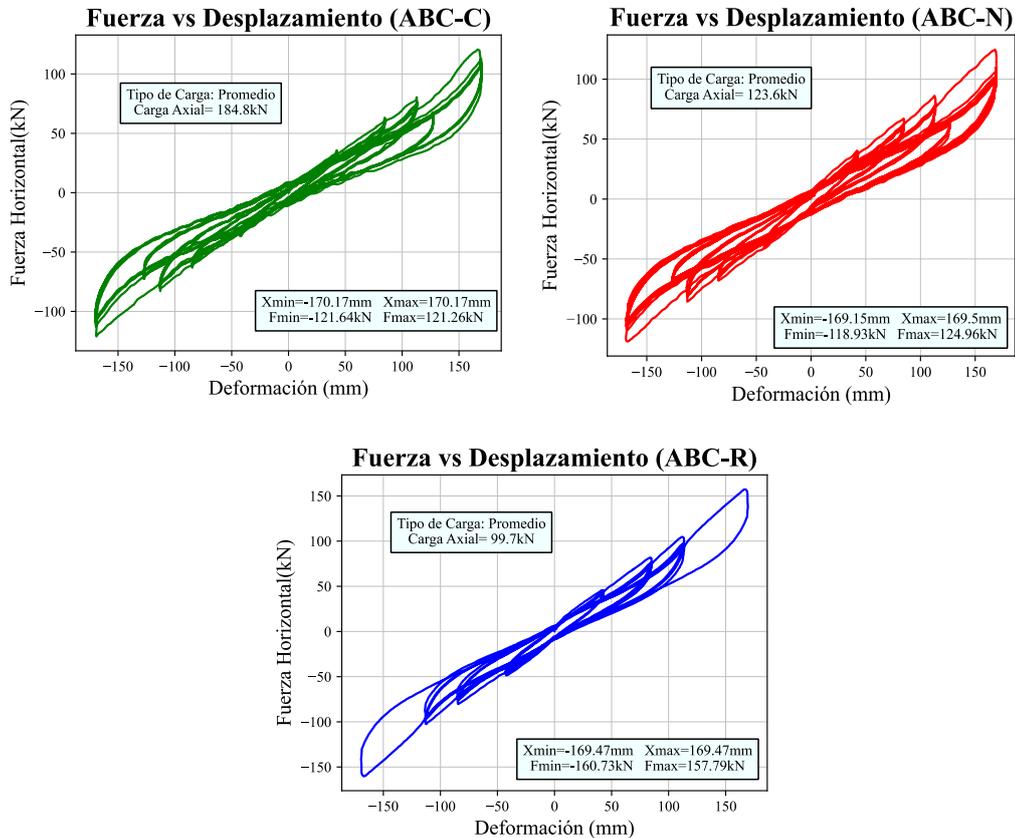


Figura N° 4.15 Curvas de histéresis de los prototipos ABC  
 (Fuente: Elaboración Propia)

De los resultados obtenidos, se puede mostrar una mayor rigidez del prototipo ABC-R respecto a los otros, y una cercanía entre las curvas de los prototipos ABC-N y ABC-C. Estos resultados contradicen a los ensayos previos de módulo de cortes realizados y mostrados en la Figura N° 3.8, por tanto, se puede concluir que el material de caucho reciclado tiene propiedades muy variables, debido a los componentes que se usan para su producción.

La cantidad de prototipos usados no es suficiente para generalizar la anomalía del comportamiento en el ABC-R, sin embargo, se cree que el caucho usado de materia prima en su fabricación del ABC-R, contenía aditivos reforzantes a diferencia de los especímenes de módulo de corte, que produjo el aumento de la capacidad del prototipo diseñado.

#### 4.5 CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO BILINEAL A LAS CURVAS EXPERIMENTALES

De los resultados de los capítulos anteriores se realizó el cálculo de áreas de los lazos histeréticos, que representa la energía disipada de los prototipos ABC, para tener un valor de ajuste entre el modelo histerético y los lazos experimentales de 42mm, 84mm, 112.6mm y 168mm (Ver Tabla N° 4.5). Debido a la degradación entre curvas de un mismo desplazamiento objetivo, se decidió usar las propiedades del tercer lazo. Sin embargo, para el prototipo de aislamiento ABC-R que no culminó la serie de ensayo del ultimo pico, se consideró un área para el segundo y tercer lazo de 75% y 70% de la energía disipada del primer lazo respectivamente, ya que son porcentajes aproximados de disminución de los otros prototipos.

Tabla N° 4.5 Energía Disipada de los prototipos de aislamiento sísmico (ABC)

Lazo	N°	ABC - C	ABC - N	ABC - R
		W(kN.mm)	W(kN.mm)	W(kN.mm)
42mm	1	814.52	1095.5808	1160.3268
	2	702.40	829.1412	938.4246
	3	7178.0	778.0311	901.1466
84mm	1	2271.60	2535.1002	3000.3885
	2	2124.36	2232.6579	2648.3076
	3	2108.76	2113.6626	2406.0987
112.6mm	1	3923.80	4248.2205	4541.9319
	2	3650.50	3746.0466	3914.6805
	3	3516.30	3475.2906	4355.7381
168mm	1	11421.78	9896.328	W1=8858.23
	2	8287.19	7706.4417	75%W1=6643.67(*)
	3	7448.93	7331.013	70%W1=6200.76(*)

(\*) Consideraciones para lazos no culminados.

(Fuente: Elaboración Propia)

Para calibrar los parámetros del modelo Bilineal a las experimentales se usó rutinas que iteraban en un dominio [a ; b], los valores de la rigidez de pre-fluencia y en un dominio [c ; d], la rigidez de post-fluencia. Adicionalmente, se calculaba el error relativo  $E_R$  de las áreas calculadas en la Tabla N° 4.5 y el área de los lazos histeréticos del modelo bilineal, con la finalidad de encontrar los parámetros más precisos para un error relativo bajo. El algoritmo realizado se resume en la Figura N° 4.16.

$$E_R \% = \frac{|W_{Ensayo} - W_{Modelo}|}{W_{Ensayo}} * 100\% \quad (4.2)$$

El desplazamiento de fluencia  $D_y$ , se calculó en un inicio como el 10% de la altura total del caucho  $H_r$ , sin embargo, en el ensayo experimental se observó un mayor rango de desplazamiento en la etapa inicial y se consideró como el 10% de la altura total del aislador  $H_t$ . Las gráficas de los modelos calibrados se superpusieron a las curvas del ensayo y se muestra en Figura N° 4.17.

```
import numpy as np
# x , y (coordenadas del modelo para un lazo específico)
Lazo_mm =[42,84,112.6,168]
Errores =[ ]
for K1 in range(a, b, ΔK1 ):
    for K2 in range(c, d, ΔK2 ):
        SE_R =0
        for i in Lazo_mm:
            x , y = Modelo_Bilineal(i, K1, K2, Dy=16.8)
            W_Modelo = 0.5 * np. abs(np. dot(x, np. roll(y, 1)) - np. dot(y, np. roll(x, 1)))
            E_R = (abs(W_Ensayo - W_Modelo) / W_Ensayo) * 100%
            SE_R = E_R + SE_R
        Errores.append(SE_R)
print(min(SE_R))
#Sabiedo el mínimo error relativo, puedo conocer el K1 y K2 más óptimos.
```

Figura N° 4.16 Algoritmo simplificado de segundo orden en Python

(Fuente: Elaboración Propia)

Al resolver el algoritmo de segundo orden elaborado se tienen distintos parámetros, y para el trabajo realizado se escogió adicionalmente del error relativo, una apariencia parecida. Los parámetros usados y sus errores relativos se muestran en la Tabla N° 4.6.

Tabla N° 4.6 Parámetros Calibrados de Modelo Bilineal y sus errores relativos

Especimen	Parámetros Calibrados		$E_R \%$ (modelo)
	$\{D_y(mm), K_1(\frac{kN}{mm}), K_2(\frac{kN}{mm})\}$		
ABC - C	{16.8, 1.04, 0.49}		<b>17.9%</b>
ABC - N	{16.8, 1.06, 0.50}		<b>15.7%</b>
ABC - R	{16.8, 1.37, 0.74}		<b>10.6%</b>

(Fuente: Elaboración Propia)

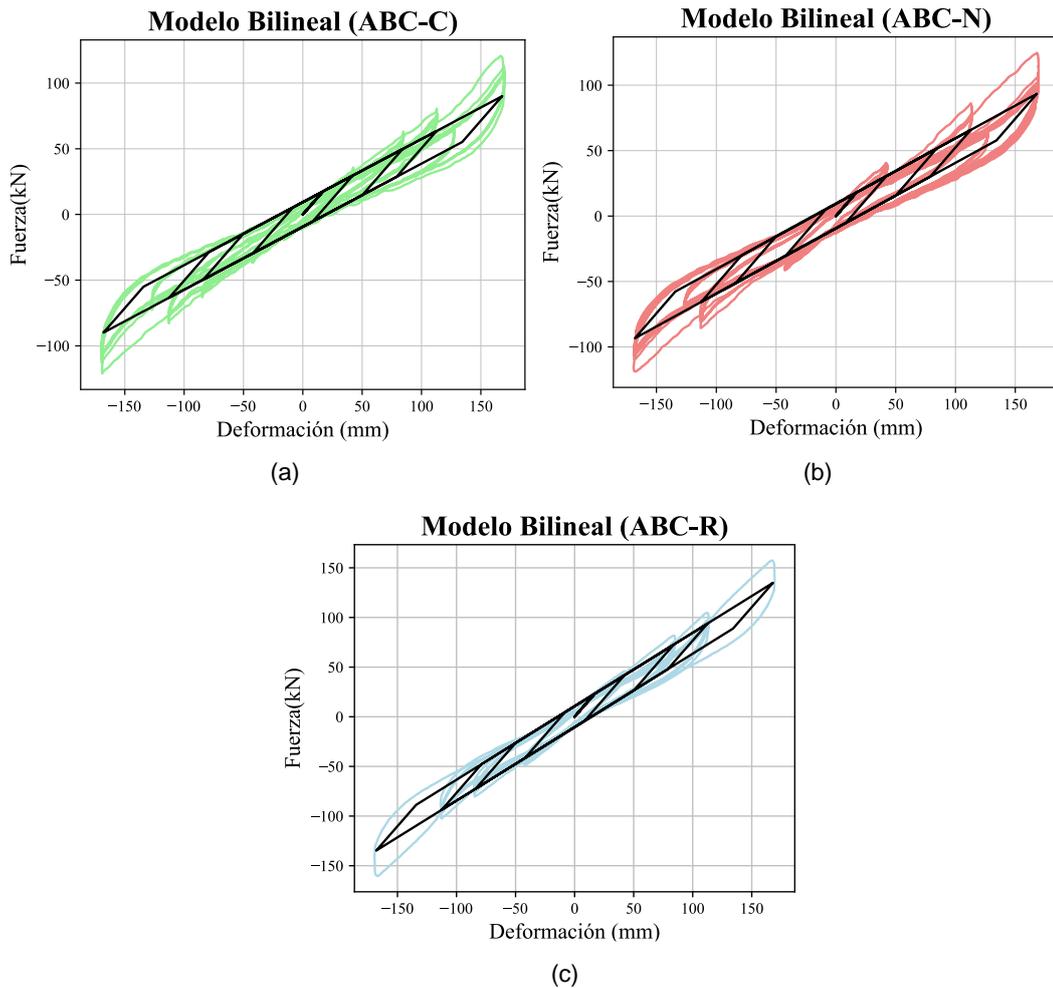


Figura N° 4.17 Modelo Bilineal Calibrado (a) ABC-C, (b) ABC-N y (c) ABC-R  
(Fuente: Elaboración Propia)

Con los parámetros del modelo bilineal ya calculados, se puede calcular la rigidez y el amortiguamiento efectivo, mediante las fórmulas (2.20) y (2.21)

Tabla N° 4.7 Rigidez y Amortiguamiento efectivos de prototipos ABC

Especímenes	Rigidez Efectiva $K_{ef}$	Amortiguamiento Efectivo $\beta_{ef}$
ABC-C	0.545	5.64%
ABC-N	0.556	5.63%
ABC-R	0.803	4.38%

(Fuente: Elaboración Propia)

## CAPÍTULO V: ANÁLISIS NUMÉRICO TIEMPO-HISTORIA

### 5.1 ESCALAMIENTO DE REGISTROS

Se realizó un escalamiento mediante el software “SeismoMatch” el cual utiliza el algoritmo de wavelets para el escalamiento espectral. Se usó 5 registros sísmicos (Ver Tabla N° 5.1) de los sismos de Lima 1966, Huaraz 1970, Lima 1974, Pisco 2007 y Tacna 2010 obtenidos en la estaciones acelerográficas ubicadas en las zonas del Parque de la Reserva, Universidad Nacional de Ingeniería y la Universidad Jorge Basadre Grohmann, en un suelo S1 (roca o suelo muy rígido) según la caracterización de la N.T.P. E.030. Para el escalamiento de los registros se usó como espectro objetivo al espectro elástico de pseudo-aceleraciones de la N.T.P. E.031 “Aislamiento Sísmico” para la Vivienda Representativa de albañilería confinada usada con los prototipos de aislamiento ABC y al espectro elástico de pseudo-aceleraciones de la N.T.P. E.030 “Diseño Sismorresistente” para la vivienda con base fija.

Tabla N° 5.1 Datos de registros sísmicos usados para escalamiento

Código Sísmico	Estación	Código Estación	Latitud	Longitud	PGA - EW (cm/s <sup>2</sup> )	PGA - NS (cm/s <sup>2</sup> )
LIM1966	Parque de la Reserva	PRQ	-12.07°	-77.04°	180.56	268.24
HAZ1970	Parque de la Reserva	PRQ	-12.07°	-77.04°	105.05	97.81
LIM1974	Parque de la Reserva	PRQ	-12.07°	-77.04°	194.21	180.09
PIS2007	Jorge Alva Hurtado	LIM001	-12.01°	-77.05°	73.89	46.89
TAC2010	Universidad Jorge Basadre Grohmann	TAC001	-18.02°	-70.25°	154.00	190.00

(Fuente: Elaboración Propia)

El modelamiento numérico de la vivienda con base fija y con base aislada se calculó mediante el programa Stera 3D 11.2, conociendo de esta manera sus periodos fundamentales respectivos, resultando 0.15s para la vivienda con base fija y 0.85s para la vivienda con base aislada, como muestra la Figura N° 5.1 y Figura N° 5.2.

Para un análisis tiempo-historia, la N.T.P E.030 “Diseño Sismorresistente” y la N.T.P E.031 “Aislamiento Sísmico” menciona un rango de escalamiento entre 0.2 y 1.5 veces el periodo máximo de la vivienda con base fija y aislada respectivamente. Estos valores se muestran en la Tabla N° 5.2.

Tabla N° 5.2 Rango de periodos para escalamiento

Periodo	0.25 T	1.5 T
Base Fija	0.04	0.23
Base Aislada	0.17	1.28

(Fuente: Elaboración Propia)

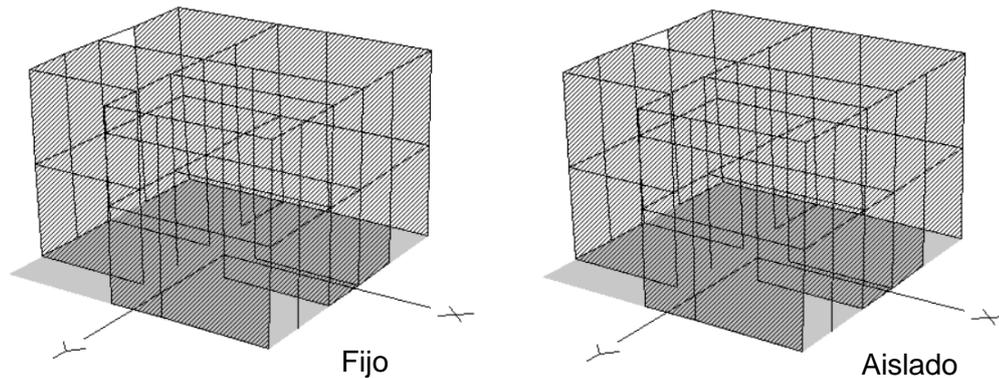


Figura N° 5.1 Modelo Numérico de Viviendo con Base Fija (T=0.15s)

(Fuente: Saito, 2022)

Figura N° 5.2 Modelo Numérico de Viviendo con Base Aislada (T=0.85s)

(Fuente: Saito, 2022)

El espectro elástico de tiempo de retorno de 2500 años y los espectros compatibles de la vivienda con base fija son mostrados en la Figura N° 5.3 y Figura N° 5.4. De la misma manera, se muestra los espectros compatibles de la vivienda con base aislada en la Figura N° 5.5 y Figura N° 5.6. El escalamiento se realizó en la dirección EW(Este-Oeste) y NS(Norte-Sur) y sus componentes de aceleración se muestran en la Figura N° 5.7 para los registros de LIM1966, HAZ1970, LIM1974, PIS2007 y TAC2010.

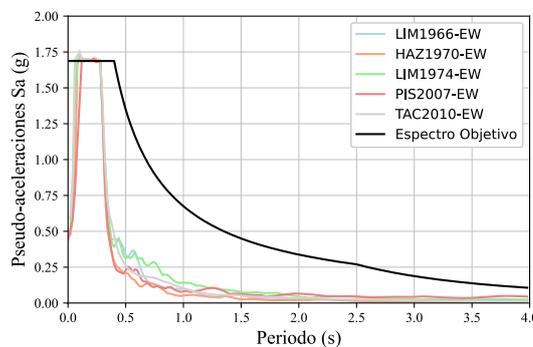


Figura N° 5.3 Espectros Compatibles de vivienda con base fija en dirección EW  
(Fuente: Elaboración Propia)

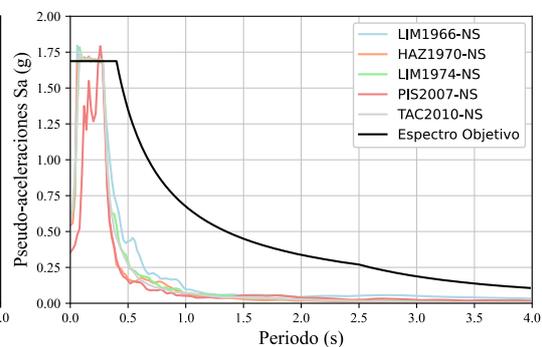


Figura N° 5.4 Espectros Compatibles de vivienda con base fija en dirección NS  
(Fuente: Elaboración Propia)

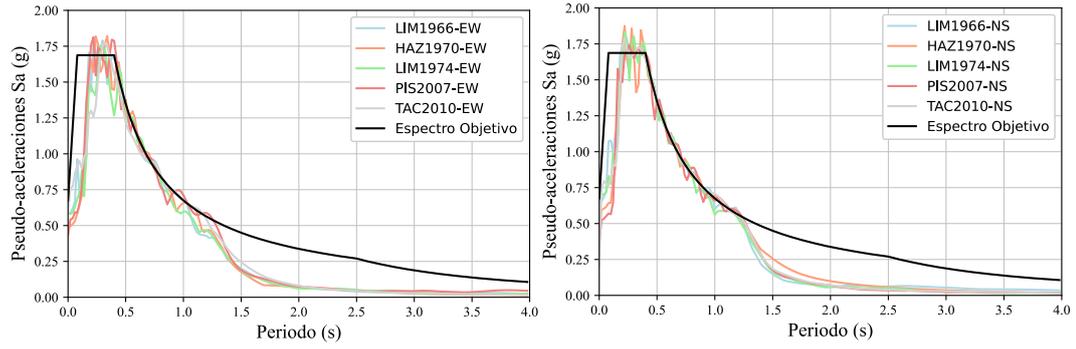
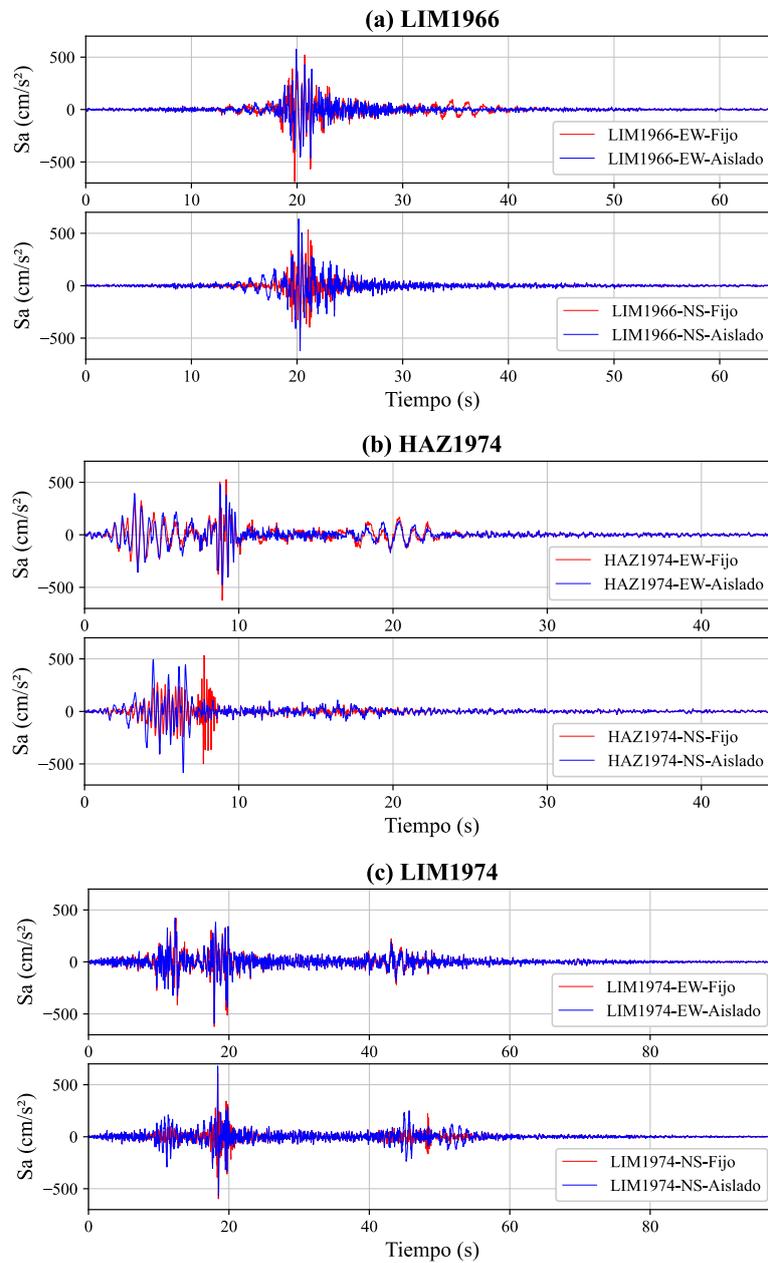


Figura N° 5.5 Espectros Compatibles de vivienda con base aislada en dirección EW  
 Figura N° 5.6 Espectros Compatibles de vivienda con base aislada en dirección NS  
 (Fuente: Elaboración Propia)



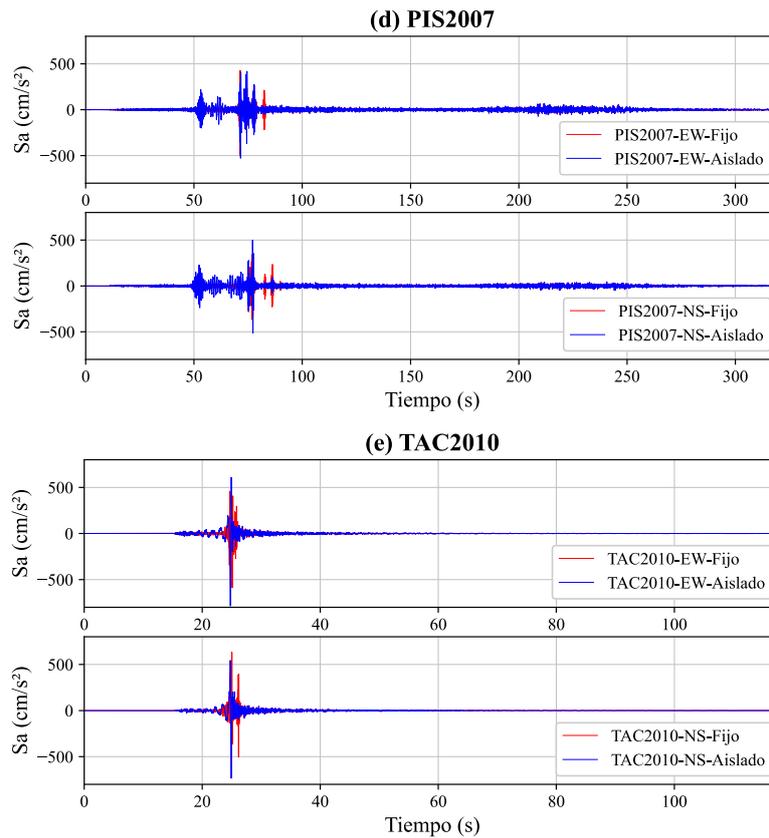


Figura N° 5.7 Registros sísmicos escalados para la estructura en base fija y aislada  
(a) LIM1966 (b) HAZ1974 (c) LIM1974 (d) PIS2007 (e) TAC2010  
(Fuente: Elaboración Propia)

## 5.2 CAPACIDAD DE MUROS DE ALBAÑILERÍA

Diaz M. y otros (2017) realizaron un estudio experimental de la capacidad que tienen los muros de albañilería confinada bajo un ensayo cíclico de carga lateral y con una propuesta de reforzamiento usando una malla de alambre unida al muro con mortero. Se llevaron a cabo 4 ensayos de dos muros de albañilería confinada con ladrillo artesanal sólido y con ladrillo industrial tubular, y dos ensayos de los mismos materiales, pero con el sistema de reforzamiento propuesto. Estos especímenes fueron cargados axialmente con cargas de 200 kN, para los especímenes de ladrillo sólido; y de 100 kN, para los especímenes de ladrillo tubular. El sistema de carga del ensayo cíclico se muestra en la Figura N° 5.8. La altura estándar de los especímenes fue de 2.40 m y con un ancho estándar de 2.50 m. Los elementos de confinamiento tienen un esfuerzo de compresión de 17 MPa con aceros de refuerzo de 4 barras #3 con estribos con la siguiente distribución: 1@50mm, 4@100mm y el resto @250 mm, tanto para la viga como para las columnetas.

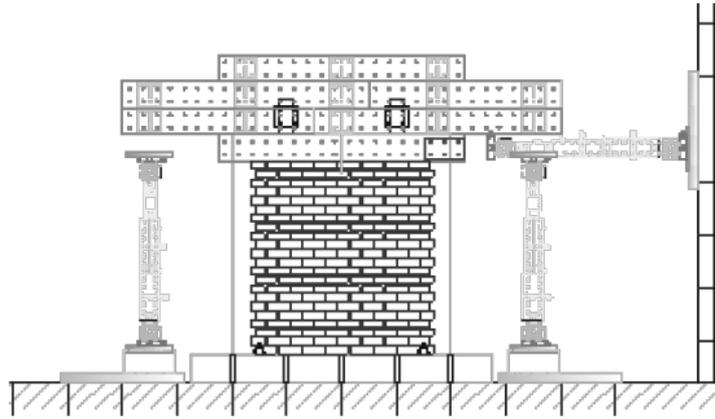


Figura N° 5.8 Sistema de Carga para Ensayo Cíclico de Muros de Albañilería  
(Fuente: Díaz et al., 2017)

En esta investigación se demostró una vez más, mediante un análisis dinámico numérico-experimental, la baja capacidad sísmica que tienen las viviendas construidas informalmente con estos tipos de unidades de albañilería, no cumpliendo los requerimientos de distorsión máxima la Norma E030 de Diseño Sismorresistente. Además, se mostró que el reforzamiento con malla de alambrado con mortero es una técnica fácil de implementar y de bajo costo, que mejora la capacidad sísmica de los muros de albañilería.

Díaz y otros (2019) presentaron un modelo analítico de curva de capacidad con diferentes tipos de unidades de mampostería, tales como ladrillo hueco industrial, ladrillo macizo artesanal y ladrillo tubular, que son las unidades con las que más se construyen en las ciudades de Lima Metropolitana y Callao. Este modelo tetra-lineal fue calibrado con datos experimentales de ensayos de muros de albañilería confinada realizados por el CISMID desde hace 30 años, concluyendo así con una ecuación general que relaciona el esfuerzo cortante en el agrietamiento, fluencia, punto máximo y punto último.

En la presente tesis se realizó los modelos tetra-lineales de 5 muros característicos de la vivienda representativa en el primer piso y 5 modelos en segundo piso, cuyas unidades de albañilería son ladrillos sólidos artesanales de arcilla cocida (albañilería informal), y así poder caracterizar su comportamiento para realizar simulaciones numéricas tiempo – historia. La distribución de los muros se muestra en la Figura N° 5.9 y las curvas en la Figura N° 5.10.

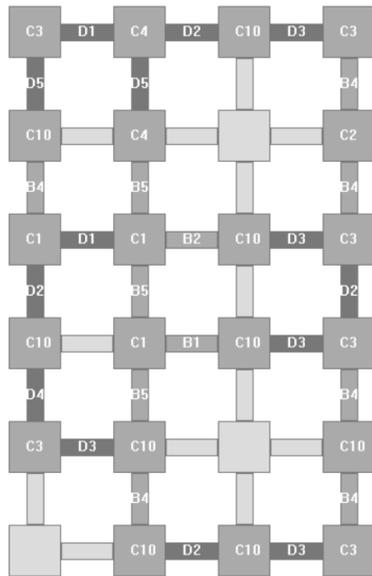


Figura N° 5.9 Vista de primera planta - Modelo Matemático  
 (Fuente: Saito, 2022)

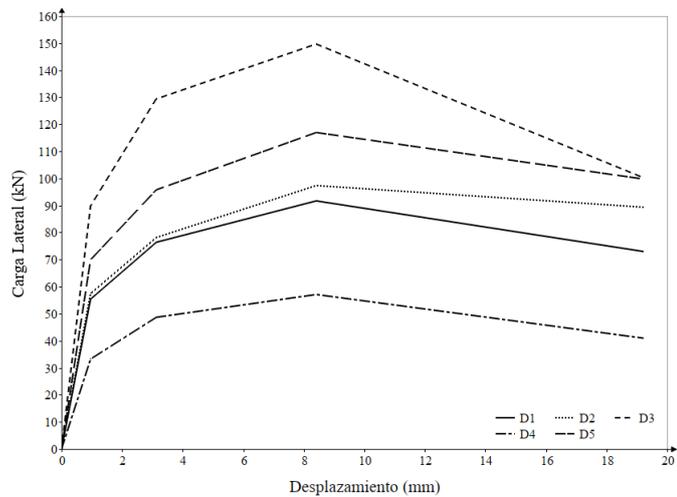


Figura N° 5.10 Curvas tetra-lineal de muros - 1er piso  
 (Fuente: Elaboración Propia)

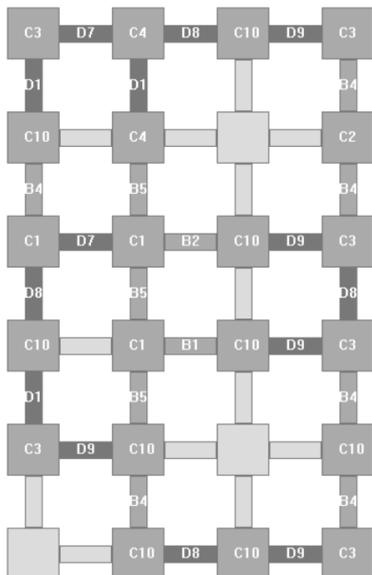


Figura N° 5.11 Vista de segunda planta - Modelo Matemático  
 (Fuente: Saito, 2022)

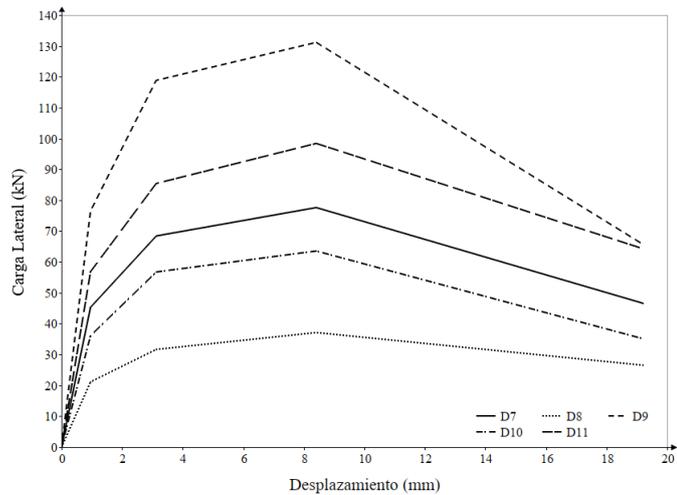


Figura N° 5.12 Curvas tetra-lineal de muros - 2do piso  
 (Fuente: Elaboración Propia)

### 5.3 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se realizaron simulaciones tiempo-historia correspondientes a los 5 registros sísmicos escalados para la vivienda representativa con el sistema de aislamiento del prototipo ABC (azul) y con base fija (rojo). Como fue mostrado en los resultados experimentales, las propiedades no lineales del comportamiento del

aislador ABC son consideradas bajo un modelo histerético bilineal. Los puntos críticos de este modelo para los casos de ABC-C, ABC-N y ABC-R son resumidos en la Tabla N° 5.3.

Tabla N° 5.3 Resumen de puntos críticos del comportamiento de prototipos ABC

Espécimen	$K_1$ (KN/mm)	$K_2$ (KN/mm)	$D_y$ (mm)	$F_y$ (KN)	$K_v$ (KN/mm)	$K_v/K_1$	$K_2/K_1$
ABC-C	1.04	0.49	16.8	11.86	590.6	567.9	0.471
ABC-N	1.06	0.5	16.8	12.08	114.2	107.7	0.472
ABC-R	1.37	0.74	16.8	15.62	221.3	161.5	0.540

(Fuente: Elaboración Propia)

Por practicidad, los resultados de los 5 análisis tiempo-historia se mostrarán en gráficos comparativo. De esta forma, se muestra una comparación de la respuesta sísmica respecto a sus desplazamientos relativos y aceleraciones en el último nivel (2X para la dirección EW y 2Y para la dirección NS) de los modelos antes mencionados. Así también, la relación histerética entre la fuerza lateral del último nivel, son mostrados a continuación.

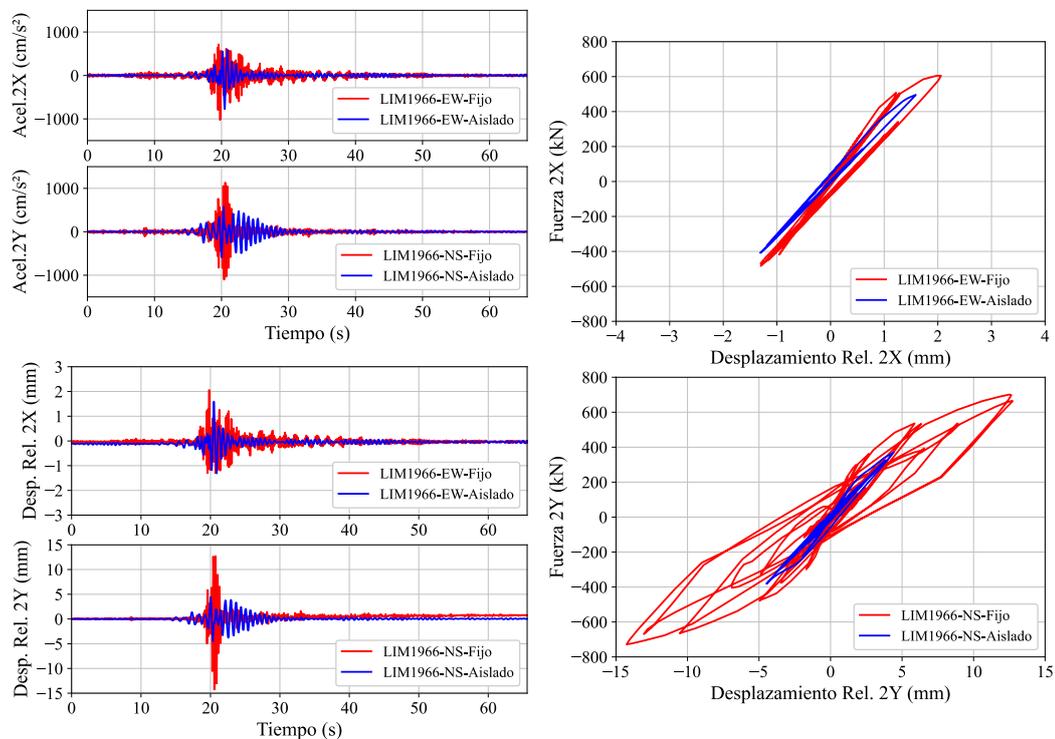


Figura N° 5.13 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - LIM1966

(Fuente: Elaboración Propia)

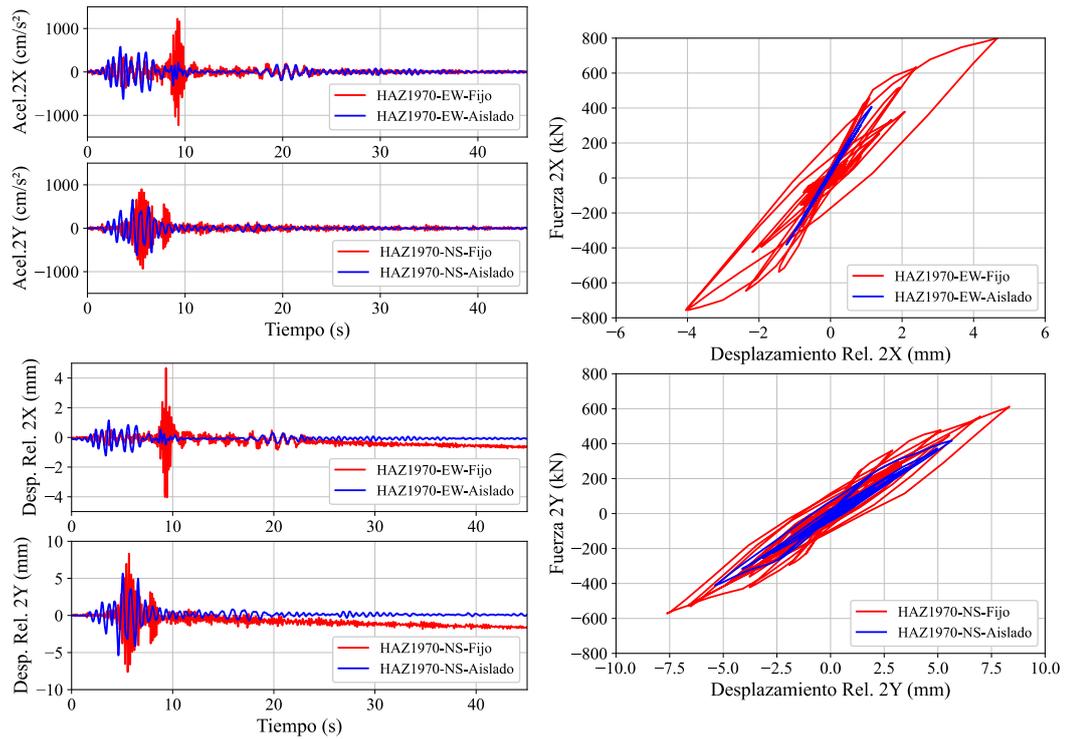


Figura N° 5.14 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - HAZ1970  
 (Fuente: Elaboración Propia)

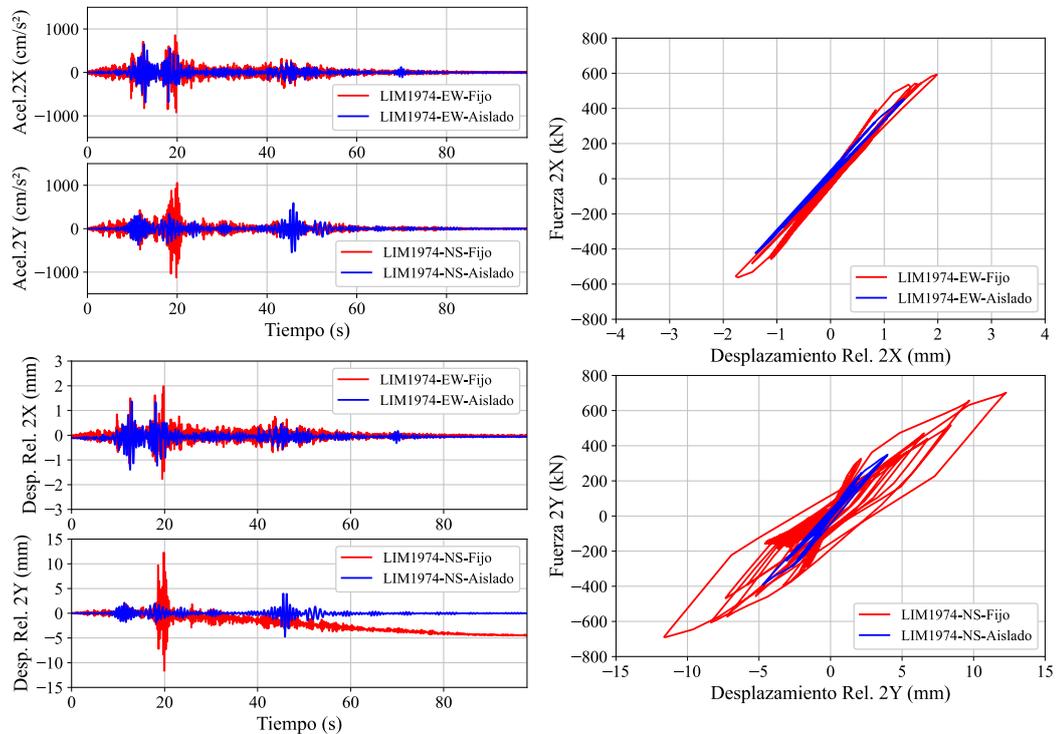


Figura N° 5.15 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - LIM1974  
 (Fuente: Elaboración Propia)

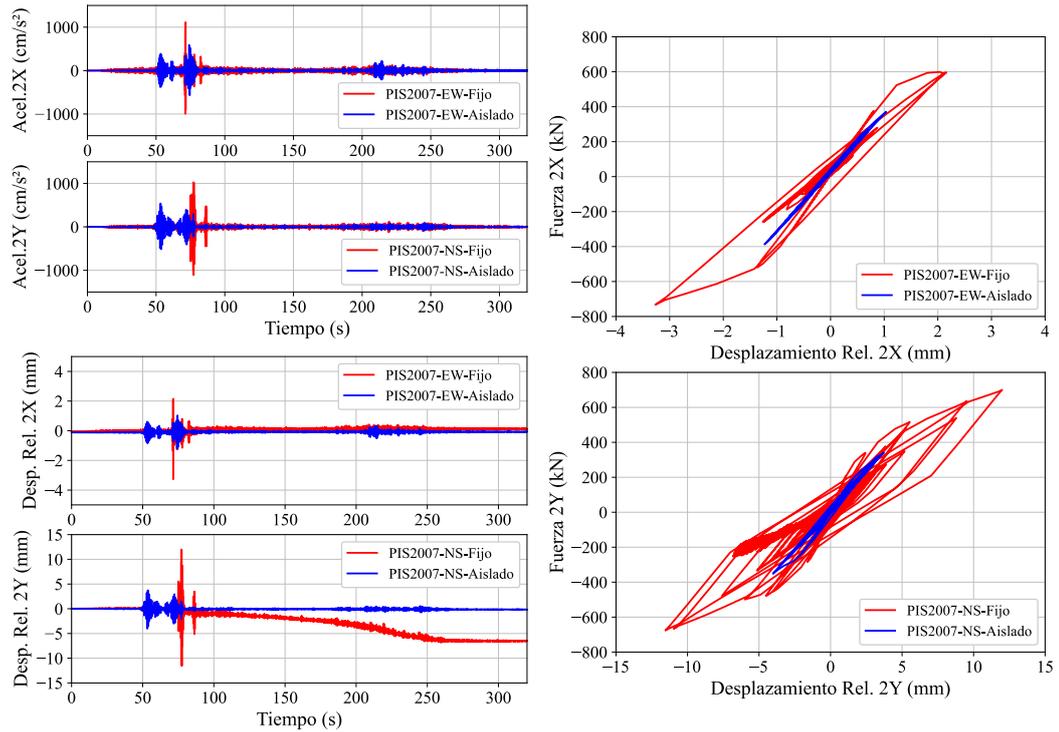


Figura N° 5.16 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - PIS2007

(Fuente: Elaboración Propia)

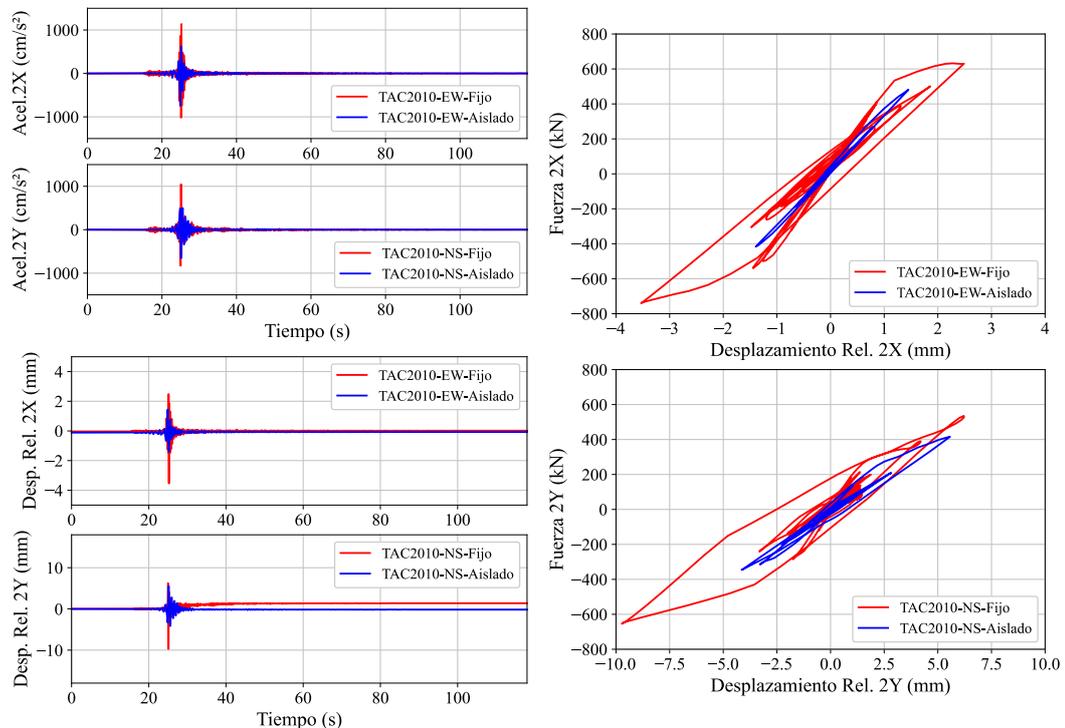


Figura N° 5.17 Comparación de Aceleraciones, Desplazamiento Relativo y Fuerza Lateral en el último nivel - TAC2010

(Fuente: Elaboración Propia)

En las gráficas mostradas anteriormente, se muestra una disminución en la aceleración y desplazamiento relativo. Además, en las gráficas histeréticas se muestra una disminución de demanda de carga en los muros, lo que significa que los muros de la vivienda aislada obtendrán grietas muy pequeñas o inexistentes con respecto a la vivienda de base fija, que se encontrarán en un rango de pre-colapso o colapso.

La Tabla N° 5.4, Tabla N° 5.5 y la Tabla N° 5.6 resume las máximas respuestas de la vivienda con base fija y con base aislada para cada dirección, mostrando de esta manera la efectividad y el porcentaje de mejora del sistema de base aislada.

Tabla N° 5.4 Comparación de aceleraciones máximas en el último piso

Registro	Aceleraciones máximas en 2do piso (cm/s <sup>2</sup> )					
	Dirección - EW			Dirección - NS		
	Base Fija	Base Aislada	Variación (%)	Base Fija	Base Aislada	Variación (%)
LIM1966	1025.0	773.3	-24.56%	1132.0	587.3	-48.12%
HAZ1970	1229.0	623.8	-49.24%	934.9	658.1	-29.61%
LIM1974	923.7	691.8	-25.11%	1125.0	591.4	-47.43%
PIS2007	1113.0	586.5	-47.30%	1107.0	539.7	-51.25%
TAC2010	1138.0	744.9	-34.54%	1046.0	658.8	-37.01%
Promedio			<b>-36.2%</b>			<b>-42.7%</b>

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla N° 5.5 Comparación de desplazamientos relativos máximos en el último piso

Registro	Desplazamientos relativos máximos en 2do piso (cm/s <sup>2</sup> )					
	Dirección - EW			Dirección - NS		
	Base Fija	Base Aislada	Variación (%)	Base Fija	Base Aislada	Variación (%)
LIM1966	2.06	1.59	-22.95%	14.26	4.48	-68.59%
HAZ1970	4.68	1.23	-73.58%	8.34	5.66	-32.19%
LIM1974	1.97	1.40	-29.61%	12.28	4.75	-61.34%
PIS2007	3.27	1.23	-62.33%	12.01	4.03	-66.41%
TAC2010	3.53	1.45	-58.88%	9.73	5.57	-42.73%
Promedio			<b>-49.5%</b>			<b>-54.3%</b>

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla N° 5.6 Comparación de fuerzas laterales máximas en el último piso

Registro	Fuerzas laterales máximas en 2do piso (cm/s <sup>2</sup> )					
	Dirección - EW			Dirección - NS		
	Base Fija	Base Aislada	Variación (%)	Base Fija	Base Aislada	Variación (%)
LIM1966	6056	4955	-18.18%	7279	3812	-47.63%
HAZ1970	8007	4078	-49.07%	6122	4174	-31.82%
LIM1974	5928	4534	-23.52%	7021	3915	-44.24%
PIS2007	7330	3877	-47.11%	7004	3515	-49.81%
TAC2010	7395	4814	-34.90%	6547	4161	-36.44%
Promedio			<b>-34.6%</b>			<b>-42.0%</b>

(Fuente: Elaboración Propia)

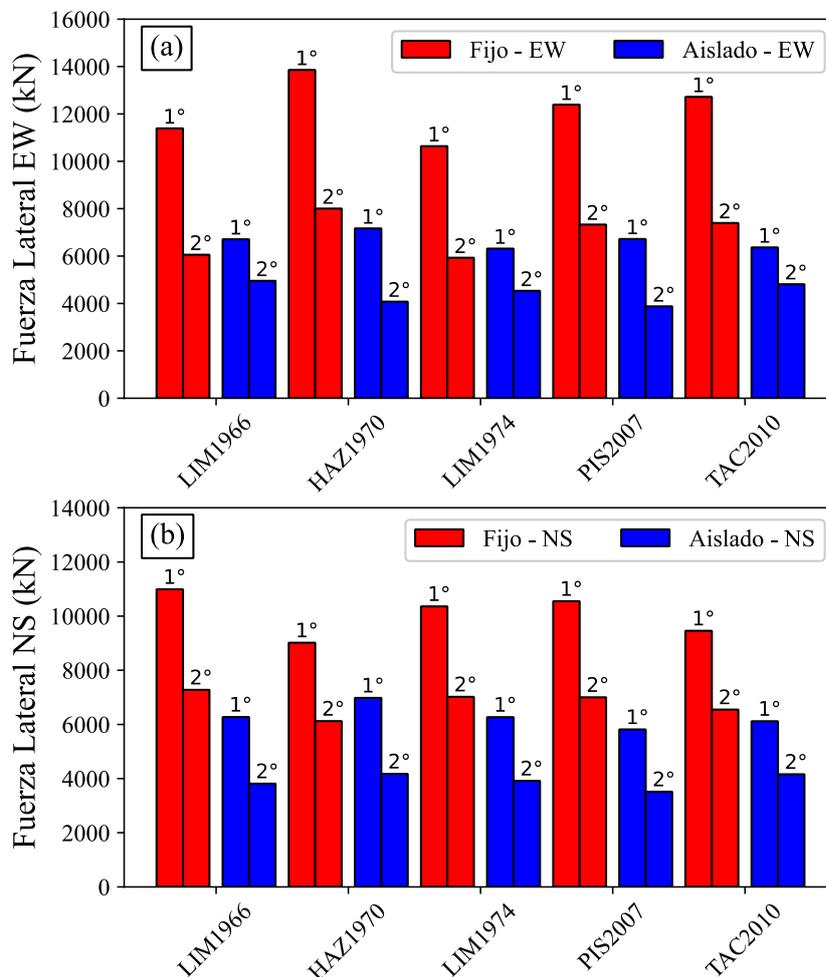


Figura N° 5.18 Reducción de fuerzas laterales en ambos pisos (a) EW (b) NS

(Fuente: Elaboración Propia)

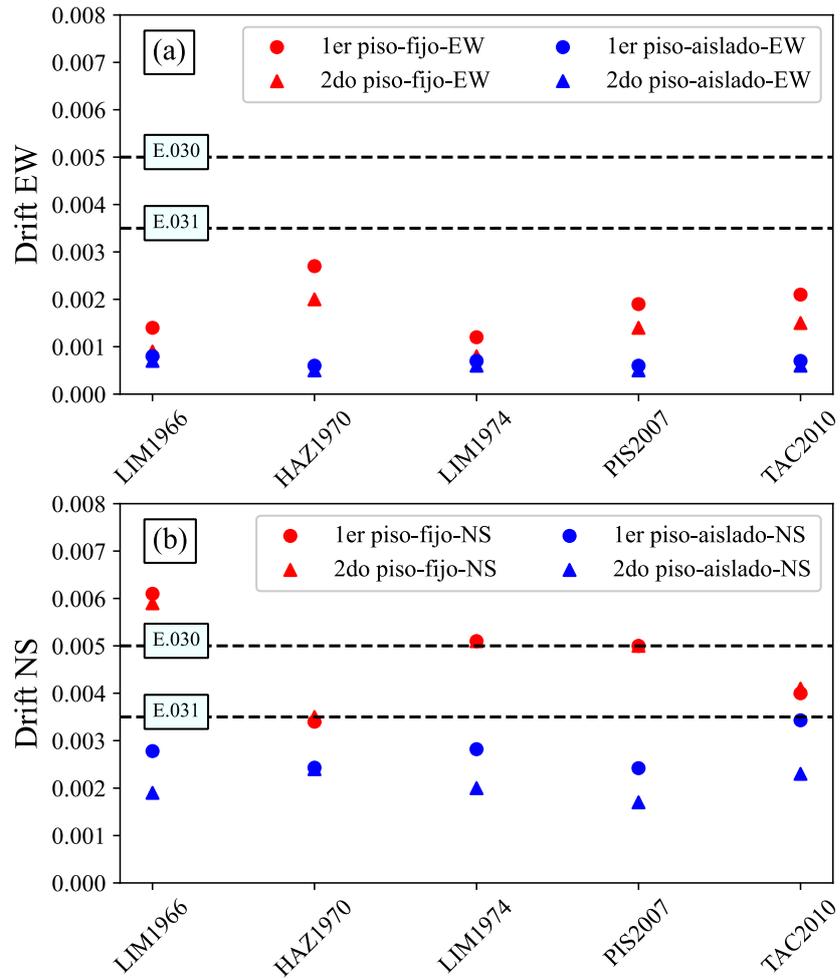


Figura N° 5.19 Comparación de derivas máximas vs los índices de las normas peruanas E.030 y

E.031 (a) EW (b) NS

(Fuente: Elaboración Propia)

## CONCLUSIONES

Se propone el estudio experimental y aplicado de un sistema de aislamiento usando caucho y acero peruano. La vivienda objetivo para su diseño es propuesta como una vivienda típica informal de albañilería de dos pisos.

Se diseñó un sistema de aislamiento de bajo costo usando tres tipos diferentes de material caucho (neopreno, natural, reciclado) bajo un enfoque teórico-experimental usando los resultados de una estimación experimental del módulo de corte de cada material, de acuerdo a una extensión de la norma ASTM-D4014. Los valores de módulo de corte para la distorsión de 100% son de 9.12 kgf/cm<sup>2</sup> para el material neopreno, 6.71 kgf/cm<sup>2</sup> para el caucho natural y 5.54 kgf/cm<sup>2</sup> para el caucho reciclado. Así mismo se determinó unas curvas experimentales de comportamiento mecánico de los distintos tipos de caucho donde se relaciona el módulo de corte y su respectiva deformación unitaria, ajustando una curva polinómica de segundo grado con un coeficiente de determinación mayor a 0.95 en las 3 ecuaciones.

Se propuso el uso mixto de 14 aisladores distribuidos en la vivienda típica de albañilería, en donde 3 son realizados con material neopreno, 3 con material de caucho natural y 8 son realizados con caucho reciclado. Un ajuste del diámetro de 300mm y en el desplazamiento máximo de 168mm del prototipo en el diseño del aislador fue realizado con el fin de ser ensayado en el Laboratorio de Estructuras del CISMID.

La configuración del mecanismo de carga en esta nueva versión fue muy óptima, reduciendo así los efectos de disipación de energía por rozamiento gracias al nuevo sistema de rodillos con rodaje utilizados. Además, al desacoplar el movimiento horizontal y vertical, se produjo un movimiento ínfimo respecto a la dirección horizontal del actuador de carga axial.

Las curvas experimentales se ajustaron a un modelo bilineal mediante un código de segundo orden, a fin de conocer los parámetros del modelo. Los

errores relativos del ajuste de los prototipos de aisladores ABC-C, ABC-N y ABC-R fueron de 17.9% 15.7% y 10.6% respectivamente.

Se realizó un análisis numérico tiempo-historia con cinco registros sísmicos escalados al espectro de la norma peruana E.031 "Aislamiento Sísmico" para la vivienda aislada y al espectro de diseño de la norma peruana E.030 "Diseño Sismorresistente" para la vivienda fija, usando el software STERA3D 11.2. El PGA (Peak Ground Acceleration) promedio de los 5 registros escalados fue de 604 cm/s<sup>2</sup> y de 541 cm/s<sup>2</sup> para la dirección EW y NS respectivamente, en la vivienda fija; y de 583.8 cm/s<sup>2</sup> y de 627 cm/s<sup>2</sup> para la dirección EW y NS respectivamente, en la vivienda aislada.

En esta investigación, una vivienda objetivo de dos pisos es propuesta como una vivienda que representaría a las edificaciones informales que se construyen en el país. Para este fin, se consideró a la vivienda representativa como un sistema de muros albañilería confinada en donde el primer piso y segundo piso está construido con ladrillo sólido artesanal. Las propiedades de su comportamiento no lineal fueron estimadas de acuerdo a estudios experimentales realizados por el CISMID y un comportamiento con ajuste tetra-lineal.

De acuerdo a los análisis numéricos, se observa una reducción de la respuesta en aceleración promedio máximo en el segundo piso del sistema de aislamiento de bajo costo con respecto al modelo con base fija. Se llegó a una reducción de las aceleraciones promedios son de 36.2% en la dirección EW y de 42.7% en la dirección NS.

Con respecto a los desplazamientos relativos máximos en el segundo piso, hubo una reducción de 49.5% en la dirección EW y de 54.3 % en la dirección NS. Con respecto a la fuerza lateral del último piso se observa una reducción de esta respuesta en un 34.6% para la dirección EW; y una reducción de 42% en la dirección NS. Debido a que la rigidez de la estructura en el eje EW es de menor rigidez que en NS, se concluye que para sistemas más flexibles existe una mejor eficiencia del comportamiento del sistema de aislamiento de bajo costo para desplazamientos relativos.

Las distorsiones cumplen los requerimientos de distorsión propuestos por la norma E.031 "Aislamiento Sísmico" (0.35%) en ambas direcciones, lo que significaría una operatividad inmediata de la vivienda representativa bajo un sismo de 2500 años de tiempo de retorno. Además, para los registros de LIM1966, LIM1974 y PIS2007, resultaron distorsiones máximas en la vivienda con base fija en dirección NS, que no cumplieron la distorsión propuesta por la norma E.030 "Diseño Sismorresistente" en viviendas de albañilería (0.50%), lo que significaría un estado de la vivienda en el rango de pre-colapso o colapso.

## RECOMENDACIONES

En la presente investigación se usó tipos de caucho provenientes directamente de fábrica; sin embargo, hoy en día existen aditivos que pueden mejorar las propiedades físicas del material como los aditivos reforzantes, plastificantes y protectores, consiguiendo así mejorar el desempeño y la capacidad del aislador sísmico elastómero.

Para realizar el diseño del aislador sísmico elastómero, se recomienda estudiar experimentalmente las propiedades físicas como módulo de corte, módulo de compresibilidad, módulo elástico y deformación máxima del caucho utilizado. En la presente investigación se usó propiedades referenciadas a estudios de otros autores y valores conservadores.

En esta investigación en la etapa de vulcanizado, se colocó de forma consecutiva el acero interno y el caucho, para vulcanizar todo el espécimen en la matriz elaborada; sin embargo, al finalizar el ensayo se detectó espesores de caucho no constantes (6mm), sino con una desviación estándar de  $\pm 0.5\text{mm}$  (5.5mm a 6.5mm), proponiendo para un nuevo prototipo vulcanizar por etapas al espécimen.

El programa D'ABC al ser la primera versión, se recomienda ser revisado más a detalle con la finalidad de mejorarlo antes de utilizarlo como un software libre para los usuarios.

Se recomienda la verificación estructural de todos los elementos que conforman el mecano de carga, con el fin de asegurar la correcta fijación de los especímenes y el buen comportamiento del sistema de carga.

La actual N.T.P. E.031 "Aislamiento Sísmico" es una normativa relativamente nueva que debe implementar mayor detalle en parámetros que utiliza, y ampliar su panorama a otros tipos de sistemas de aislamiento sísmico y disipadores sísmicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adnan, A., Tiong, P., Sunaryati, J., Ghazali, M., & Malek, K. (2011). Seismic base isolation of steel frame structure by hollow rubber bearings. *Gazi University Journal of Science*, 24(4), 841–853.
- ASTM International. (2018). *ASTM D4014-03: Standard specification for plain and steel-laminated elastomeric bearings for bridges*.
- Chopra, A. (2014). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.
- Condor, E., & De la Cruz, M. (2020). *Algoritmos resueltos con Python* (Vol. 1). EIDEC.
- Díaz, M., Zavala, C., Flores, E., & Cárdenas, L. (2019). Development of analytical models for confined masonry walls based on experimental results in Lima City. *TECNIA*, 29(2), 23–29.  
<https://doi.org/10.21754/tecnica.v29i2.711>
- Díaz, M., Zavala, C., Gallardo, J., & Lavado, L. (2017). Experimental study of non-engineered confined masonry walls retrofitted with wire mesh and cement-sand mortar. In *16th World Conference on Earthquake Engineering* (16WCEE).
- Giuclea, M., Sireteanu, T., & Mitu, A. M. (2009). Use of genetic algorithms for fitting the Bouc-Wen model to experimental hysteretic curves. *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Mécanique Appliquée*, 54.
- Higashino, M., & Okamoto, S. (2006). *Response control and seismic isolation of buildings* (1.<sup>a</sup> ed.). Taylor & Francis.
- Ikhouane, F., Mañosa, V., & Rodellar, J. (2007). Dynamic properties of the hysteretic Bouc-Wen model. *Systems & Control Letters*, 56(3), 197–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2006.09.001>
- Jangid, R. S. (2005). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 27(3), 349–359.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.09.013>

- Kang, G. J., & Kang, B. S. (2009). Dynamic analysis of fiber-reinforced elastomeric isolation structures. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 1132–1141. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-1214-y>
- Kant, R., Wesam, A. A., Mohindra, S. T., & Umamaheswari, N. (2021). Impact of the lead rubber base isolators on reinforced concrete building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1026(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1026/1/012004>
- Kavvadias, I., Bibo, H., & Vasiliadis, L. (2017). Finite element modeling of single and multi-spherical friction pendulum bearings. In *COMPADYN 2017 - 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* (pp. 4408–4416).
- Kelly, J. (1997). *Earthquake-resistant design with rubber*. Springer.
- Kikuchi, M., & Aiken, I. D. (1997). An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 215–231. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199702\)26:2<215::AID-EQE640>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199702)26:2<215::AID-EQE640>3.0.CO;2-9)
- Leyton, M. (2017). *Implementación de aisladores sísmicos en un edificio de viviendas en Lima, Perú* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Markou, A., & Manolis, G. (2016). Mechanical formulations for bilinear and trilinear hysteretic models used in base isolators. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(12), 3591–3611.
- Mayergoyz, I. (2003). *Mathematical models of hysteresis and their applications*. Academic Press.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *RM-355-2018-Vivienda: Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *RM-030-2019-Vivienda: Norma Técnica E.031 Aislamiento Sísmico*.
- Molina, F., Verzeletti, G., Magonette, G., Vito, F., & Bono, F. (1999). Ensayo sísmico de estructuras. *Física de la Tierra*, 11, 285–305.
- Muñoz, A., Díaz, M., & Reyna, R. (2019). Applicability study of a low-cost seismic isolator prototype using recycled rubber. *TECNIA*, 29(2).

- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures*. John Wiley & Sons.
- Nuñez, L., Zavala, C., Reyna, R., & Taipicuri, Y. (2020). Development of an on-line control based on conventional pseudo-dynamic testing method. In *17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE)*.
- Peldoza, E. (2002). *Análisis computacional no lineal de estructuras de acero* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile].
- Reyna, R. (2011). Shear modulus on natural rubber samples under ASTM D4014. *Reporte Técnico del CISMID - FIC - Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Reyna, R., Saito, T., & Zavala, C. (2013). Numerical simulation of base isolated building during the Great East Japan Earthquake and a comparison of different hysteresis models. In *13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*.
- Reyna, R., Zavala, C., Muñoz, A., & Díaz, M. (2018). Prototype of low-cost seismic isolator using recycled tire sheets. In *16th European Conference on Earthquake Engineering*.
- Saito, T. (2022). *STERA 3D Technical Manual v7.2*. Toyohashi University of Technology (TUT).
- Turer, A., & Özden, B. (2008). Seismic base isolation using low-cost scrap tire pads (STP). *Materials and Structures*, 41, 891–908.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-007-9292-3>
- Zavala, C., & Kaminosono, T. (2003). Construction monitoring and improvement techniques for masonry housing. *Reporte Técnico del CISMID - FIC - Universidad Nacional de Ingeniería*.

## ANEXOS

ANEXO A: Elaboración de espécimen de módulo de corte.....	109
ANEXO B: Plano de vivienda representativa .....	112
ANEXO C: Manual de usuario del programa D'ABC.....	114
ANEXO D: Plano de prototipo de aislador de bajo costo (ABC).....	125
ANEXO E: Verificación estructural del sistema de rodillos.....	127
ANEXO F: Protocolo de ensayo cíclico de aisladores sísmico.....	132
ANEXO G: Plano de ensamble de mecanismo de carga para ensayo cíclico (ABC).....	143

## ANEXO A : ELABORACIÓN DE ESPECIMEN DE MÓDULO DE CORTE

El proceso de fabricación de los especímenes de corte de neopreno, caucho natural y caucho reciclado es el mismo para las nueve muestras. Dicho proceso será descrito a continuación.

- Como primer paso, se realiza el proceso de arenado o granallado de las placas rígidas con el fin de limpiar y preparar las superficies donde será unida el apoyo elastómero.
- Una vez teniendo las placas rígidas granalladas, se recubre el espacio donde el material elastómero será vulcanizado con un adhesivo comercial “Chemlok220”, cuyas especificaciones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° A.1 Propiedades típicas del adhesivo “Chemlok220”

Propiedades	Descripción
Apariencia	Líquido negro
Viscosidad	135 - 300 cP a 25°C
Densidad	1000.00 – 1100.00 kg/m <sup>3</sup>
Contenido sólido por peso	23 – 27%
Punto de Inflamabilidad	25°C
Solvente	Xileno, Percloroetileno

(Fuente: Elaboración Propia)

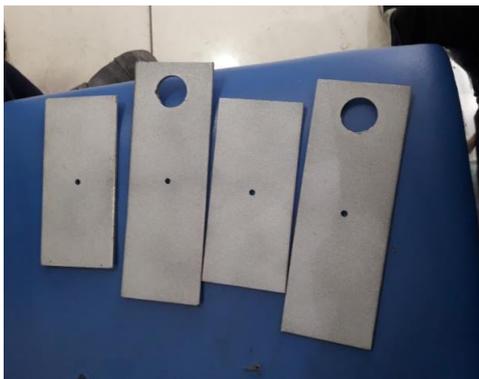


Figura N° A.1 Arenado de placas rígidas



Figura N° A.2 Cubierta de adhesivo “Chemlok220”

(Fuente: Elaboración Propia)

Se prepara el material elastómero en planchas para su posterior recorte. Una vez recortado en trozos cuadrados de aproximadamente 7 mm, se colocan los retazos de caucho en la matriz de vulcanizado, junto a las placas rígidas. Dicha matriz de

vulcanizado ha sido fabricada con el fin de obtener las medidas requeridas de cada apoyo de material elastómero mediante un proceso de vulcanizado térmico, normadas según la norma ASTM D-4014.

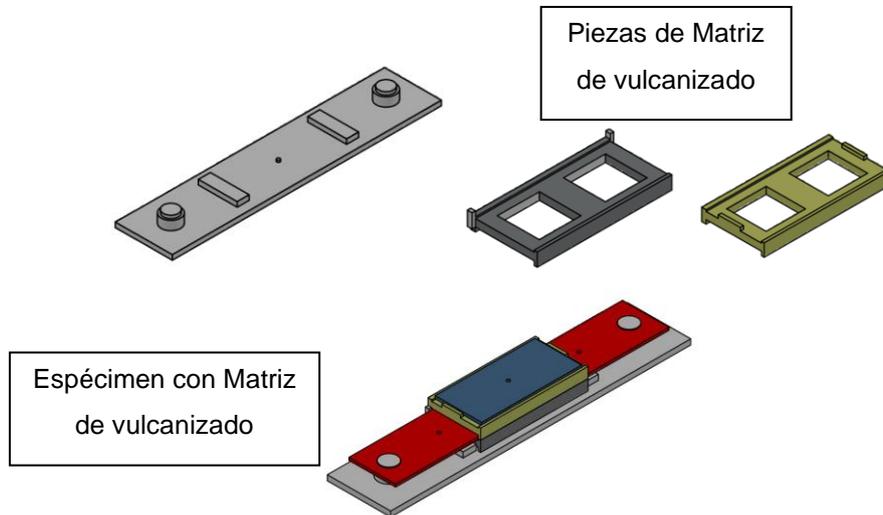


Figura N° A.3 Matriz de vulcanizado para especímenes de módulo de corte.  
(Fuente: Elaboración Propia)



Figura N° A.4 Planchas de material elastómero



Figura N° A.5 Recorte y cubierta de la primera capa de material elastómero



Figura N° A.6 Colocado de la segunda capa de material elastómero



Figura N° A.7 Colocado de las placas rígidas a la matriz de vulcanizado

(Fuente: Elaboración Propia)

Luego, se procede a dar paso al proceso de vulcanizado. Este proceso dura aproximadamente 25min por cada espécimen. Una vez transcurrido ese tiempo, se desmolda la matriz de vulcanizado para dar paso al siguiente espécimen.



Figura N° A.8 Vulcanizado de espécimen de módulo de corte



Figura N° A.9 Desmoldaje de la matriz de vulcanizado



Figura N° A.10 Especimen vulcanizado



Figura N° A.11 Especímenes embalados y entregados

(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, se corrige las imperfecciones causadas por exceso de caucho en los alrededores de los cuatro cojinetes de material elastómero y se procede al pintado de las placas rígidas.



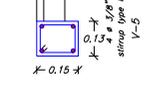
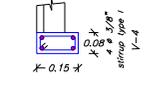
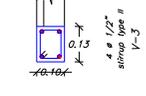
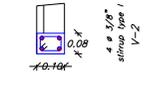
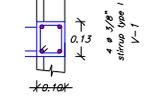
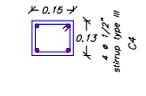
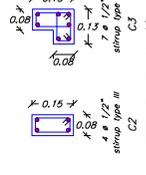
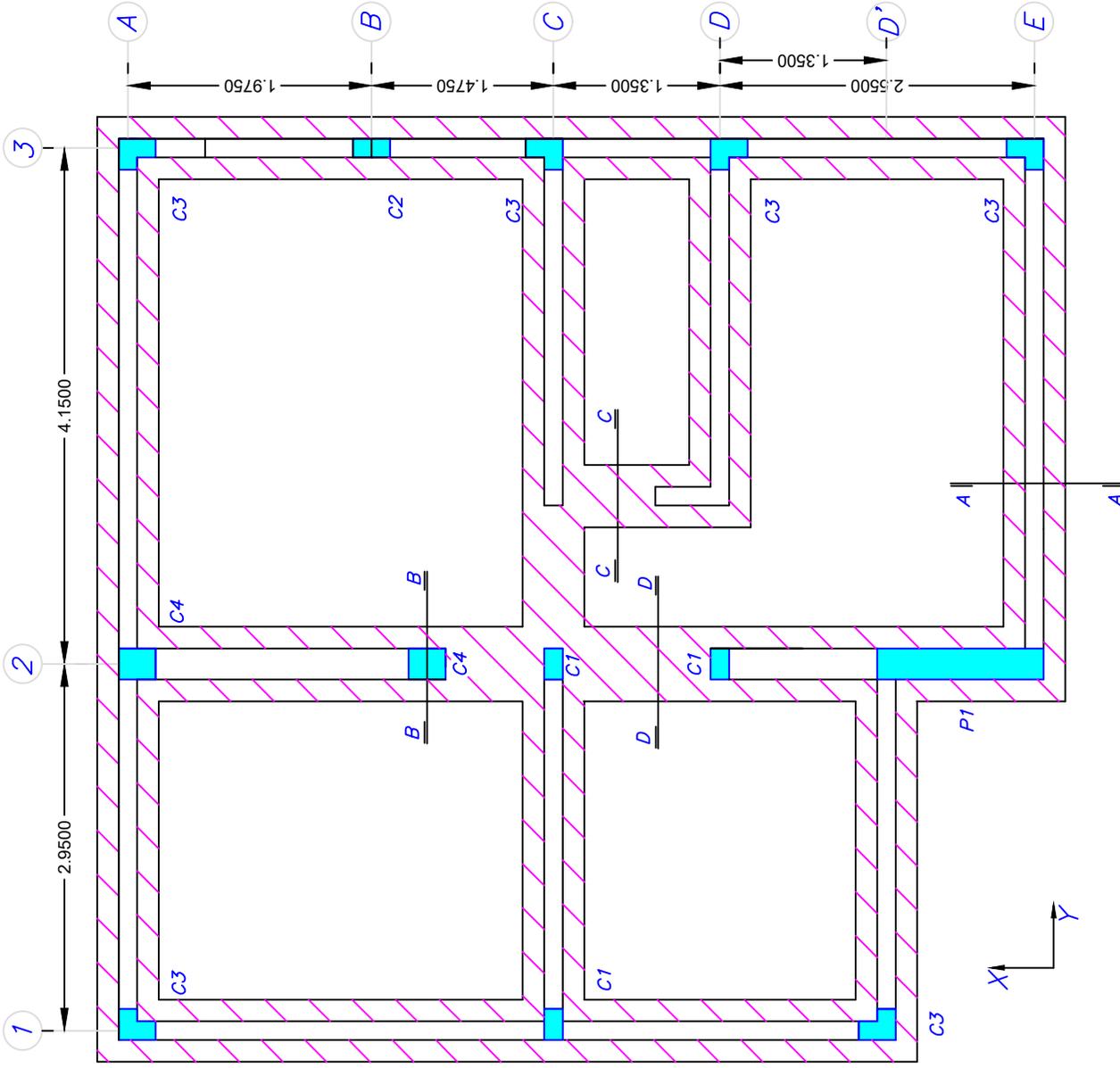
Figura N° A.12 Pintado de especímenes de módulo de corte.



Figura N° A.13 Especímenes finales para ensayar

(Fuente: Elaboración Propia)

## **ANEXO B : PLANO DE VIVIENDA REPRESENTATIVA**



SECTION OF BEAMS

SECTION OF COLUMNS

STAIRBUP  
TYPE I ( ) # 1/4" : 10 0.05 - 40 0.10 - 1 # @ 0.25  
TYPE II ( ) # 1/4" : 10 0.05 - 60 0.10 - 1 # @ 0.20  
TYPE III ( ) # 1/4" compressed : 10 0.05 - 40 0.10 - 1 # @ 0.25



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES  
LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

PROYECTO: "Project for Construction Monitoring and Improvement Techniques for Masorny Housing"

PLANO: VIVIENDA REPRESENTATIVA

ELABORADO POR: C.Homma

FECHA: Lima MAR 2002

ESC: 1/50

REVISION: C.Zovada - P.Gibu

A-02

## ANEXO C : MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA D'ABC

El programa de diseño de aislador elastómero D'ABC (Diseño de Aislador de Bajo Costo) elaborado en la presente tesis tiene como propósito el dimensionamiento de la estructura del aislador sísmico y conocer sus propiedades, cumpliendo con diferentes parámetros recomendados y su verificación mediante la N.T.P. E.031 "Aislamiento Sísmico", mediante una interfaz gráfica de fácil interpretación para el usuario. El programa está codificado en lenguaje Python, utilizando librerías como: Tkinter, Math, Numpy y Matplotlib.

### CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA:

- ✓ El programa está dividido por en 6 columnas y está organizado por sectores.
- ✓ Cuenta con una barra deslizadora en la parte superior.
- ✓ Cuenta con 3 espacios gráficos, de los cuales 2 son dinámicos y 1 es estático.
- ✓ Posee 8 botones que sirven para ejecutar funciones del programa por los diferentes sectores del programa.
- ✓ Posee "Entry" o espacios de color verde y celeste, que indica el llenado de datos manualmente y el llenado de datos por el programa, respectivamente.
- ✓ Posee un "Radiobutton" en la 5ta columna, el cuál rellena los espacios en blanco del sector manualmente o por defecto.

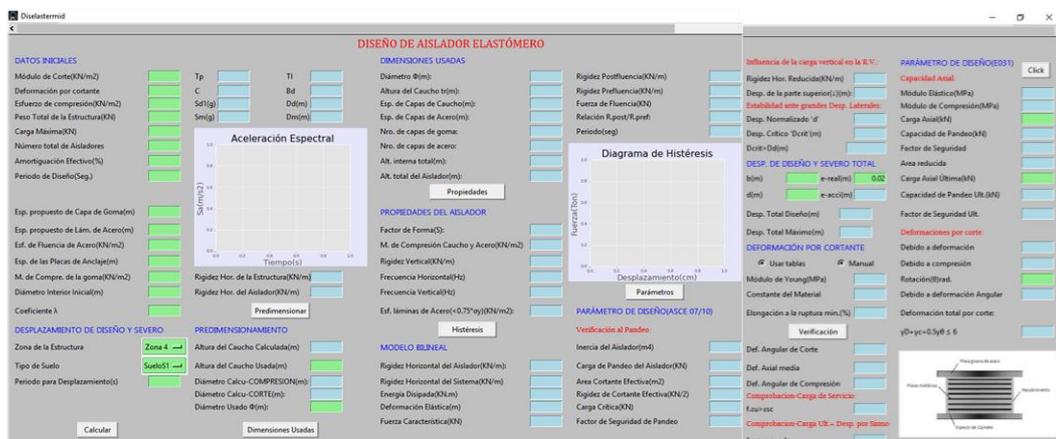


Figura N° C.1 Interfaz Gráfica Completa del programa D'ABC

## FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA:

### Sector 1: Datos Iniciales

En este primer sector o panel, se colocan los datos preliminares que se debe saber del caucho, acero y la estructura objetivo.

DATOS INICIALES	
Módulo de Corte(KN/m <sup>2</sup> )	700
Deformación por cortante	1.5
Esfuerzo de compresión(KN/m <sup>2</sup> )	15000
Peso Total de la Estructura(KN)	3433.5
Carga Máxima(KN)	400
Número total de Aisladores	11
Amortiguación Efectivo(%)	15
Periodo de Diseño(Seg.)	2.5
Esp. propuesto de Capa de Goma(m)	0.01
Esp. propuesto de Lám. de Acero(m)	0.004
Esf. de Fluencia de Acero(KN/m <sup>2</sup> )	250000
Esp. de las Placas de Anclaje(m)	0.025
M. de Compre. de la goma(KN/m <sup>2</sup> )	2000000
Diámetro Interior Inicial(m)	0
Coficiente $\lambda$	0.1

Figura N° C.2 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 1

- Se coloca el módulo de corte del caucho en  $\text{kN/m}^2$
- Se coloca la deformación por cortante del caucho.
- Se coloca el esfuerzo de compresión del caucho en  $\text{kN/m}^2$ .
- Se coloca el Peso total de la estructura en kN.
- Se coloca la carga máxima soportada por un aislador en kN.
- Se coloca la cantidad de aisladores que se colocarán en planta.
- Se coloca el amortiguamiento efectivo del sistema, que es dependiendo del tipo de dispositivo de aislador que se está utilizando (%).
- Se coloca el periodo de diseño, que es el periodo objetivo de la estructura en segundos.
- Se coloca un espesor de capa de goma inicial en m.
- Se coloca un espesor de lámina de acero inicial en m.
- Se coloca el esfuerzo de fluencia del acero en  $\text{kN/m}^2$ .
- Se coloca el espesor de las placas de acero exteriores en m.
- Se coloca el módulo de compresibilidad de la goma en  $\text{kN/m}^2$ .
- Se coloca el diámetro interior del aislador en caso tuviera en m.
- Se coloca el coeficiente  $\lambda$  que es el factor que sirve para determinar el rango elástico en el modelo bilineal.

Sector 2: Desplazamiento de por Sismo de Diseño y Severo

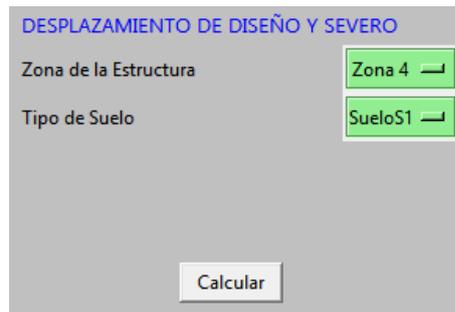


Figura N° C.3 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 2 a

- En la parte de zona de la estructura se da click en la lista desplegable derecha y se elige la zona donde se encuentra la Estructura Objetivo, según la norma E030.
- En la parte de tipo de suelo se da click en la lista desplegable derecha y se elige el tipo de suelo donde se encuentra la Estructura Objetivo, según la norma E030
- Finalmente se coloca el botón “Calcular”, para hallar los parámetros siguientes.

En la parte superior de la 2da columna se obtiene los parámetros necesarios para el cálculo del desplazamiento por sismo de diseño y por sismo severo.

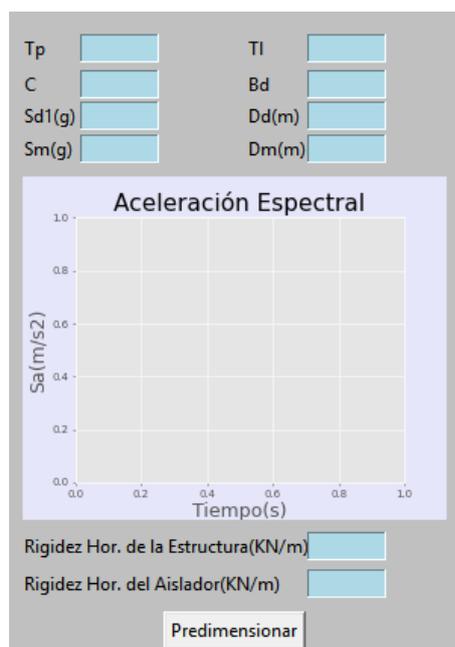


Figura N° C.4 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 2 b

- En  $T_p$  es el periodo que define la plataforma del factor C según la norma E030.
- El  $T_I$  se coloca es el periodo que define el inicio de la zona del factor C según la norma E030.
- Se calcula el C que es el factor de amplificación sísmica.
- El  $B_m$  es el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico indicado en la normal E031.
- El  $S_a$  es la ordenada del espectro de aceleraciones para el sismo de diseño en  $g(m/s^2)$ .
- El  $D_d$  es el desplazamiento total en el centro de rigidez del sistema de aislamiento para el sismo de diseño en m.
- El  $S_m$  es la ordenada del espectro de aceleraciones para el sismo de máximo considerado en  $g(m/s^2)$ .
- El  $D_m$  es el desplazamiento total en el centro de rigidez del sistema de aislamiento para el sismo de diseño en m.
- Se observa un cuadro el cuál muestra gráficamente la aceleración espectral del sismo de diseño y del sismo máximo considerado respecto el tiempo o periodo.
- Se calcula por último en la parte inferior del sector 2, la rigidez horizontal de la estructura y la rigidez horizontal del aislador en  $(kN/m)$ .
- Por último, se presiona el botón “Predimensionar”, para seguir con el cálculo.

Sector 3: Predimensionamiento:

En este tercer sector se busca predimensionar la altura total de caucho y el diámetro del aislador.

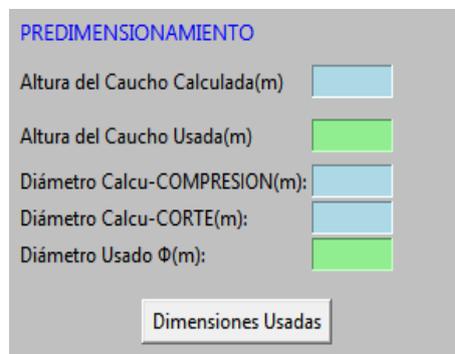


Figura N° C.5 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 3

- Después de presionar el botón predimensionar, calculará una altura de caucho, el cual se tomará de referencia para colocar en la 2da casilla de este sector, la altura de caucho que vamos a verificar en m.
- Luego de colocar la altura de caucho usada, se presiona nuevamente el botón predimensionar el sector 2 para generar el predimensionamiento del diámetro por compresión y por corte, que nos ayudará para observar el mayor de estos y colocar el diámetro que vamos a verificar en m.
- Finalmente se presiona el botón “Dimensiones Usadas” para proseguir con el cálculo.

#### Sector 4: Dimensiones Usadas:

En este cuarto sector se busca ordenar y da a conocer las dimensiones del aislador para su verificación.

The image shows a software interface titled "DIMENSIONES USADAS". It contains eight input fields, each with a light blue rectangular box to its right. The labels for the fields are: "Diámetro  $\Phi$ (m):", "Altura del Caucho tr(m):", "Esp. de Capas de Caucho(m):", "Esp. de Capas de Acero(m):", "Nro. de capas de goma:", "Nro. de capas de acero:", "Alt. interna total(m):", and "Alt. total del Aislador(m):". Below these fields is a button labeled "Propiedades".

Figura N° C.6 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 4

- La primera casilla es el diámetro usado en m.
- La segunda casilla es la altura total de caucho medida en m.
- La tercera fila es el espesor de capa de caucho inicial que se colocó en el sector 1.
- La cuarta fila es el espesor de la lámina de acero inicial que se colocó en el sector 1.
- La quinta fila es el número de capas de goma o caucho que resulta de la relación entre la altura total de caucho y su espesor.
- La quinta fila es el número de láminas de acero
- La séptima fila corresponde a la altura total interna que viene dado por la suma de espesores de caucho y láminas de acero.

- La octava fila es la altura total del aislador que es la altura interna, más los aceros de anclaje superior e inferior.
- Finalmente se presiona el botón “Propiedades” para seguir la dinámica del programa.

De los valores posteriores, por recomendaciones y verificaciones establecidas por libros y normas deberán cumplir con diferentes condiciones, en caso estar en el rango de cumplimiento se mostrará el valor de color azul, en caso contrario será de color rojo y se deberá modificar los parámetros iniciales o las dimensiones del sector 3.

### Sector 5: Propiedades del Aislador

En el quinto sector muestra algunas propiedades del aislador.

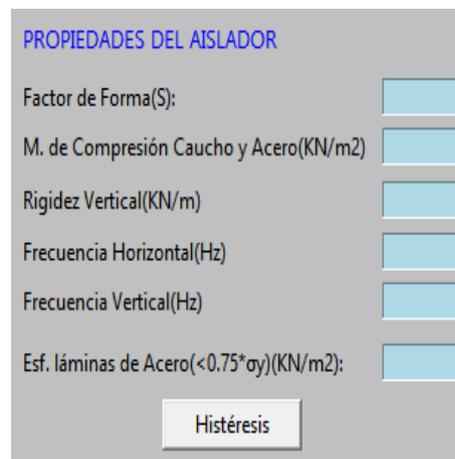


Figura N° C.7 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 5

- La primera fila es el factor de forma del aislador, y se recomienda que sea mayor a 10.
- La segunda fila corresponde al módulo de compresión de Caucho y Acero en  $\text{kN/m}^2$ .
- La tercera fila es la rigidez vertical, que se calculó en función del Módulo de compresión, el área del aislador y la altura total del caucho, medida en  $\text{kN/m}^2$ .
- La cuarta fila es la frecuencia horizontal que está en relación del periodo de diseño, medida en Hz.
- La quinta fila es la frecuencia vertical del aislador que se recomienda sea mayor a 10 Hz.

- La sexta fila calcula el esfuerzo en las láminas de acero y debe ser menor al 75% del esfuerzo de fluencia del acero.
- Finalmente se presiona el botón “Histéresis” para proseguir con el cálculo del modelo bilineal.

### Sector 6: Modelo Bilineal-Parámetros

En el sexto sector muestra las propiedades dinámicas del aislador

Figura N° C.8 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 6

- La primera fila indica la rigidez horizontal, con el diámetro establecido por el usuario en  $\text{kN/m}^2$ .
- La segunda fila indica la rigidez del sistema en  $\text{kN/m}^2$ .
- La tercera fila indica la energía disipada por el aislador en  $\text{kN.m}$
- La cuarta fila indica la deformación en la zona elástica del aislador.
- La quinta fila indica la fuerza característica (Q) del aislador en  $\text{kN}$ .
- La sexta fila del sector 6, indica la rigidez post-fluencia medida en  $\text{kN/m}$ .
- La séptima fila indica la rigidez en la zona elástica medida en  $\text{kN/m}$ .

- La octava fila indica la fuerza necesaria de fluencia del aislador medida en kN.
- La novena fila indica la relación entre la rigidez de post-fluencia y pre-fluencia.
- La décima fila es el periodo del ciclo de histéresis.

### Sector 7: Verificación por Sismo de Diseño (Otros Autores)

En el séptimo sector se busca verificar el aislador por el sismo de diseño y también calcular el desplazamiento total máximo.



PARÁMETRO DE DISEÑO(ASCE 07/10)

Verificación al Pandeo:

Inercia del Aislador(m4)	<input type="text"/>
Carga de Pandeo del Aislador(KN)	<input type="text"/>
Area Cortante Efectiva(m2)	<input type="text"/>
Rigidez de Cortante Efectiva(KN/2)	<input type="text"/>
Carga Crítica(KN)	<input type="text"/>
Factor de Seguridad de Pandeo	<input type="text"/>

Figura N° C.9 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 7 a

- La primera fila indica el momento de inercia del aislador con el diámetro del sector 4.
- La segunda fila es la carga de pandeo del aislador en kN.
- La tercera fila indica el área cortante efectiva necesaria para calcular la fuerza por cortante efectiva.
- La cuarta fila indica la fuerza por cortante efectiva en kN
- La quinta fila indica la carga crítica del aislador, que relaciona la carga de pandeo del aislador y fuerza por cortante medida en kN
- La sexta fila es la relación entre la carga crítica y la carga máxima axial analizada, la cuál debe ser mayor a 2.

The image shows two panels of a software interface. The left panel, titled 'Influencia de la carga vertical en la R.V.:', contains input fields for 'Rigidez Hor. Reducida(KN/m)', 'Desp. de la parte superior(↓)(m):', and 'Estabilidad ante grandes Desp. Laterales:' with sub-fields for 'Desp. Normalizado 'd'', 'Desp. Crítico 'Dcrit'(m)', and 'Dcrit>Dd(m)'. Below this is a section 'DESP. DE DISEÑO Y SEVERO TOTAL' with fields for 'b(m)', 'e-real(m)' (set to 0.02), 'd(m)', and 'e-acci(m)'. At the bottom are 'Desp. Total Diseño(m)' and 'Desp. Total Máximo(m)'. The right panel, titled 'DEFORMACIÓN POR CORTANTE', has radio buttons for 'Usar tablas' and 'Manual'. It includes fields for 'Módulo de Young(MPa)', 'Constante del Material', 'Elongación a la ruptura min.(%)', and a 'Verificación' button. Below are 'Def. Angular de Corte', 'Def. Axial media', and 'Def. Angular de Compresión'. It also has sections for 'Comprobacion-Carga de Servicio:' with 'f.εu>εsc' and 'Comprobacion-Carga Ult.+ Desp. por Sismo:' with 'f.εu>εsc+εsh'.

Figura N° C.10 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 7 b

- Luego calcula parámetros por la influencia de la carga vertical, la reducción de la rigidez horizontal en kN/m y desplazamiento vertical del aislador producto de la rotación de las placas de acero de refuerzo en el centro del aislador, su medida está dada en metros.
- En el módulo de estabilidad ante grandes desplazamientos laterales, se calcula el desplazamiento normalizado y el desplazamiento crítico, este desplazamiento crítico debe ser mayor al desplazamiento hallado por el sismo de diseño.
- En el módulo de desplazamiento de diseño y máximo considerado total, se coloca en el espacio de “b”, la mayor dimensión de la vivienda objetivo en planta; en el espacio “d” se coloca la menor dimensión de la vivienda objetivo en planta; en el espacio “e-real” se coloca la excentricidad real de la estructura; y se procede a presionar el botón “ENTER” para calcular su excentricidad accidental(correspondiente al 5% de la dimensión más larga, perpendicular respecto a la dirección de análisis), el desplazamiento total máximo del espectro diseño y el desplazamiento total máximo del espectro máximo considerado.
- En el módulo denominado deformación por cortante, se busca comprobar las deformaciones del aislador; primero se necesita saber factores como el módulo de Young, constante del material y elongación a la ruptura mínima, en caso saber estos factores presionar la opción de

“manualmente” e ingresar por pantalla, en caso no saberlos, el programa lo calcula en función al módulo de corte.

Se prosigue a presionar el botón “Verificación” para proseguir con el cálculo de deformaciones.

- Se calcula la deformación angular por corte, la deformación axial media y la deformación angular de compresión, necesarias para comparar la elongación a la ruptura mínima multiplicadas por un factor dependiente del tipo de carga y desplazamiento.

### Sector 8: Verificación por Sismo Máximo Esperado E031

En el octavo sector se verifica los parámetros del Anexo 2 de la Norma Técnica Peruana E.031” Aislamiento Sísmico”

PARÁMETRO DE DISEÑO(E031)	
Capacidad Axial:	<input type="button" value="Click"/>
Módulo Elástico(MPa)	<input type="text"/>
Módulo de Compresión(MPa)	<input type="text"/>
Carga Axial(kN)	<input type="text"/>
Capacidad de Pandeo(kN)	<input type="text"/>
Factor de Seguridad	<input type="text"/>
Area reducida	<input type="text"/>
Carga Axial Última(kN)	<input type="text"/>
Capacidad de Pandeo Ult.(kN)	<input type="text"/>
Factor de Seguridad Ult.	<input type="text"/>

Figura N° C.11 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 8 a

- Primero se debe colocar los valores de Carga Axial en kN, Carga Axial Última en kN y la rotación de la Estructura que debe ser mayor a 0.003 radianes.
- Luego se procede a presionar el botón “Click” para que el programa complete los parámetros restantes.
- El módulo de “Capacidad Axial”, lo primero que se calcula es el módulo elástico que se recomienda ser 4 veces el módulo de corte y el módulo de compresión que es dependiente del módulo elástico.
- Luego la fila 4 y 5 son cálculos de la capacidad de pandeo en kN, y del factor de seguridad que debe ser mayor a 3 para este primer caso.

- En la fila 6 se obtiene el área reducida relacionada al desplazamiento total máximo y diámetro.
- Finalmente, en la fila 8 y 9 se obtiene la capacidad al pandeo última en kN y el factor de seguridad que debe ser mayor a 1 para este segundo caso.

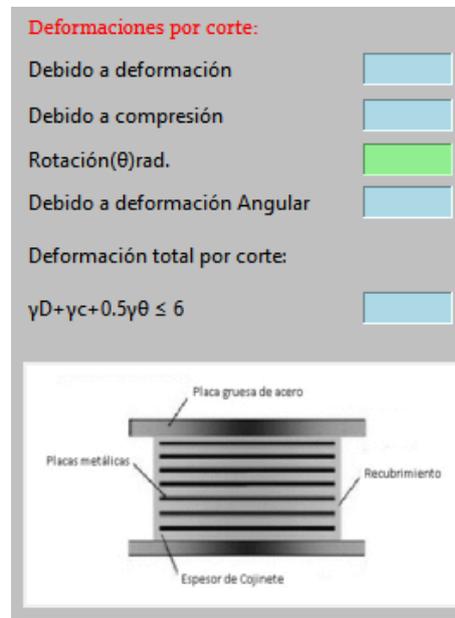
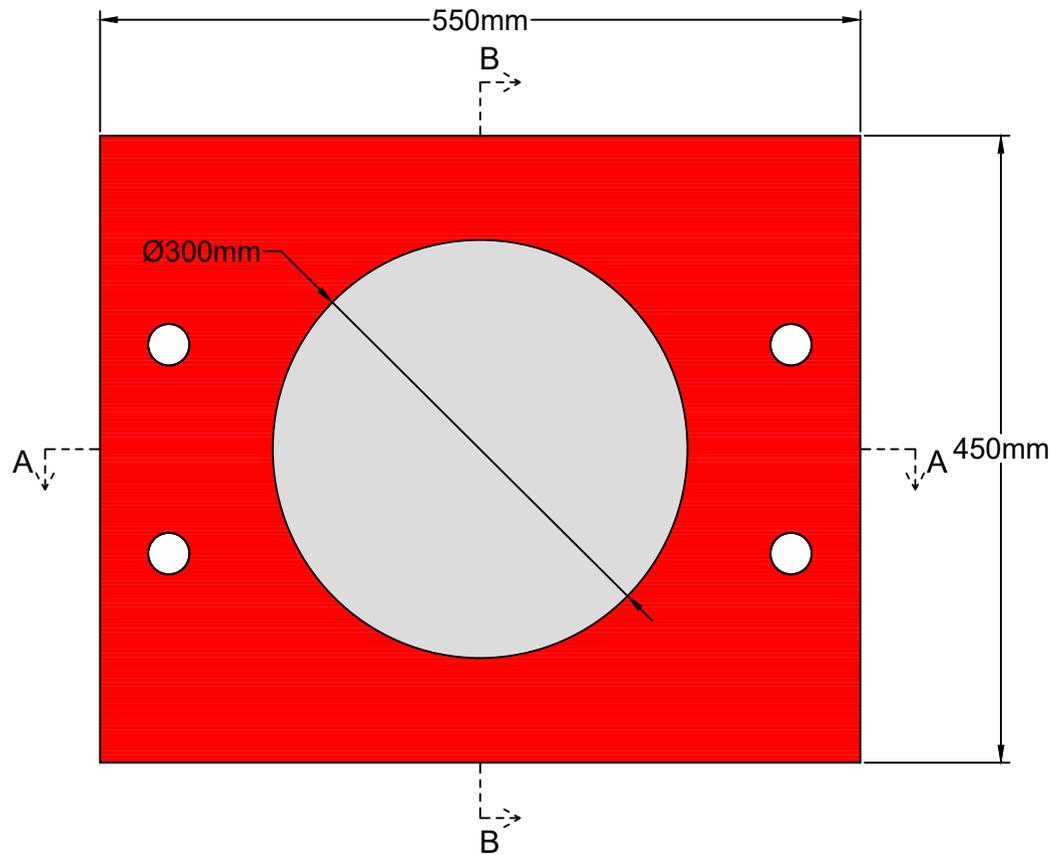


Figura N° C.12 Interfaz gráfica del programa D'ABC – sector 8 b

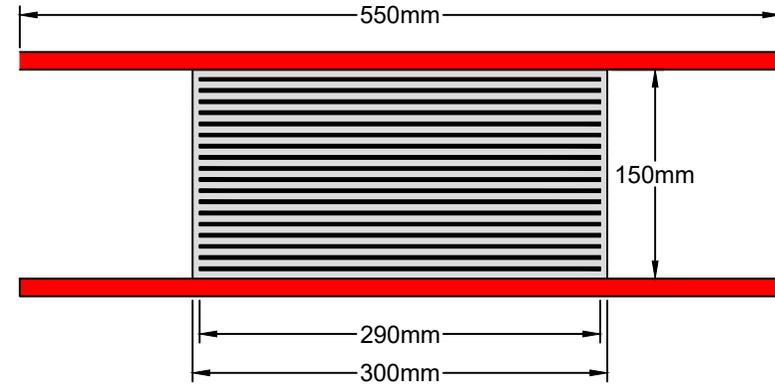
- En el módulo de “Deformación por corte”, se calcula la deformación por corte, debido a la compresión y debido a la deformación angular, estos parámetros son adimensionales y debe verificar que la relación mostrada en pantalla debe ser menor a 6.
- Por último, se observa un gráfico que muestra la configuración del caucho, láminas de acero internas y externas.

## **ANEXO D : PLANO DE PROTOTIPO DE AISLADOR DE BAJO COSTO (ABC)**

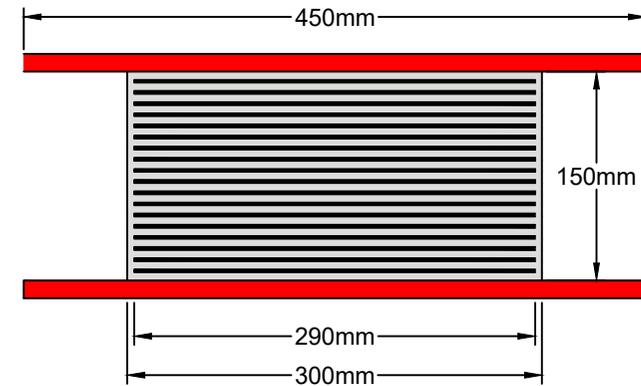
VISTA EN PLANTA SIN PLANCHA SUPERIOR



CORTE A-A



CORTE B-B



NOTA:

1. Espesor de Capas de Caucho = 6mm.
2. Número de Capas de Caucho = 19
3. Espesor de Láminas de Acero = 2mm.
4. Número de Láminas de Acero = 18
5. Espesor de Acero Exterior= 1/2 pulg
6. Recubrimiento-contorno = 0.5cm.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
 CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES  
 LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



PROYECTO:

"Estudio experimental de un prototipo de aislamiento sísmico de bajo costo usando diferentes tipos de material elastómero"

PLANO:

PROTOTIPO DE AISLADOR DE BAJO COSTO (ABC)

ESC:

1/5

FECHA:

Lima  
 OCT 2020

ELABORADO POR:

D.Velásquez

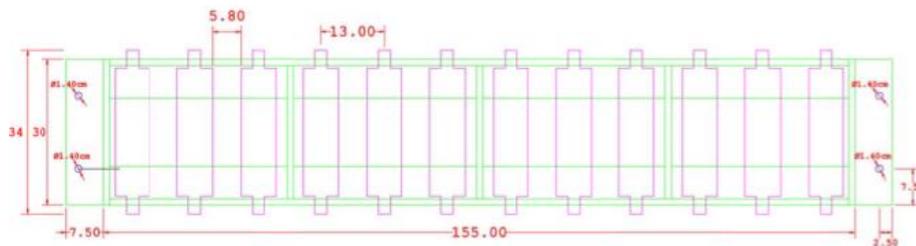
REVISION:

R.Reyna

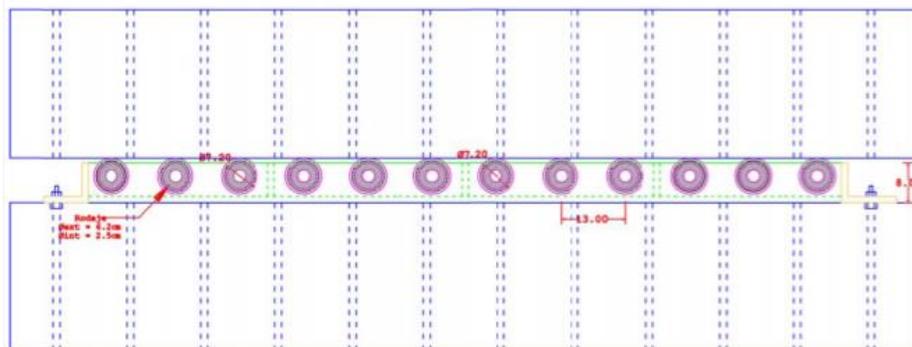
A-04

## ANEXO E : VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE RODILLOS

Se realizó un mecanismo hecho por rodillos metálicos con un sistema de rodajes para reducir los efectos de disipación por fricción durante el ensayo de carga lateral cíclica del prototipo de aislamiento sísmico. Este mecanismo está compuesto por perfiles de acero de tipo ángulo como acero de soporte para los ejes cilíndricos metálicos, en donde estará compuesto por rodillos y rodajes interiores en sus extremos, como se ve en la Figura N° 4.15. Un mayor detalle de las dimensiones y la distribución de rodajes se muestra en la Figura N° E.1.



(a) Vista Superior (cm.)



(b) Vista Frontal

Figura N° E.1 Sistema de rodillos para mecano de ensayo

(Fuente: Elaboración Propia)

De acuerdo al mecano de ensayo y al diseño preliminar de los prototipos de aislamiento sísmico, se obtiene una carga considerada estática axial de 36 tonf, la cual será distribuida en 8 rodillos, según la transmisión trapezoidal mostrada en la Figura N° E.2. Como es sabido que el ensayo requiere un movimiento lateral de aproximadamente 200 mm, el sistema de rodillo propuesto contiene 12 ejes los cuales están diseñados para soportar la carga última de ensayo. Con esta consideración, cada eje deberá resistir  $36 \text{ tonf} / 8 \text{ ejes} = 4.5 \text{ tonf/eje}$ . Se usó para la fabricación, acero cuyo esfuerzo de fluencia es de 36 ksi.

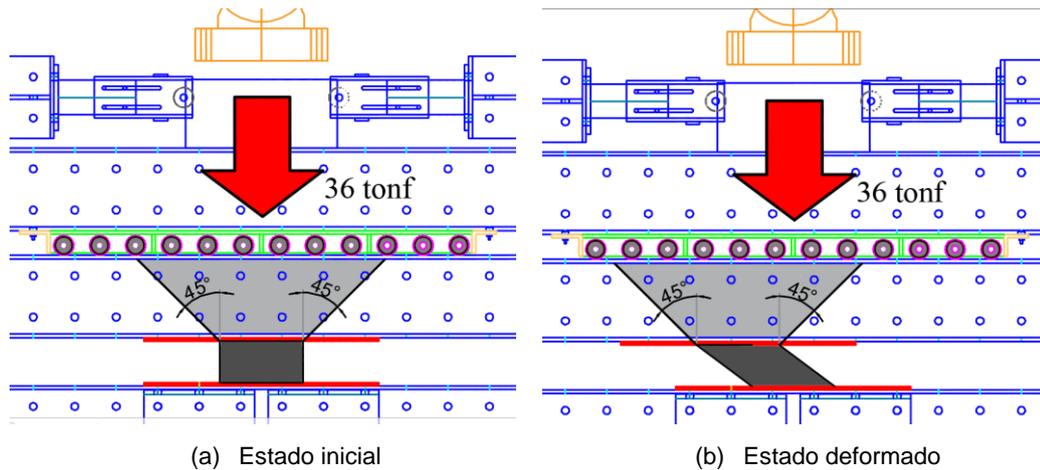


Figura N° E.2 Distribución de carga última axial del sistema de rodillos  
(Fuente: Elaboración Propia)

Entonces se verificarán el eje y el rodillo de acuerdo a las acciones de flexión y corte. Las dimensiones de ambas piezas del sistema de rodillos son vistas en la siguiente figura:

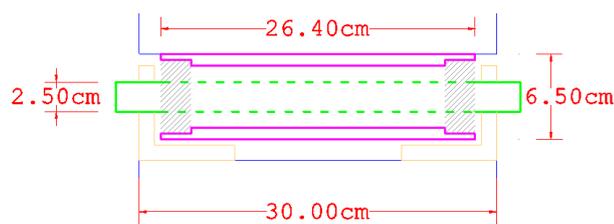


Figura N° E.3 Dimensiones del eje y rodillo  
(Fuente: Elaboración Propia)

Como se observa, el eje (color verde) cuenta con una sección circular sólida de 25 mm de diámetro y una luz entre apoyos de 300 mm. De la misma forma, el rodillo (color morado) consta de un tubo circular de 264 mm de largo, un diámetro exterior de 65 mm y un espesor de 10 mm.

### 1. Verificación del eje

✓ Por flexión:

$$Mu1 = \frac{Fmax}{2} brazo$$

Donde:

$Mu$  = Momento Último en el eje

$Fmax$  = Fuerza Máxima en un rodillo-eje

$brazo$  = Distancia entre el apoyo del eje y rodajes  $\approx$  2cm

$$Mu = \frac{4.5 \text{ tonf}}{2} (2 \text{ cm}) = 4.5 \text{ tonf} - \text{cm}$$

Como:

$$\phi Mn1 = 0.9 Fy Z$$

Donde:

$\phi Mn$  = Momento resistente de diseño o capacidad.

$Fy$  = Fluencia del Acero A36

$Z$  = Módulo de Sección Plástica, para sección circular =  $\frac{4}{3}(R)^3$

$$\phi Mn = (0.9) \left( 25310 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \right) Z$$

$$\phi Mn = (0.9) \left( 25310 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \right) \left( \frac{4}{3} \right) (1.25 \text{ cm})^3 = 5.93 \text{ tonf} - \text{cm}$$

$$\therefore Mu < \phi Mn \quad \text{CUMPLE!}$$

✓ Por corte:

$$Vu1 = \frac{Fmax}{2}$$

Donde:

$Vu$  = Fuerza cortante última en el eje

$Fmax$  = Fuerza Máxima en un rodillo-eje

$$Vu = \frac{4.5 \text{ tonf}}{2} = 2.25 \text{ tonf} - \text{cm}$$

Como:

$$\phi Vn1 = 0.9 \cdot 0.6 \cdot Fy \cdot Aw1$$

Donde:

$\phi Vn1$  = Fuerza cortante resistente de diseño o capacidad.

$Fy$  = Fluencia del Acero A36

$Aw1$  = Área de la sección del eje de acero

$$\phi Vn1 = (0.9)(0.6) \left( 25310 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) \pi \frac{(2.5 \text{ cm})^2}{4}$$

$$\phi Vn1 = 6.04 \text{ ton} \cdot \text{cm}$$

$$\therefore Vu1 < \phi Vn1 \quad \text{CUMPLE!}$$

## 2. Verificación del rodillo

✓ Por flexión:

Como:

$$Mu2 = \frac{Fmax}{8} \cdot L$$

Donde:

$Mu1$  = Momento último en el rodillo

$Fmax$  = Fuerza máxima en un rodillo-eje

$L$  = Longitud del rodillo

$$Mu2 = \frac{4.5 \text{ tonf}}{8} (26.4 \text{ cm}) = 14.85 \text{ tonf} - \text{cm}$$

Como:

$$\phi Mn2 = 0.9 Fy Z$$

Donde:

$\phi Mn2$  = Momento resistente de diseño o capacidad.

$Fy$  = Fluencia del Acero A36

$Z$  = Módulo de Sección Plástica, para sección tubular =  $\frac{4}{3}(R^3 - r^3)$

$$\phi Mn2 = (0.9) \left( 25310 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \right) Z$$

$$\phi Mn2 = (0.9) \left( 25310 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \right) \left( \frac{4}{3} \right) ((6.5 \text{ cm})^3 - (6 \text{ cm})^3) = 22.26 \text{ tonf} - \text{cm}$$

$$\therefore Mu2 < \phi Mn2 \quad \text{CUMPLE!}$$

✓ Por corte:

$$Vu2 = \frac{Fmax}{2}$$

Donde:

$Vu$  = Fuerza cortante última en el rodillo

$Fmax$  = Fuerza Máxima en un rodillo-eje

$$Vu2 = \frac{4.5 \text{ tonf}}{2} = 2.25 \text{ tonf}$$

Como:

$$\phi Vn2 = 0.9 \cdot 0.6 \cdot Fy \cdot Aw2$$

Donde:

$\phi V_n$  = Fuerza cortante resistente de diseño o capacidad.

$F_y$  = Fluencia del Acero A36

$A_w$  = Área de la sección del rodillo de acero

$$\phi V_n = (0.9)(0.6) \left( 25310 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) \pi \left[ \frac{(6.5\text{cm})^2}{4} - \frac{(6\text{cm})^2}{4} \right]$$

$$\phi V_n = 11.6 \text{ ton.cm}$$

$$\therefore V_u < \phi V_n \quad \text{CUMPLE!}$$

## **ANEXO F : PROTOCOLO DE ENSAYO CÍCLICO DE AISLADORES SÍSMICO**

### **1. INTEGRANTES DEL PROYECTO**

JEFE DEL PROYECTO: Persona Responsable del Proyecto.

ASISTENTE 1: Encargado de la Sala de Control.

ASISTENTE 2: Encargado de controlar el Actuador Horizontal

ASISTENTE 3: Apoyo de la Sala de Control

ASISTENTE 4: Encargado de la mesa de adquisición de data

ASISTENTE 5: Operador de la laptop para la adquisición de data

ASISTENTE 6: Operador de las cámaras filmadoras y hoja de trabajo

ASISTENTE 7 y 8: Operadores de la cámara fotográfica

### **2. RESPONSABILIDADES**

#### **JEFE DEL PROYECTO**

- Responsable de los resultados obtenidos de la ejecución del ensayo.
- Coordinaciones necesarias para llevar a cabo el proyecto.
- Responsable de los accesorios y aditamentos necesarios para realizar el proyecto.

#### **ASISTENTE 1 “Encargado de la sala de Control”**

- Encargado de coordinar la ejecución del ensayo.
- Encargado del uso de los actuadores y manejar manualmente el actuador vertical.
- Encargado de comunicarse con la zona de adquisición de data.

#### **ASISTENTE 2 “Encargado de controlar el Actuador Horizontal”**

- Encargado del uso del programa para el control de actuadores.
- Conocer detalladamente el manual de ensayo, el manual de uso de actuadores y el manual del programa controlador de Actuadores.
- Aprenderse el historial de desplazamientos de ensayo.

#### **ASISTENTE 3 “Apoyo de la Sala de Control”**

- Conocer detalladamente el manual de ensayo, el manual de uso de actuadores y el manual del programa controlador de Actuadores.
- Encargado de saber la secuencia de ensayo y disponer de la tabla de secuencia.

- Apoyar al asistente 1, a prender los actuadores horizontal y vertical, según el manual.
- Informar a sala de control los sucesos del ensayo.

### 3. ESQUEMA DE ENSAYO

El ensayo cíclico de aisladores sísmicos deberá realizarse mediante un esquema similar al mostrado a continuación, teniendo en cuenta los siguientes detalles previos:

- Se emplazará el mecano de carga en un lugar central para el punto de vista de los responsables o asistentes del ensayo.
- Los aisladores de material caucho que no han sido ensayados serán encontrados al lado de atrás del mecano de ensayo para no implicar la imagen tomadas por la cámara o filmadores del ensayo.
- Todos los aparatos, personas e inmuebles involucrados en el ensayo no deberán sobrepasar la línea punteada de la zona de seguridad durante el funcionamiento de los actuadores (un metro aproximadamente a la periferia del mecano de carga).
- Las tomas eléctricas, cargadores, cables de sensores, extensiones y afines a esta definición serán colocadas mediante canaletas metálicas, o en su defecto, mediante amarres temporales con cinta de embalaje a lugares que no puedan estovar o provocar accidentes de conexión eléctrica durante el movimiento de los asistentes.
- Se deberá colocar 4 cámaras las cuales serán encargadas de grabar y enfocar el ensayo de manera panorámica (cámara 1), de manera detallada con cercanía hacia al espécimen (cámara 2), y para realizar un registro fotográfico de tiempos específicos del ensayo (cámara 3 y 4).
- Evitar estar en la zona de visión de filmadoras para poder documentar a detalle las deformaciones del espécimen durante el funcionamiento de las mismas.

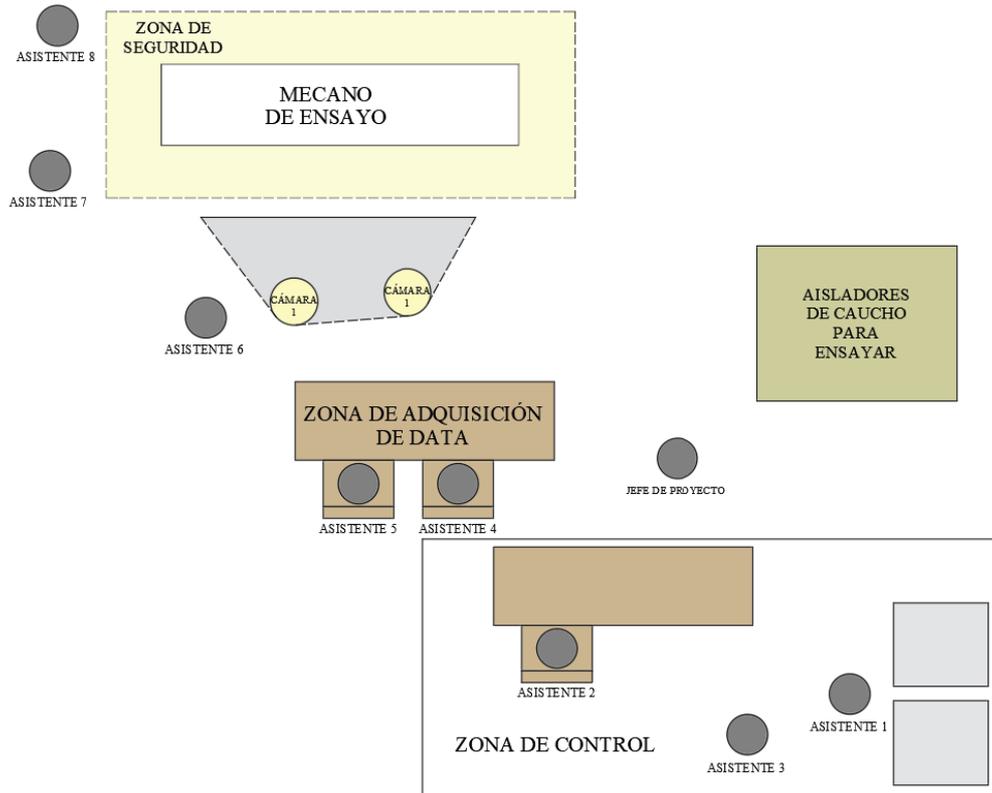


Figura N° F.1 Distribución de integrantes en la zona de ensayo

(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4. HISTORIA DE CARGA Y DEFORMACIONES

Tabla N° F.1 Historia de carga y deformación de actuadores ABC-C

ABC-C			
N° de Ciclos	Carga Axial (kN)	Desplazamiento R.	Desplazamiento(mm)
3	172.7	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168
3		1.00D <sub>M</sub>	168
10		0.75D <sub>M</sub>	126
3	364.9	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168
3	13.7	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla N° F.2 Historia de carga y deformación de actuadores ABC-N

<b>ABC-N</b>			
N° de Ciclos	Carga Axial (kN)	Desplazamiento R.	Desplazamiento(mm)
3	111.8	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168
3		1.00D <sub>M</sub>	168
10		0.75D <sub>M</sub>	126
3	24.4	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168
3	239.4	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla N° F.3 Historia de carga y deformación de actuadores ABC-R

<b>ABC-R</b>			
N° de Ciclos	Carga Axial (kN)	Desplazamiento R.	Desplazamiento(mm)
3	87.3	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168
3		1.00D <sub>M</sub>	168
10		0.75D <sub>M</sub>	126
3	191.3	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168
3	2.0	0.25D <sub>M</sub>	42
3		0.50D <sub>M</sub>	84
3		0.67D <sub>M</sub>	112.6
3		1.00D <sub>M</sub>	168

(Fuente: Elaboración Propia)

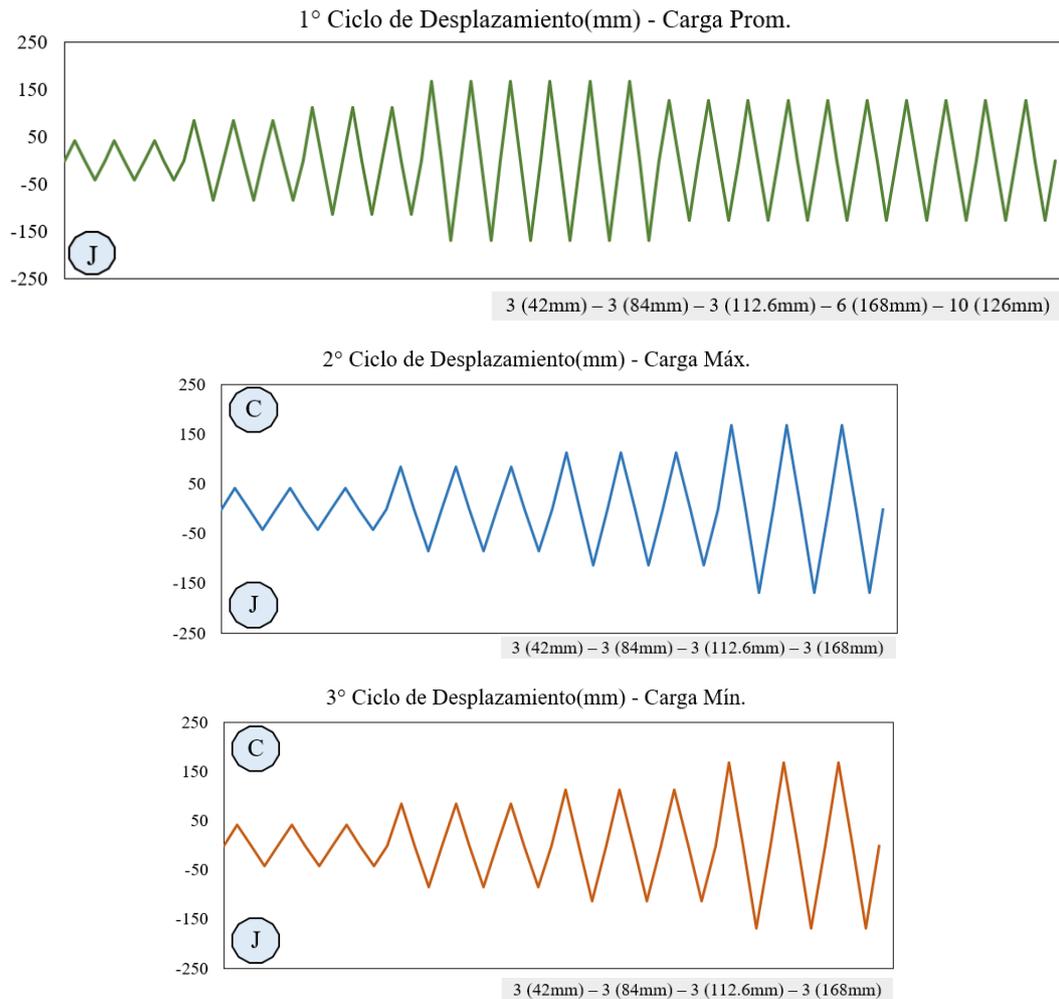


Figura N° F.2 Picos de Desplazamiento – Etapa Inicial, Media y Final  
(Fuente: Elaboración Propia)

## 5. PREPARATIVOS PREVIOS

Un día antes de cada ensayo, se tendrá que preparar el espacio de trabajo de la siguiente manera:

Cámara Fotográfica:

- Cargar la batería de la cámara.
- Verificar que la tarjeta SD tenga suficiente memoria.

Cámara de Video:

- Verificar que la tarjeta SD tenga suficiente memoria.
- Verificar que el cargador de la cámara esté disponible.

Especímen de Ensayo (Aisladores):

- Verificar el orden de los aisladores para que estén listos para ensayar y que los códigos respectivos sean visibles.

#### Impresiones:

- Tener lista la impresión del panel correspondiente al ensayo.
- Tener lista la impresión de los códigos de los aisladores listos para ensayar.
- Tener lista la impresión de la fecha correspondiente al día del ensayo.
- Tener lista la impresión de los formatos a utilizar para registrar.

#### 6. ETAPA PRE ENSAYO

Al iniciar cada día, se tendrá que preparar el espacio de trabajo de la siguiente manera:

##### Panel:

- Colocar el panel de ensayo en formato A3 correspondiente al proyecto de investigación.
- Colocar el código de los aisladores a ensayarse, asimismo la fecha del día del ensayo en el panel.

##### Cámara Fotográfica:

- Colocar el código de la Cámara en el Registro de aparatos utilizados para el proyecto.

##### Cámara de Video:

- Colocar el código de la Cámara en el Registro de aparatos utilizados para el proyecto.
- Colocar las cámaras de video en una posición donde se visualice el ensayo en forma panorámica y en forma detallada.

##### Laptop:

- Traer la laptop y el dispositivo USB que permite acceder al adquirente de datos bajo responsabilidad del JEFE DE PROYECTO.

##### Adquirente de datos de Transductores (LVDT) y Celda de Carga:

- Verificar la correcta colocación de los transductores en el cableado correspondiente.
- Verificar las constantes de los transductores.
- Verificar la correcta lectura de los actuadores.

##### Transductores

- Colocar alineadamente los transductores de desplazamiento según el plano con la ayuda del técnico de laboratorio en los lugares descritos.

## 7. ETAPA DE ENSAYO

### 7.1 Estado Inicial del espécimen

- Para comenzar, asegurar la limpieza de la zona de trabajo.
- Tener listos los 8 pernos, 8 tornillos y 8 huachas, para el anclaje del aislador.
- Colocar el aislador en el mecano de carga, de preferencia entre 2 a 3 personas, para prevenir caída o volcamiento del aislador perpendicular a su eje.
- Realizar 3 medidas de la altura del aislador y anotar el promedio en la hoja de trabajo del ASISTENTE 6
- Verificar los transductores de desplazamiento, siguiendo el orden de los planos correspondientes.
- Verificar la verticalidad y la horizontalidad de los transductores, según sea el caso.
- Definir el cero en el ordenador controlado por el ASISTENTE 2 y 5 en las mediciones de todos los sensores de desplazamiento.
- Verificar el rango de medición de todos los sensores de desplazamiento con el fin de asegurar la correcta medición de la deformación y dar paso al inicio del ensayo.
- Realizar una prueba a carga axial, para asegurar el soporte del sistema de rodamiento.

### 7.2 Inicio de Ensayo

- Cambiar el nombre del código de espécimen en el panel.
- Antes de empezar con el primer ciclo de movimiento, se le dará tiempo al ASISTENTE 7 y 8 para que tome las fotografías correspondientes al iniciar el ensayo.
- Cuando el JEFE DE PROYECTO dé el aviso que todo está listo para comenzar, el ASISTENTE 2 y 5 deberá balancear nuevamente (hacer cero las lecturas del adquisidor de datos) e iniciar con la adquisición de data (monitoreo y guardado de la data). Tener en cuenta que solo el JEFE DE PROYECTO puede indicar el inicio del ensayo ya que él es el responsable directo que la data este guardándose correctamente. Esto puede tardar entre 30 a 40 segundos.

- Una vez transcurrido los 30 o 40 segundos y comience la adquisición de data, el ASISTENTE 2 y 5 iniciará la grabación de la pantalla de la laptop con el programa Atube Catcher, y simultáneamente el ASISTENTE 6 se encargará de comenzar la grabación de video del ensayo.
- Una vez se inicia la grabación de ensayo, el ASISTENTE 4 registrará la hora de inicio del ensayo en el formato de registro y avisará a los responsables el código del aislador a ensayar y del ciclo de distorsión correspondiente, en voz alta.
- El ASISTENTE 1 comenzará el inicio de carga del actuador a carga axial.
- El ASISTENTE 1 es el encargado de dar continuidad al ensayo e indicar al ASISTENTE 2 que inicie los ciclos de carga con el actuador horizontal.
- Iniciada la prueba, el ASISTENTE 1 estará encargado de parar el ensayo si es que el grupo se ve sometido a algún peligro, alertando al ASISTENTE 2 para que pare el movimiento del actuador, por lo que no deberá moverse de su sitio en el momento de comenzado el ensayo.
- En cada ciclo completo de deformación, ajustar el dial del actuador vertical, para mantener constante la carga vertical.

### 7.3 Toma de datos

- En cada ciclo de carga, el ASISTENTE 6 es el encargado de avisar al ASISTENTE 7 y 8 los picos de deformación para que éste pueda tomar la fotografía correspondiente según el capítulo XII del protocolo.
- Se repetirá el proceso de carga y descarga según el capítulo VI. Estos ciclos deben estar en el pico de la deformación correspondiente o en todo caso tratar que esté cercano y por encima. Si en caso ocurre alguna interrupción o equivocación en el desplazamiento el ASISTENTE 2 deberá parar la prueba y cambiar el historial de desplazamientos.
- El ASISTENTE 4 y 6 apuntará en el Registro de Ensayo la carga máxima alcanzada y el desplazamiento registrado por el transductor en los ciclos de carga por cada distorsión.
- Una vez finalizado el último ciclo el ASISTENTE 2 y 5 se encargará de guardar la data y grabación registrada del ensayo bajo el nombre del código del aislador ensayado.
- Apagar la cámara de video.
- Una vez terminado el paso anterior, se procederá a retirar el aislador ensayado hacia un lugar alejado de la zona de ensayo y se limpiará la zona

de trabajo con los accesorios de limpieza para dar culminado el día de ensayo.

- El JEFE DE PROYECTO indicará que se debería hacer con los aisladores ya ensayados.

### 7. ETAPA DE DESCANSO / ALMUERZO / INTERRUPCIÓN

- Mantener el actuador vertical sin carga y prendido.
- Mantener el actuador horizontal en la posición cero del ensayo y prendido.
- Alistar los carteles para la actualización del panel de ensayo.
- Guardar los datos registrados.
- Retirar la laptop, el dispositivo USB que permite el acceso al adquirente de datos y sus demás implementos hacia un lugar seguro, indicado y coordinado por el JEFE DE PROYECTO.

### 8. ETAPA FINAL

- Apagar los Actuadores según el manual.
- Descargar una copia de todos los archivos de la data obtenida en el día en un dispositivo USB, y posteriormente apagar la laptop.
- Apagar el adquirente de datos.
- Apagar los carretes (extensiones), y desenchufar.
- Bajar el panel y retirar el fondo para permitir usar el día siguiente su respectivo fondo.
- Separar los aisladores que se utilizarán el día siguiente.
- Retirar la laptop, el dispositivo USB que permite el acceso al adquirente de datos y sus demás implementos hacia un lugar seguro, indicado y coordinado por el JEFE DE PROYECTO.
- Retirar la cámara de video, y las cámaras fotográficas a un lugar seguro, indicado y coordinado por el JEFE DE PROYECTO.

### 8. PANEL FOTOGRÁFICO

- Como mínimo se requerirán de 60 a más fotografías por ensayo, las cuáles serán indicadas a continuación:
- Fotografía solo del panel (código del aislador).
- Fotografía del aislador anclado al mecano de carga, 2 ángulos de visión (2 fotografías).
- Fotografía donde se muestre el panel y aislador en conjunto antes de dar inicio al ensayo, 3 ángulos de visión (3 fotografía por distorsión).

- Fotografía del aislador en cada pico de “cargar y jalar” del ensayo.
- Fotografía en cada cambio de panel de ensayo
- Fotografía del espécimen al cambiar la fuerza axial del actuador vertical, 3 ángulos. (3 fotografías)
- Fotografía del aislador al finalizar el último ciclo de la última distorsión (3 fotografías).
- Fotografía al término del ensayo luego de haber colocado el espécimen aislado del mecano de carga donde se pueda apreciarse la falla obtenida, en caso fallara (4 fotografías).

### 8. CÓDIGO DE ARCHIVO

- Los archivos correspondientes al adquisidor de data serán guardados bajo el código del aislador (el cual será definido por el jefe de proyecto en coordinación con el solicitante).
- Las fotos y videos serán codificados según la siguiente estructura:  
(Código de aislador)-(Fecha)
  - La fecha tendrá la siguiente forma: (Dos primeras letras del Día /dd/mm/yy)  
Ejemplo: ABC-C-MA130721
  - En el caso de las fotos, se colocará el código en la carpeta que almacene el total de fotos tomadas por ensayo según capítulo XII del protocolo.

### 9. ACCIONES DE CONTINGENCIA

- Faltó imprimir o se perdieron algunos de los códigos impresos para colocar en el panel.
  - Acción: Cortar una hoja del tamaño de los códigos, y con lapicero o plumón negro escribir el código del espécimen que está por ensayarse.
- Se terminó la batería de alguna de las cámaras o alguna de las memorias SD están llenas.
  - Acción: Redactar el problema en el Registro de Contingencias, conseguir una nueva cámara o memoria SD para intercambiar y luego registrar la nueva cámara en el registro de aparatos utilizados para el proyecto.
- No se guardó algún archivo en la laptop.
  - Acción: Redactar el problema en el Registro de Contingencias y colocar en observaciones del Registro de Ensayo.
- Ocurrencia de algún peligro circunstancial o accidente durante el ensayo.

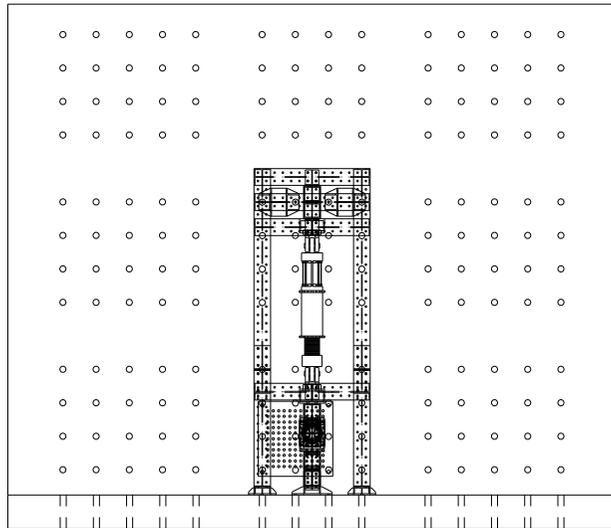
- Acción: El ASISTENTE 1 y 2 debe estar preparado para finalizar la carga y desplazamiento de los actuadores, y en caso de ocurrir algún accidente, se debe socorrer a dicha persona, y comunicarse con el JEFE DEL PROYECTO. Finalmente, se debe redactar el problema en el Registro de Contingencias y colocar en observaciones del Registro de Ensayo.

#### 10. NORMATIVA

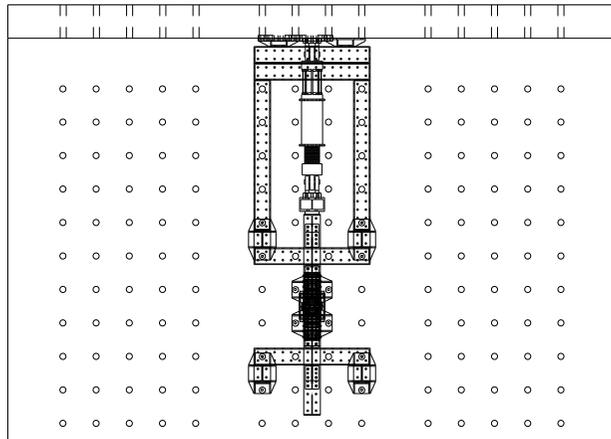
##### E.031: "AISLAMIENTO SÍSMICO"

ACCIÓN	NOMBRE	FECHA
ELABORADO POR:	Bach. Diego Velásquez Acevedo	15/11/21
REVISADO Y APROBADO POR:	Dr. Roy Ericksen Reyna Salazar	15/11/21

**ANEXO G : PLANO DE ENSAMBLE DE MECANISMO DE CARGA PARA  
ENSAYO CÍCLICO (ABC)**

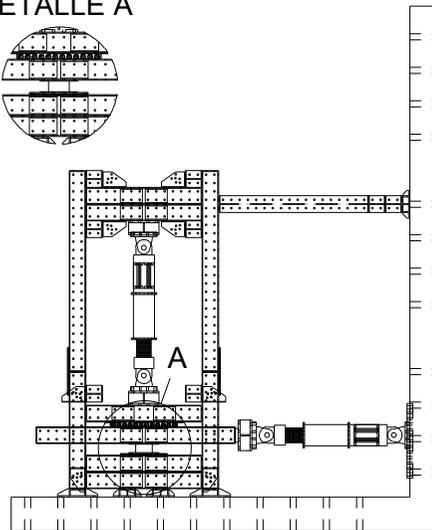
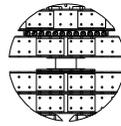


VISTA FRONTAL

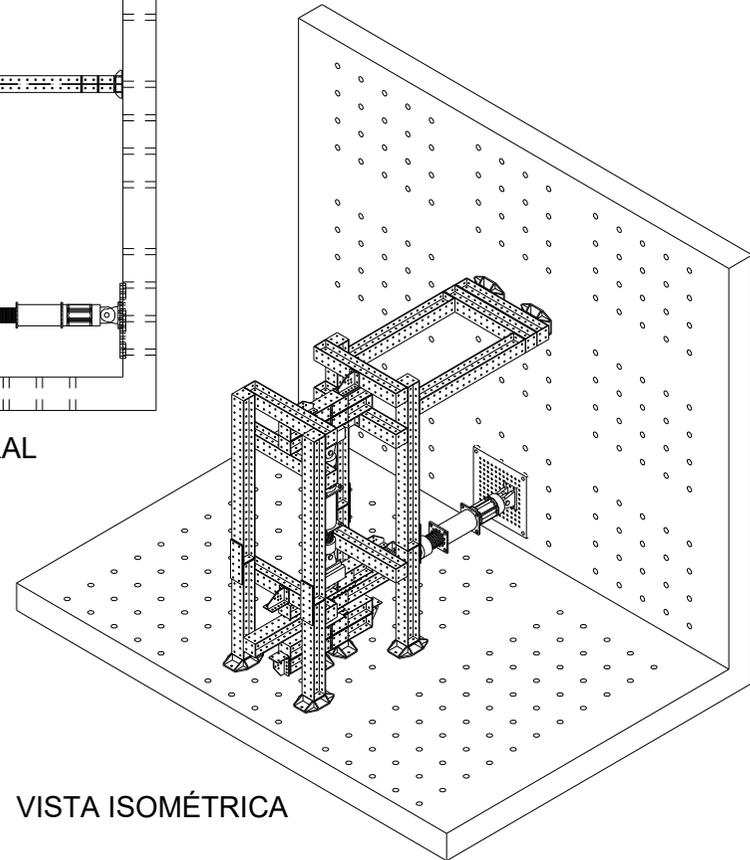


VISTA-PLANTA

DETALLE A



VISTA LATERAL



VISTA ISOMÉTRICA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
 CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES  
 LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



PROYECTO:

"Estudio experimental de un prototipo de aislamiento sísmico de bajo costo usando diferentes tipos de material elastómero"

PLANO:

ENSAMBLE DE MECANISMO DE CARGA PARA ENSAYO CICLICO (ABC)

ESC:

1/125

FECHA:

Lima  
 OCT 2021

ELABORADO POR:

D.Velásquez

REVISION:

R.Reyna

A-07