



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

AUTOR: CACHIPUENDO CONDOY, FERNANDO WILLIAMS

**TEMA: GUÍA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AISLADOR
ELASTOMÉRICO PARA UNA EDIFICACIÓN DE CUATRO PISOS**

DIRECTOR: DR. AGUIAR, ROBERTO

CODIRECTOR: ING. CANDO, MANUEL

SANGOLQUÍ, ENERO 2013

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. CACHIPUENDO CONDOY FERNANDO WILLIAMS como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Sangolquí, enero de 2014

Dr. Roberto R. Aguiar Falconí

DIRECTOR

Ing. Manuel A. Cando Loachamin

CODIRECTOR

REVISADO POR

Ing. Patricio Romero Flores

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

FERNANDO WILLIAMS CACHIPUENDO CONDOY

Declaro que:

El proyecto de grado que se denomina “GUÍA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AISLADOR ELASTOMÉRICO PARA UNA EDIFICACIÓN DE CUATRO PISOS”, se desarrolló en base a una investigación adecuada, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las referencias que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Sangolquí, enero de 2014

FERNANDO W. CACHIPUENDO CONDOY

AUTORIZACIÓN

Yo, FERNANDO WILLIAMS CACHIPUENDO CONDOY

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo “GUÍA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AISLADOR ELASTOMÉRICO PARA UNA EDIFICACIÓN DE CUATRO PISOS”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, enero de 2014

FERNANDO W. CACHIPUENDO CONDOY

DEDICATORIA

A la memoria de mi querida abuelita que con mucho cariño la llevo en mis pensamientos y en mi corazón.

A mis padres, que con su paciencia y amor me han convertido en el ser humano que soy, y que a pesar de mi condición jamás se han rendido, siempre me han apoyado y no me han dejado caer.

A mi pequeña hermana, compañera de aventuras, alegrías y tristezas.

A mi pequeñín que está por llegar y que lo espero con ansias y mucho amor.

A todas aquellas personas con alguna complicación en su salud que al igual que yo, no se dan por vencidas y pese a todos los momentos difíciles y tristes que se nos presentan logramos sacar fuerzas de algún lado, borramos las lágrimas, mostramos una sonrisa, nos levantamos y con decir “yo puedo”, continuamos y avanzamos día a día.

Fernando W. Cachipundo

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme regalado un corazón vigilante, que en todo este tiempo ha apartado todo pensamiento vano, evitando que me aleje de él, por darme un corazón noble, que ningún afecto indigno rebaje; un corazón recto, para hacer las cosas correctas y evitar que la maldad me desvíe; un corazón fuerte, para afrontar las adversidades y evitar que me quebranten y un corazón generoso, para servir con amor.

A mis padres Fanny y Humberto por ser el pilar fundamental en mi vida y con su amor y esfuerzo me han impulsado a seguir adelante, a mi hermana Diana por estar siempre conmigo.

A mi familia especialmente a mis tíos, Ubaldo, Wilmer, Mario y Narcisa por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi carrera.

A la Escuela Politécnica del Ejército, Carrera de Ingeniería Civil, a todos mis profesores por compartir sus conocimientos y sabiduría.

A mí estimado director de tesis Dr. Roberto Aguiar Falconí, por la confianza y el apoyo brindados durante esta investigación, por incentivarnos día a día a ser mejores personas y buscar la excelencia.

A todas las personas que confiaron, me apoyaron y permanecieron junto a mí en esta etapa de mi vida.

Fernando W. Cachipundo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	III
AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VII
LISTADO DE TABLAS	XI
LISTADO DE CUADROS	XIV
LISTADO DE FIGURAS	XV
NOMENCLATURA.....	XXI
RESUMEN.....	XXVI
ABSTRACT	XXVII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO 2: PELIGROSIDAD SÍSMICA	6
2.1 INTRODUCCIÓN	7
2.2 ORIGEN DE LOS SISMOS EN EL ECUADOR.....	7
2.2.1 SISMOS ORIGINADOS EN LAS FALLAS GEOLÓGICAS	7

2.2.2	SISMOS ORIGINADOS POR LA SUBDUCCIÓN.....	8
2.2.3	SISMOS DE ORIGEN VOLCÁNICO.....	8
2.3	SISMICIDAD HISTÓRICA DEL ECUADOR.....	9
2.4	ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA NEC – 11.....	11
2.4.1	FACTORES DE SITIO.....	13
2.4.2	ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTOS.....	15
2.4.3	FACTORES DE CERCANÍA.....	16
CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA.....		18
3.1	INTRODUCCIÓN.....	19
3.2	HISTORIA DE LA PROTECCIÓN SÍSMICA.....	21
3.2.1	ORÍGENES DE LOS CÓDIGOS SÍSMICOS.....	27
3.3	CARACTERÍSTICAS.....	28
3.4	CLASIFICACIÓN.....	32
3.4.1	SISTEMAS ACTIVOS.....	33
3.4.2	SISTEMAS SEMI - ACTIVOS.....	35
3.4.3	SISTEMAS PASIVOS.....	36
CAPÍTULO 4: AISLADORES SÍSMICOS.....		37
4.1	INTRODUCCIÓN.....	38
4.2	TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS.....	39
4.2.1	AISLADORES ELASTOMÉRICOS.....	39
4.2.2	AISLADORES DESLIZANTES.....	41
4.3	ASPECTOS ARQUITECTÓNICOS.....	43
4.4	BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE USO.....	45

4.4.1	BENEFICIOS	45
4.4.2	LIMITACIONES DE USO.....	45
4.5	CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA EN EL USO DE AISLADORES.....	46

CAPÍTULO 5: DISEÑO DE AISLADORES DE BASE SÍSMICOS

	ELASTOMÉRICOS	48
5.1	INTRODUCCIÓN	49
5.2	MODELO BILINEAL	49
5.3	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	52
5.4	DISEÑO	54
5.4.1	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO PREVIO	55
5.4.2	COMPROBACIÓN	62
5.4.3	EJEMPLOS DE DISEÑO.....	88
5.5	PROGRAMA ELASTOESPE.....	161

CAPÍTULO 6: EXPERIENCIAS CON AISLADORES SÍSMICOS

	ELASTOMÉRICOS FABRICADOS EN LA ESPE.....	170
6.1	INTRODUCCIÓN	171
6.2	PROTOTIPOS AGUIAR – AUQUI 2010	171
6.2.1	PRIMER PROTOTIPO: AISLADOR CON PERNO PASANTE.....	172
6.2.2	SEGUNDO PROTOTIPO: AISLADOR CON PERNO VULCANIZADO	174
6.2.3	TERCER PROTOTIPO: AISLADOR CON RESORTE EN EL NÚCLEO.....	176

6.3	AISLADOR ELASTOMÉRICO ANDEC – 2012.....	178
6.4	AISLADOR ELASTOMÉRICO AGUIAR – CACHIPUENDO 2013	184
6.4.1	PROCESO DE DISEÑO DEL AISLADOR.	185
6.4.2	PROCESO DE FABRICACIÓN DEL AISLADOR.....	199
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		203
7.1	CONCLUSIONES.	204
7.2	RECOMENDACIONES	206
BIBLIOGRAFÍA.....		208
ANEXOS ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.		
ANEXO A: CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA ELASTOESPE.....¡Error!		
Marcador no definido.		
ANEXO B: FICHA TÉCNICA DEL AISLADOR		
AGUIAR - CACHIPUENDO 2013		
¡Error! Marcador no definido.		

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de Efectos causados por los terremotos con intensidad VIII o superior. (IG EPN, 2010 - 2013)	10
Tabla 2: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)	13
Tabla 3: Tipo de suelo y Factores de sitio Fa. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011).....	13
Tabla 4: Tipo de suelo y Factores de sitio Fd. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011).....	14
Tabla 5: Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo Fs. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011).....	14
Tabla 6: Combinaciones de carga para la evaluación de los aisladores elastoméricos.	62
Tabla 7: Coeficiente f_I para aisladores circulares. (Constantinou, 2011)	63
Tabla 8: Coeficiente f_I para Aisladores circulares huecos (localización superficie interior). (Constantinou, 2011)	64
Tabla 9: Coeficiente f_I para Aisladores circulares huecos (localización superficie exterior). (Constantinou, 2011).....	64
Tabla 10: Coeficiente f_I para Aisladores rectangulares con $K / G = 2000$. (Constantinou, 2011).....	65
Tabla 11: Coeficiente f_I para Aisladores rectangulares con $K / G = 4000$.	

(Constantinou, 2011).....	65
Tabla 12: Coeficiente f_1 para Aisladores rectangulares con $K / G = 6000$. (Constantinou, 2011).....	66
Tabla 13: Coeficiente f_1 para Aisladores rectangulares con $K / G = \infty$ (Materiales Incomprensibles). (Constantinou, 2011).....	66
Tabla 14: Coeficiente f_2 para Aisladores circulares. (Constantinou, 2011).....	67
Tabla 15: Coeficiente f_2 para Aisladores circulares huecos (localización superficie exterior). (Constantinou, 2011)	67
Tabla 16: Coeficiente f_2 para Aisladores circulares huecos (localización superficie interior). (Constantinou, 2011).....	67
Tabla 17: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = 2000$. (Constantinou, 2011).....	68
Tabla 18: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = 4000$. (Constantinou, 2011).....	68
Tabla 19: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = 6000$. (Constantinou, 2011).....	69
Tabla 20: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = \infty$ (Materiales Incomprensibles). (Constantinou, 2011).....	69
Tabla 21: Características del Proyecto.....	92
Tabla 22: Desplazamientos y giros en la base de la Estructura.	100
Tabla 23: Dimensiones de vigas y columnas del proyecto	128
Tabla 24: Reacciones para Cargas de Servicio	140
Tabla 24: Reacciones para Cargas de Servicio	141
Tabla 25: Reacciones para Cargas con Sismo de Diseño	142
Tabla 25: Reacciones para Cargas con Sismo de Diseño	143

Tabla 26: Reacciones para cargas con Sismo Máximo Considerado.....	143
Tabla 26: Reacciones para Cargas con Sismo Máximo Considerado.....	144
Tabla 27: Reacciones Máximas	145
Tabla 28: Desplazamientos y Rotaciones obtenidos del análisis de la estructura con aisladores sísmicos.....	155
Tabla 28: Desplazamientos y Rotaciones obtenidos del análisis de la estructura con aisladores sísmicos.....	156

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1: Diagrama para encontrar el factor Na. (UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON, 2013)	17
Cuadro 2: Diagrama para encontrar el factor Na. (UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON, 2013)	17

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de Subducción (IG EPN, 2010 - 2013).....	8
Figura 2: Zonificación Sísmica del Ecuador. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011).....	12
Figura 3: Espectro sísmico elástico de desplazamientos. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011).....	16
Figura 4: Ciudad de Puerto Príncipe, Haití 12 de febrero del 2010.....	19
Figura 5: Aisladores Sísmicos Elastoméricos en la base de una edificación.....	21
Figura 6: Tumba del Rey Ciro el Grande – Persia Pasargadae (503 A.C.).....	22
Figura 7: Partenón – Grecia (400 A.C.).....	22
Figura 8: Palacio Toprak-Kala – Asia Central - Uzbekistán (300 A.C.).....	23
Figura 9: Primer edificio con aisladores de goma.	23
Figura 10: Edificio con deslizadores.	24
Figura 11: Disipadores de Energía.....	24
Figura 12: Amortiguador de Masa Sintonizada.....	25
Figura 13: Puente los Caras aislado sísmicamente con FPS (FRICTION PENDULUM SYSTEM).....	26
Figura 14: Puente Norte (Esmeraldas) con Aisladores Elastoméricos FPS.....	26
Figura 15: Sistema de Un grado de libertad.	29
Figura 16: Ciclo de histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica.....	31
Figura 17: Esquema mecanismo de operación de sistemas activos.....	33
Figura 18: Representación de un sistema de control activo.....	34
Figura 19: Representación de un sistema de control semi – activo.....	36

Figura 20: Esquema mecanismo de operación de sistemas pasivos.	36
Figura 21: Comportamiento de una edificación sin aislación y con aislación sísmica.	38
Figura 22: Aislador tipo LDRB	40
Figura 23: Aislador tipo LRB.	41
Figura 24: Apoyo Deslizante plano (Universidad Católica Del Maule, CHILE).....	42
Figura 25: Aislador Sísmico FPS.	43
Figura 26: Ubicación de los Aisladores Sísmicos en una estructura	44
Figura 27: Modelo Bilineal de una unidad de Aislamiento	50
Figura 28: Formas y Dimensiones de una sola capa de goma.	53
Figura 29: Curva de Histéresis de un Aislador HDRB	59
Figura 30: Fases de Vuelco de un Aislador y relaciones de fuerza-desplazamiento laterales. (Constantinou, 2011).....	72
Figura 31: Área efectiva (Área reducida)	74
Figura 32: Elementos usados en el Procedimiento de Área reducida.	76
Figura 33: Diagrama de distribución de esfuerzos en la placa sin tensión en los pernos de anclaje.	77
Figura 34: Distribución de esfuerzos en la placa con tensión en los pernos de anclaje.....	78
Figura 35: Distribución de esfuerzos en la placa con tensión en los pernos de anclaje.....	79
Figura 36: Identificación de aisladores sísmicos elastoméricos.	87
Figura 37: Estructura a ser Aislada.....	88
Figura 38: Configuración de la estructura en planta.....	89
Figura 39: Configuración de la estructura en elevación.	89

Figura 40: Cargas verticales que actúan en cada columna.	90
Figura 41: Espectros de desplazamientos.	95
Figura 42: Diagrama de histéresis.	98
Figura 43: Ubicación de los nudos en la base de la estructura.	101
Figura 44: Dimensiones finales y Esquema interior del núcleo del Aislador.	110
Figura 45: Espectro de Desplazamientos.	115
Figura 46: Diagrama de Histéresis del Aislador LRB.	116
Figura 47: Dimensiones finales y Esquema interior del núcleo del Aislador.	127
Figura 48: Edificio a ser aislado.	129
Figura 49: Dimensiones en planta.	129
Figura 50: Dimensiones en Altura Pórticos 3-8 y Pórticos C-F.	130
Figura 51: Dimensiones en Altura Pórticos A-B y Pórticos G-H.	130
Figura 52: Dimensiones en Altura Pórticos 1-2.	131
Figura 53: Ubicación de los elementos estructurales en el edificio Vigas.	131
Figura 54: Ubicación de los elementos estructurales en el edificio Columnas.	132
Figura 55: Ventana de Inicio del Programa.	132
Figura 56: Ventana de Inicialización del nuevo modelo.	133
Figura 57: Ventana para definir y editar el sistema de grilla.	133
Figura 58: Grilla editada y generada.	134
Figura 59: Ventana para editar el material.	134
Figura 60: Ventana de edición y creación de las secciones.	135
Figura 61: Ventana de edición y creación de losas.	135
Figura 62: Ventana para definir los estados de carga.	136
Figura 63: Ventana para cargar los espectros de aceleraciones.	136
Figura 64: Casos de espectro de respuesta.	137

Figura 65: Combinaciones de carga.....	137
Figura 66: Dibujo del Proyecto.....	138
Figura 67: Asignación de Cargas a la Estructura.....	138
Figura 68: Análisis de la Estructura.....	139
Figura 69: Ventana de visualización de resultados.....	139
Figura 70: Reacciones en los apoyos.....	140
Figura 71: Ubicación de las reacciones por cargas de servicio.	145
Figura 72: Diagrama de histéresis.	148
Figura 73: Ventana para agregar elementos tipo LINK.....	150
Figura 74: Datos para crear un elemento tipo LINK.	151
Figura 75: Datos del aislador correspondientes a la dirección U1.	152
Figura 76: Propiedades del aislador correspondientes a las direcciones U2 y U3.	153
Figura 77: Procedimiento para asignar los aisladores.	153
Figura 78: Ventana para escoger y asignar el aislador modelado.....	154
Figura 79: Aisladores colocados en la Estructura.....	154
Figura 80: Obtención de desplazamientos de la estructura con Aisladores.....	155
Figura 81: Archivo con el ejecutable del programa.....	162
Figura 82: Ventana de Instalación el Programa ELASTOESPE.....	162
Figura 83: Ventana con archivos de Ejecución.	162
Figura 84: Acceso al programa mediante la plataforma de MATLAB.	163
Figura 85: Ventana de inicio del programa.	164
Figura 86: Ventana de ingreso del código y acceso a la plataforma de cálculo.	164
Figura 87: Ventana de la plataforma de cálculo.	165
Figura 88: Panel de datos iniciales.	166
Figura 89: Panel de Pre-dimensionamiento del Aislador.	167

Figura 90: Panel de Resultados de la Comprobación del Diseño del Aislador.	168
Figura 91: Panel de resultados gráficos.	169
Figura 92: Esquema del Prototipo con perno pasante (Auqui M. , 2010)	172
Figura 93: Esquema del perno pasante (Auqui M. , 2010).....	172
Figura 94: Curvas de Histéresis a frecuencias de 0,10 Hz y 0.30 Hz (Auqui M. , 2010).....	174
Figura 95: Prototipo con perno macizo vulcanizado (Auqui M. , 2010).....	174
Figura 96: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.10$ Hz. (Auqui M. , 2010).....	175
Figura 97: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.30$ Hz. (Auqui M. , 2010).....	175
Figura 98: Prototipo con resorte en el Núcleo. (Auqui M. , 2010).....	176
Figura 99: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.10$ Hz. (Auqui M. , 2010)	177
Figura 100: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.30$ Hz. (Auqui M. , 2010)	177
Figura 101: Aislador elastomérico proporcionado por ANDEC antes de ser Ensayado	178
Figura 102: Acople y Aislador elastomérico montados en la Máquina de Ensayos Universales	179
Figura 103: Falla presentada en el Aislador antes de ser ensayado.....	179
Figura 104: Placa de Anclaje con pernos para mejorar la adherencia con el caucho.	180
Figura 105: Distribución de caucho y acero en el Aislador.....	180
Figura 106: Esquema de la parte interna del aislador.....	181

Figura 107: Orificios en las placas de acero internas del Aislador.....	181
Figura 108: Varilla utilizada como separador entre las láminas de refuerzo 1 y 2.	182
Figura 109: Rotura presente en la lámina 2 de refuerzo.	182
Figura 110: Recubrimiento de las láminas de refuerzo.	183
Figura 111: Composición de la estructura interna del aislador.	184
Figura 112: Diagrama de histéresis del tercer Aislador.....	188
Figura 113: Placas base.....	199
Figura 114: Láminas de caucho.	199
Figura 115: Perforación de las láminas de refuerzo y colocación de una pega especial para el vulcanizado.	200
Figura 116: Limpieza de las placas base y colocación de una pega especial para el vulcanizado en las bases y el molde.	200
Figura 117: Colocación de las láminas de caucho y las placas de refuerzo alternadamente.....	201
Figura 118: Colocación del molde exterior y la capa de recubrimiento / colocación y fijación de la placa superior del aislador.	201
Figura 119: Aislador colocado en la prensa de vulcanizado / excedentes de caucho producto del vulcanizado.....	202
Figura 120: Aislador terminado.....	202

NOMENCLATURA

CAPITULO 2: PELIGROSIDAD SÍSMICA

S_d: Valor del desplazamiento en el espectro de desplazamiento.

z: Valor de aceleración.

T: Periodo en seg.

F_a, *F_d*, *F_s*: Factores de sitio.

T₀, *T_C*, *T_L*: Periodos limite usados en los espectros de Aceleración y desplazamiento.

N_a, *N_v*: Factores de cercanía

CAPITULO 3: SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

FPS: Friction Pendulum System (Aisladores de péndulo de Fricción).

m: Masa.

k: Rigidez.

c: Coeficiente de amortiguamiento viscoso.

x_g(t): Desplazamiento de suelo.

P(t): Carga en función del tiempo.

x_i(t): Posición inicial en función del tiempo.

x(t): Desplazamiento de la masa.

M \ddot{x} : Fuerza inicial de la masa de la edificación.

C \dot{x} : Amortiguamiento propio del sistema.

kx: Fuerza elástica del sistema.

Dx: Desplazamiento.

$\dot{x}dt$: Aceleración.

E_k: Energía cinética de la masa M.

\ddot{dx} : Aceleración.

E_d : Energía disipada por el amortiguamiento propio de la estructura.

E_S : Energía de deformación elástica del sistema.

E_I : Energía de las cargas dinámicas.

E_{IS} : Energía del sismo.

E_{IW} : Energía del viento.

$F_s(t)$: Respuesta elástica e inelástica hysterética.

E_{Ss} : Energía de deformación elástica no disipada.

E_{Sp} : Energía disipada por efectos hysteréticos de deformación plástica.

E_p : Energía obtenida por los disipadores y amortiguadores.

$f(t)$: Vector de excitación externa.

$u(t)$: Vector de las fuerzas de control.

D, E : Matrices de ubicación de las fuerzas de control y excitación.

G_x, G_v, G_f : Ganancias de control.

CAPITULO 4: AISLADORES SÍSMICOS

NRB: Natural Rubber Bearing (Aislador de goma natural)

LDRB: Low Damping Rubber Bearing (Aislador de goma de bajo amortiguamiento).

HDRB: High Damping Rubber Bearing (Aislador de goma de alto amortiguamiento).

LRB: Lead – Plug Rubber Bearing (Aisladores de goma con núcleo de plomo).

PTFE: Politetra Fluoro Etileno.

H: Altura de la estructura.

B: Lado menor en la base de la estructura.

CAPITULO 5: DISEÑO DE AISLADORES DE BASE SÍSMICOS ELASTOMÉRICOS.

k_e : Rigidez elástica.

K_p : Rigidez postfluencia.

Q : Fuerza característica.

K_{eff} : Rigidez efectiva.

D : Desplazamiento lateral del aislador.

D_y : Desplazamiento de fluencia.

F_Y : Fuerza de fluencia.

β_{eff} : Rigidez efectiva.

E_D : Energía disipada por el ciclo de histéresis.

k_H : Rigidez horizontal (kp).

G : Módulo de corte de la goma.

A : Área de la sección transversal del aislador.

T_r : Altura total de la goma.

γ : Deformación por cortante.

k_v : Rigidez vertical.

E_C : Módulo de compresión instantánea.

S : Factor de forma.

B : Lado mayor del rectángulo.

L : Lado menor del rectángulo.

t : Espesor de la goma.

D_e : Diámetro exterior del círculo.

D_i : Diámetro interior del círculo.

K : Módulo volumétrico de la goma.

F_{ys} : Fluencia del acero.

G_{LEAD} : Módulo de corte del plomo.

τ_{py} : Esfuerzo de corte del plomo.

f'_c : Resistencia característica a la compresión del hormigón.

P : Carga axial que actúa sobre el aislador.

T_D : Periodo objetivo.

g : Gravedad.

W : Combinaciones de carga (peso a aislar).

x, x_I : Variables utilizadas para representar las abscisas en el sistema cartesiano.

y, y_I : Variables utilizadas para representar las ordenadas en el sistema cartesiano.

F_{max} : Fuerza máxima.

A_{LEAD} : Sección transversal del plomo.

T_{eff} : Periodo efectivo.

$D + L$: Carga muerta + carga viva.

γ_c : Deformación por compresión.

γ_r : Deformación por rotación.

γ_s : Deformación por desplazamiento lateral.

f_1, f_2 : Coeficiente que se calcula en función del factor de forma y el módulo volumétrico de la Goma.

θ : Componente de rotación obtenido en el análisis de la estructura.

θ_{st} : Componente de rotación estático.

Δ : Desplazamiento obtenido en el análisis de la estructura.

P_{cr} : Carga crítica o carga de pandeo.

r : Radio de giro.

P'_{cr} : Carga de pandeo cuando el aislador se encuentra sometido a compresión y deformación lateral.

A_r : Área reducida.

D_{cr} : Desplazamiento crítico.

h : Altura del núcleo del aislador.

F_H : Fuerza horizontal.

k_1 : Rigidez elástica o rigidez inicial.

k_2 : Rigidez postfluencia.

t_s : Espesor de láminas de refuerzo.

b : Lado del área reducida rectangular equivalente.

f_b : Resistencia del hormigón en el apoyo.

M_u : Momento generado en el apoyo.

t_{es} : Espesor de las placas de montaje o placas de apoyo.

A_c : Área reducida de la sección del concreto.

T : Tensión.

P_u : Carga axial que actúa sobre el aislador obtenido para los diferentes estados de carga.

D_D : Desplazamiento de diseño.

D_M : Desplazamiento máximo.

B : Factor de reducción.

RESUMEN

Los sismos son la fuerza natural más destructiva del planeta y sus efectos alrededor del mundo dejan secuelas muy devastadoras. Desde las primeras civilizaciones hasta la actualidad se buscan formas de mitigar los efectos que estos causan a su paso, es así que los sistemas de protección sísmica nacen de esta necesidad y se comienzan a desarrollar desde finales del siglo XIX, hasta la actualidad. Actualmente existen tres tipos de sistemas de protección sísmica, sistemas activos, semi-activos y sistemas pasivos. El estudio de esta tesis se enfoca en estos últimos, específicamente en los sistemas de aislación con dispositivos elastoméricos, debido a la aceptación, los resultados que han presentado y el bajo costo frente a los sistemas activos y semi-activos. Se presenta una breve reseña histórica sobre la construcción de estructuras con protección sísmica, la incorporación de estos sistemas en el balance de energía y se establece una guía de diseño de aisladores elastoméricos, se muestra además la interacción con el programa de cálculo estructural ETABS en el diseño de los aisladores. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de las experiencias con Aisladores Sísmicos Elastoméricos fabricados en la Escuela Politécnica del Ejército.

Palabras Claves.

- Sismos
- Sistemas de Aislación.
- Aisladores Sísmicos.
- Aisladores Elastoméricos.
- Diseño de Aisladores.

ABSTRACT

Earthquakes are the most destructive natural force on the planet and its effects around the world leave very devastating consequences. From the earliest civilizations to the present are sought ways to mitigate the effects they cause in their wake, so that seismic protection systems are born from this need and begin to develop from the end of the century XIX, to the present.

Currently there are three types of seismic protection systems, active systems, semi-active and passive systems.

The study of this thesis focuses on the latter, specifically in systems with elastomeric isolation devices, due to acceptance, the results presented and the low cost compared to active systems and semi-actives.

It also shows a historical overview about the construction of structures with seismic protection , the incorporation of these systems in the energy balance and is set a design guide elastomeric isolators, it also shows the interaction with the program structural analysis ETABS in design of the isolators.

Finally it shows results of experiences with Isolators elastomeric Seismic made in the Army Polytechnic School.

Keywords

- Earthquakes
- Insolation Systems
- Seismic Isolators
- Elastomeric isolators
- Design of Isolators

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los últimos sismos en el mundo como el de Haití (2010), Chile (2010), Nueva Zelanda (2011), Japón (2011) y Turquía (2011), reflejan la vulnerabilidad de las estructuras ante este fenómeno natural que desde el principio de los tiempos acompaña a la humanidad y por el cual miles de vidas se han perdido alrededor del mundo.

El Ecuador al encontrarse en una de las zonas de peligrosidad sísmica más alta del mundo también se ha visto afectado por sismos devastadores como: los terremotos de Riobamba (1797), Ibarra (1868), Esmeraldas (1906), Ambato (1949), y Manabí (1998), por esta razón no se debe descartar la posibilidad de que pueda ocurrir un evento de las mismas características o de proporciones mayores.

De estos acontecimientos nace la necesidad de construir edificaciones sismo-resistentes e incorporar sistemas de protección sísmica, como lo hacen varios países a nivel mundial, como es el caso de Chile país pionero en la región en el uso de protección sísmica en sus edificaciones, las cuales se probaron en el sismo del 2010.

La aislación sísmica es un sistema de protección novedoso, muy eficaz, fácil de instalar y de bajo costo en relación al resto de sistemas de protección que existen en el mercado y una buena opción para comenzar a implementarlo en nuestro país.

1.2 ANTECEDENTES

La situación del Ecuador no es muy diferente a la del resto de países en vías de desarrollo, se experimenta un crecimiento rápido de la población y por ende una

urbanización intensa, lo que representa un crecimiento acelerado de las pérdidas causadas por un evento sísmico.

Si se toma como referencia al sismo de Chile en el 2010 y los daños que ocasionó y se los compara con el sismo de Haití en el mismo año, se puede ver la diferencia entre prepararse para enfrentar un evento de estas características y no hacerlo.

Al revisar los dos acontecimientos, se encuentra que el sismo de Haití tenía una magnitud mucho más baja que el de Chile, sin embargo fue suficiente para devastarlo y dejar grandes pérdidas humanas y económicas en este país.

La razón por la que Chile no quedó en las mismas condiciones que Haití, a pesar que el sismo fue de mayor magnitud, se debe a la incorporación de sistemas de protección sísmica en sus estructuras, y entre estos sistemas se encuentran los aisladores sísmicos.

Estos sistemas alrededor del mundo, se estudian y desarrollan desde finales del siglo XIX, sin embargo en un principio solo se los usaba en Estados Unidos, Europa y Asia.

En Latinoamérica la incursión en esta materia, comenzó hace unas décadas atrás, y los primeros países en Latinoamérica en usar estos sistemas fueron México y Chile.

El Ecuador al encontrarse en una región de alta peligrosidad sísmica, es muy propenso a registrar un evento de las mismas características o inclusive de mayor magnitud que el que enfrentó Chile; por esta razón se empezó a trabajar en alternativas que nos permitan prepararnos en caso de un sismo de magnitudes considerables, y lo primero que se realizó fue la reforma a la Normativa de Construcción.

A pesar de esto es necesario, comenzar a incursionar en el campo de los sistemas de protección sísmica y que mejor inicio que el emplear aisladores sísmicos, debido al bajo costo en relación con el resto de sistemas y la facilidad en su implementación.

En nuestro país existen estudios acerca de este tema, pero es necesario desarrollarlos y ponerlos en obra.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una guía para el diseño de aisladores sísmicos elastoméricos, con el fin de hacer entendibles los conceptos de diseño y aportar con un documento en español para el desarrollo y construcción de este sistema de protección sísmica.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un aislador sísmico elastomérico.
- Diseñar un acople para la máquina de ensayos universales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, para poder ensayar aisladores sísmicos elastoméricos.
- Ensayar un prototipo de aislador sísmico elastomérico que se encuentra en el Centro de Investigaciones Científicas de la ESPE (CEINCI) con el fin de analizar su comportamiento.
- Desarrollar un programa computacional para el diseño de Aisladores Sísmicos Elastoméricos.

- Mostrar el procedimiento de diseño de aisladores de base elastoméricos utilizando el programa de cálculo estructural ETABS.

CAPÍTULO 2

PELIGROSIDAD SÍSMICA

CAPÍTULO 2

PELIGROSIDAD SÍSMICA

2.1 INTRODUCCIÓN

La peligrosidad sísmica indica la probabilidad de ocurrencia de un determinado efecto de un sismo durante un cierto periodo de tiempo, también se considera como el elemento básico para la estimación del riesgo sísmico de una región.

Para calcular la peligrosidad sísmica de una zona es necesario conocer la sismicidad de la zona, sin esto no se puede hacer una buena estimación de la peligrosidad sísmica y sin una buena estimación de la peligrosidad sísmica es imposible realizar buenas medidas de prevención.

Para poder hacer un buen cálculo de la peligrosidad sísmica es necesario estudiar la influencia de los efectos locales de la zona, ya que estos influirán en el aumento de los grados de daños que se provocaran sobre las construcciones, vías de comunicación, instalaciones de gas, agua, etc.

2.2 ORIGEN DE LOS SISMOS EN EL ECUADOR

Los sismos que se manifiestan en nuestro país tienen su origen en:

- Las fallas geológicas.
- La subducción
- La actividad volcánica.

2.2.1 SISMOS ORIGINADOS EN LAS FALLAS GEOLÓGICAS

Dentro de los principales sistemas de fallas geológicas que atraviesan nuestro territorio se destacan el Sistema principal dextral de fallas, que atraviesa el territorio

desde el nororiente hasta el golfo de Guayaquil. Este sistema de fallas es el que originó la mayoría de los grandes terremotos que han azotado principalmente a la región Interandina. El otro sistema importante es el que se denomina fallas inversas, de las estribaciones de la Cordillera Real, donde se originó el primer gran terremoto conocido en el Ecuador (1541) y el sismo del 5 de marzo de 1987, entre otros.

2.2.2 SISAMOS ORIGINADOS POR LA SUBDUCCIÓN

El proceso de subducción (Figura 1) de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental de Sudamérica, es otra de las fuentes sísmicas en nuestro territorio. Estos sismos generalmente son superficiales en la plataforma submarina y en la costa continental y tienen profundidades mayores, conforme se adentran en el continente, de acuerdo al ángulo de la subducción. Los grandes sismos de Esmeraldas de 1906, 1958 y 1979, así como el sismo de Bahía de Caráquez del año 1998 ocurrieron en este sistema.

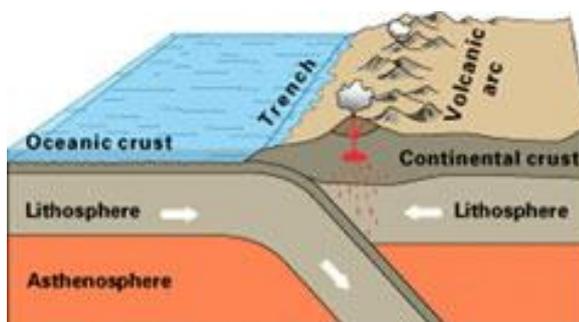


Figura 1: Proceso de Subducción (IG EPN, 2010 - 2013)

2.2.3 SISAMOS DE ORIGEN VOLCÁNICO

La energía de estos sismos no es suficiente para que se propaguen a grandes distancias ni para que causen daños. Así, la mayoría pasan inadvertidos por las personas. Estos sismos ocurren continuamente en los volcanes activos y como actividad premonitora de las erupciones. (IG EPN, 2010 - 2013)

En vista de que estos sismos tienen relación con los procesos eruptivos que se generan en la cámara magmática de los volcanes y por el ascenso de los materiales a través de la chimenea del volcán, la profundidad de los sismos de origen volcánico es superficial o muy leve. (IG EPN, 2010 - 2013)

2.3 SISMICIDAD HISTÓRICA DEL ECUADOR

La historia sísmica del Ecuador está llena de dolorosas experiencias, producto de grandes catástrofes que dejaron a su paso muerte y destrucción a nivel de todo el país. Si se toma en cuenta los temblores de pequeña magnitud que son detectados únicamente por los sismógrafos, el número de sismos que se registran en nuestro territorio pueden sumar decenas de miles por año. Dentro de esta gran cantidad de actividad sísmica, de tiempo en tiempo ocurren grandes terremotos, cuya historia se inicia en 1541. Hasta la actualidad, en un lapso de 458 años, el Ecuador ha soportado 37 terremotos de intensidad igual o mayor a VIII (Escala Internacional de Mercalli), grado a partir del cual, los efectos son de consideración. Y si se toma en cuenta los sismos a partir de la intensidad VI, (que es el grado desde el cual se presentan daños leves), hay que añadir 96 eventos que han causado daños desde leves hasta moderados. (IG EPN, 2010 - 2013)

Cuantificar las pérdidas materiales ocasionadas por estos terremotos es muy difícil, y en lo referente a las pérdidas de vidas, éstas superan las 80.000 muertes.

En la tabla 1 se presentan los eventos sísmicos ocurridos en el Ecuador cuya intensidad ha sido igual o mayor a VIII (escala de Mercalli).

Tabla 1: Tabla de Efectos causados por los terremotos con intensidad VIII o superior. (IG EPN, 2010 - 2013)

FECHA	DESCRIPCIÓN
1541/04/00	Destruído un pueblo de unas 60 casas en la falda oriental de la Cordillera Real. Sentido en Quito.
1587/08/31	En San Antonio de Pichincha y pueblos vecinos: gran destrucción. Grandes y profundas grietas por las que brotó agua negra y de mal olor. Más de 160 muertos
1645/03/15	Muchos temblores al comienzo de este año, sentidos en Quito y Riobamba, hasta febrero en que ocurre un terremoto que causó graves estragos en toda la comarca. El terremoto originó desprendimientos internos en el volcán Tungurahua. Innumerables réplicas. Muchos muertos.
1674/08/29	Destrucción de Chimbo y 8 pueblos circundantes.
1687/11/22	Gran terremoto en las provincias centrales. Destrucción de Ambato. Aproximadamente 7200 muertos. (J. De Velasco: 22.000 muertos; dato erróneo).
1698/06/20	Los daños materiales se extendieron desde el Nudo de Tiopullo hasta el Nudo del Azuay. Muertos: Ambato más de 3000; Latacunga aproximadamente 2000; en los pueblos de sus jurisdicciones se estimó unos 1500; en Patate alrededor de 200 y en Riobamba 100.
1736/12/06	Daños graves en casas e iglesias de Pujilí, Saquisilí y el resto de pueblos de la comarca.
1757/02/22	Gran terremoto de Latacunga y su jurisdicción. Destrucción de iglesias y casas en la ciudad y en los pueblos vecinos. Murieron más de 4000 personas.
1786/05/10	Terremoto en Riobamba. Graves daños en la ciudad y pueblos vecinos.
1797/02/04	Destrucción total de la Villa de Riobamba. El terremoto más destructivo en el territorio ecuatoriano y uno de los de mayor magnitud en toda su historia.
1834/01/20	Terremoto en la frontera Ecuador-Colombia. En Ecuador solo se conoce que los efectos fueron severos en Tulcán y se lo sintió fuertemente hasta Ibarra.
1859/03/22	Graves daños en edificios, iglesias y casas de Quito.
1868/08/15	Terremoto en la provincia del Carchi. Los mayores estragos se localizaron en la zona de El Ángel, Huaca, Tusa y El Chota.
1868/08/16	Gran terremoto de la Provincia de Imbabura.
1896/05/03	Destrucción parcial o casi total de construcciones en Bahía de Caráquez, Portoviejo y Canoa.
1906/01/31	Gran terremoto con epicentro en el Océano Pacífico, frente a las costas de la frontera Ecuador-Colombia. Se generó un tsunami de grandes proporciones.
1911/09/23	Violento sismo que causo estragos de consideración en varios cantones de la provincia de Chimborazo, donde el 90% de edificios y casas fueron afectados en mayor o menor cuantía.

FECHA	DESCRIPCIÓN
1913/02/23	Terremoto de consideración en el sur del país. Los mayores estragos entre Molleturo y Jesús María. Destrucción total de algunas viviendas en poblaciones de las provincias de Loja, El Oro y Azuay.
1914/05/31	Violento movimiento sísmico en la provincia de Pichincha, acompañado de ruidos subterráneos. Por el Sur sentido hasta Cuenca y por el Norte hasta Ibarra.
1923/12/16	Uno de los terremotos con mayores secuencias en la provincia del Carchi, hasta esa fecha. Murieron unas 300 personas, (con exageración se habló de 3000 víctimas).
1926/12/18	Terremoto en la frontera Ecuador-Colombia, que nuevamente asoló las poblaciones que resultaron afectadas con el terremoto de 1923.
1929/07/25	Casas de sectores rurales de la provincia de Pichincha, destruidas total o parcialmente.
1938/08/10	Terremoto en el Valle de los Chillos.
1942/05/14	Terremoto cuyos efectos se extendieron a la mayor parte de las provincias de la Costa y dos de la Sierra.
1949/08/05	Gran terremoto de Pelileo, ciudad que fue totalmente destruida. Área afectada: 1920 km ² . Muertos: 6000 (aproximado). Personas sin hogar: 100.000
1953/12/12	Terremoto en la frontera Ecuador-Perú. Los mayores efectos ocurrieron en la provincia ecuatoriana de Loja, especialmente en la ciudad de Gonzanamá.
1955/07/20	Terremoto en la provincia de Imbabura y Norte de Pichincha.
1958/01/19	Terremoto destructor en Esmeraldas. Colapso total de casas antiguas y parciales de construcciones nuevas y edificios.
1964/05/19	Sismo fuerte con epicentro en la provincia de Manabí, donde varias poblaciones resultaron muy afectadas.
1970/12/10	Terremoto con epicentro en la costa Norte del Perú, con serios efectos en el Sur del Ecuador, en especial en las provincias de Loja y El Oro, además de los departamentos fronterizos peruanos.
1987/03/06	Gran terremoto de la provincia de Napo, donde se presentaron los efectos más severos.
1995/10/02	Terremoto con epicentro en una zona despoblada de la cordillera de Cutucú. Grietas y deslizamientos de tierra.
1998/08/04	Terremoto de severas consecuencias en la provincia de Manabí. Gran destrucción de edificios en Bahía de Caráquez, Canoa, San Vicente y localidades cercanas.

2.4 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA NEC – 11

En la figura 2 se muestra el mapa de zonificación sísmica del Ecuador el cual fue propuesto en el 2011 en la Normativa Ecuatoriana de la Construcción.

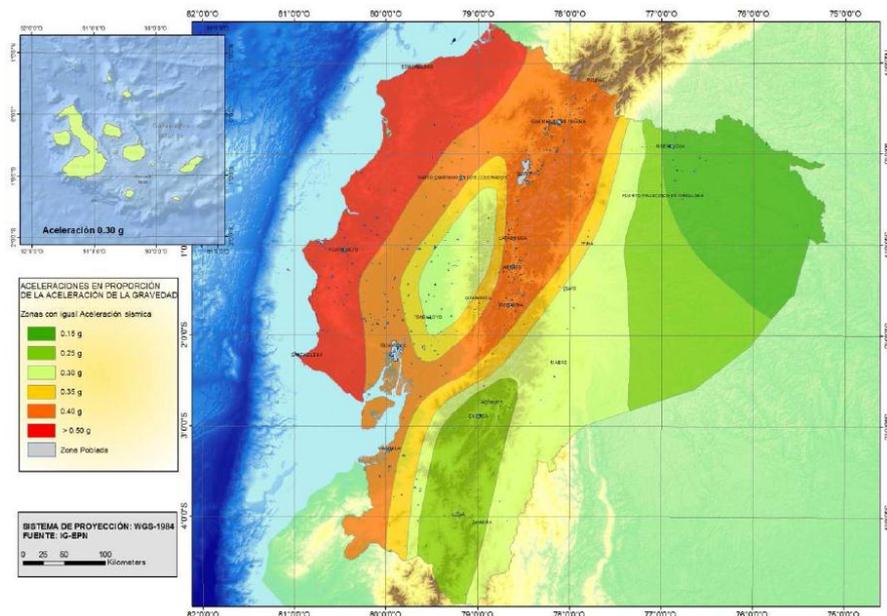


Figura 2: Zonificación Sísmica del Ecuador. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

El mapa que se muestra en la figura 2 se elaboró para que se reconozca que la principal fuente de generación de energía sísmica es la subducción de la Placa de Nazca dentro de la Placa Sudamericana, también se añade un complejo sistema de fallamiento local superficial que produce sismos importantes en gran parte del territorio de nuestro país.

El mapa de zonificación sísmica propuesto en la NEC-11 proviene del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años).

La zona de mayor peligrosidad sísmica se encuentra en el Litoral Ecuatoriano y se define por una aceleración sísmica en roca con un valor igual a 0.50g y marcada como zona VI y la menor peligrosidad se encuentra en la parte del oriente con un valor de 0.15g, en la tabla 2 se muestran los valores de Z en función de las zonas sísmicas.

Tabla 2: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización de la amenaza sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

2.4.1 FACTORES DE SITIO

Los factores de sitio o Coeficientes de Amplificación Dinámica de Perfiles de Suelo, son factores que permiten la amplificación de las ordenadas del espectro elástico.

La NEC-11, en el Capítulo 2, define a estos factores como **Fa** y **Fd**, y cuyos valores se consideran en función del tipo de suelo y la zona sísmica, estos valores se muestran en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3: Tipo de suelo y Factores de sitio Fa. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Tipo de perfil del subsuelo	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.5
Valor Z (Aceleración esperada en roca, g)						
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.15
E	1.8	1.5	1.4	1.28	1.15	1.05
F	*	*	*	*	*	*

Tabla 4: Tipo de suelo y Factores de sitio F_d. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

Zona sísmica		I	II	III	IV	V	VI
Tipo de perfil del subsuelo	Valor Z (Aceleración esperada en roca, g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.5
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C		1.6	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
D		1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
E		2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F		*	*	*	*	*	*

El factor **F_s**, considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos, los coeficientes para este factor se los muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo F_s. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

Zona sísmica		I	II	III	IV	V	VI
Tipo de perfil del subsuelo	Valor Z (Aceleración esperada en roca, g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.5
A		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C		1.0	1.1	1.2	1.25	1.3	1.45
D		1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.65
E		1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
F		*	*	*	*	*	*

Para los suelos tipo F la NEC-11 no proporciona valores, debido a que requieren un estudio especial, conforme a la sección 2.5.4.9 de dicha norma.

2.4.2 ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTOS.

La NEC-11 establece 4 ecuaciones para obtener el espectro elástico de diseño de desplazamientos S_d , el cual se define para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico igual a 0.05 (Figura 3):

$$S_d = 0.38 Z F_a T^2 \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \text{ para } 0 \leq T \leq T_0 \quad (2.1)$$

$$S_d = 0.38 Z F_a T^2 \quad \text{para } T_0 < T \leq T_c \quad (2.2)$$

$$S_d = 0.38 Z F_d T \quad \text{para } T_c < T \leq T_L \quad (2.3)$$

$$S_d = 0.38 Z F_d T_L \quad \text{para } T > T_L \quad (2.4)$$

Los valores de los periodos límite T_0 , T_c y T_L son:

$$T_0 = 0.10 F_S * \frac{F_d}{F_a} \quad (2.5)$$

$$T_c = 0.55 F_S * \frac{F_d}{F_a} \quad (2.6)$$

$$T_L = 2.4 F_d \quad (2.7)$$

Sin embargo, para los perfiles de suelo tipo **D** y **E**, los valores de T_L se limitarán a un valor máximo de 4 segundos en los espectros de desplazamientos.

La forma espectral y ecuaciones que definen el espectro de diseño elástico de desplazamientos consideran la respuesta dinámica y efectos de sitio (comportamiento no lineal del subsuelo, F_S y respuesta para cada zona geotécnica, F_a y F_d).

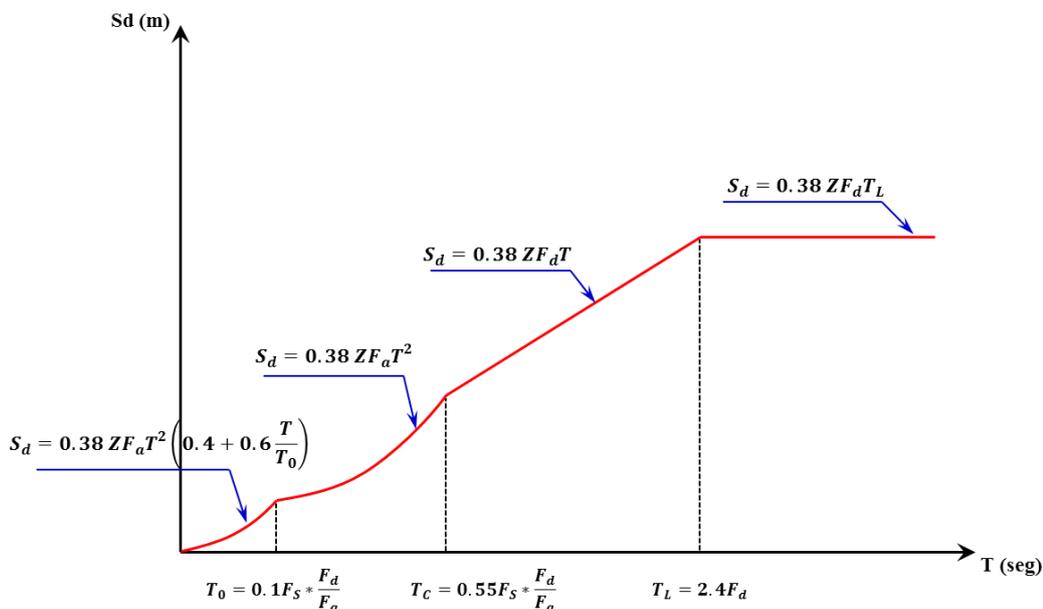


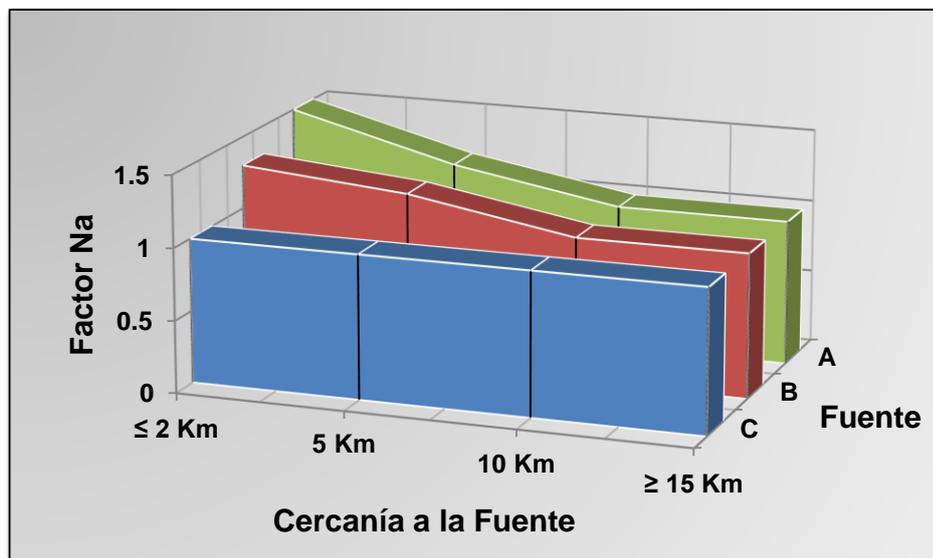
Figura 3: Espectro sísmico elástico de desplazamientos. (Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2011)

2.4.3 FACTORES DE CERCANÍA

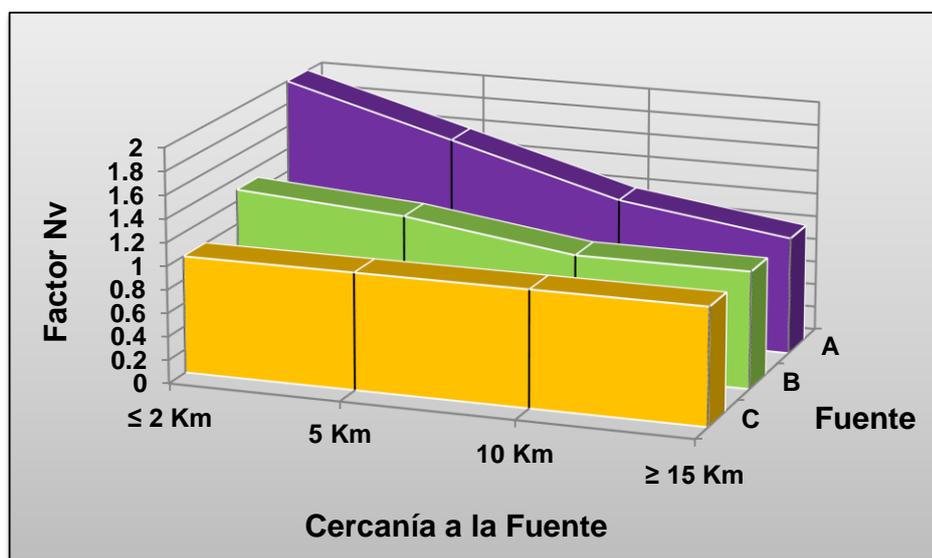
Para modelar la amplificación del movimiento del suelo a causa de los efectos de proximidad de la fuente se utilizan dos factores N_a y N_v , el primero se propone para un rango de periodo corto correspondiente al segmento de aceleración constante del espectro de respuesta, y el segundo factor, N_v , corresponde al rango de periodo medio o segmento en el cual la velocidad es constante en el espectro de respuesta, es el factor primario de proximidad a la fuente usado en la aplicación del aislamiento sísmico.

Los factores de aproximación a la fuente se encuentran en función del acercamiento a la fuente sísmica y el tipo de fuente, como se muestra en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1: Diagrama para encontrar el factor Na. (UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON, 2013)



Cuadro 2: Diagrama para encontrar el factor Nv. (UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON, 2013)



CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

CAPITULO 3

SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los sismos son eventos naturales potencialmente devastadores que se originan en el interior de la Tierra dando origen a vibraciones o movimientos del suelo; la causa principal de la mayoría de los sismos es la ruptura y fracturamiento de las rocas en las capas más exteriores de la corteza terrestre, producto de un proceso gradual de acumulación de energía. Este fenómeno amenaza las vidas de las personas, destruye propiedades e interrumpe los servicios que sostienen la vida y las funciones sociales (Figura 4).

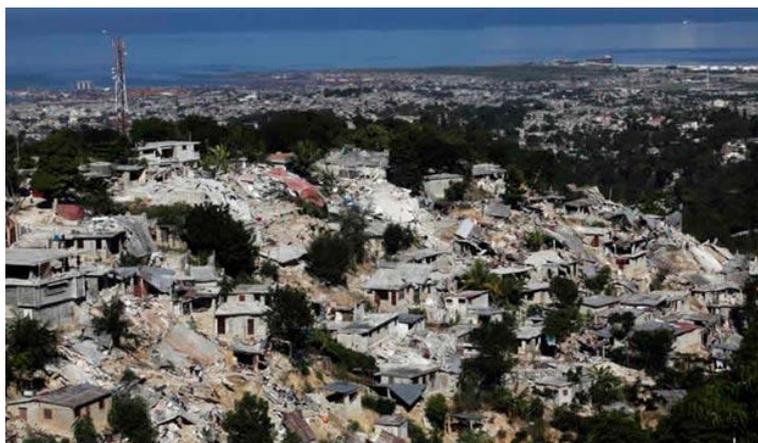


Figura 4: Ciudad de Puerto Príncipe, Haití 12 de febrero del 2010.

Históricamente, el diseño antisísmico se ha basado en una combinación de resistencia y ductilidad. Para perturbaciones sísmicas pequeñas y frecuentes, se espera que la estructura deba permanecer en el rango elástico, con todas las tensiones muy por debajo de los niveles de rendimiento, sin embargo, no es razonable esperar

que una estructura tradicional responda elásticamente cuando se somete a un terremoto de gran magnitud. Para esto el diseño se basa en la ductilidad inherente de los edificios para impedir un fallo catastrófico, aceptando al mismo tiempo un cierto nivel de daños estructurales y no estructurales. Esta filosofía ha llevado a la elaboración de códigos de diseño antisísmicos que ofrecen métodos de fuerza lateral como es el caso en nuestro país la NEC-11 (Norma Ecuatoriana de la Construcción). En última instancia, con estos planteamientos, la estructura está diseñada para resistir una carga equivalente estática, mejorando los resultados ante un eventual sismo, y aumentando la supervivencia de la estructura.

Sin embargo, si se tiene en cuenta la naturaleza dinámica real de las perturbaciones ambientales, nuevos e innovadores conceptos de protección estructural se estudian y se encuentran en diversas etapas de desarrollo a los cuales se los conoce como Sistemas de Protección Sísmica, y los cuales pueden ser divididos en tres grupos principales:

- **Sistemas Activos.**

- Amortiguamiento Activo de masa.
- Control de Fuerza (Tendón Activo).

- **Sistemas Semi - Activos.**

- Amortiguadores de masa semi-activos.
- Dispositivos de fricción con fricción controlable.
- Disipadores con fluidos electro o magneto-reológicos.

- **Sistemas Pasivos.**

- Sistemas de Aislación Sísmica de Base.
- Disipadores de energía.
- Efecto de masa adicional.

En la actualidad el sistema de protección sísmica que más se usa es el sistema pasivo y la técnica de aislamiento sísmico. Un sistema de aislamiento sísmico se coloca normalmente en la base de una estructura (Figura 5), por medio de su flexibilidad y capacidad de absorción de energía, el sistema de aislamiento refleja parcialmente y absorbe parte de la energía de entrada del sismo antes de que esta energía pueda ser transmitida a la estructura. El efecto neto es una reducción de la demanda de disipación de energía en el sistema estructural, lo que resulta en un aumento de su capacidad de resistencia.



Figura 5: Aisladores Sísmicos Elastoméricos en la base de una edificación.

3.2 HISTORIA DE LA PROTECCIÓN SÍSMICA

Desde el principio de los tiempos los sismos han atraído la atención y la preocupación de las personas y el interés por desarrollar sistemas que disminuyan la acción destructiva de los mismos. Este interés se lo puede apreciar a lo largo de la historia en varias estructuras las cuales se muestra a continuación:

Disipación de energía mediante bloques deslizantes contruidos sin mortero
(Figura 6).



Figura 6: Tumba del Rey Ciro el Grande – Persia Pasargadae (503 A.C.)

Edificio flexible, columnas deslizantes y oscilantes (Figura 7).

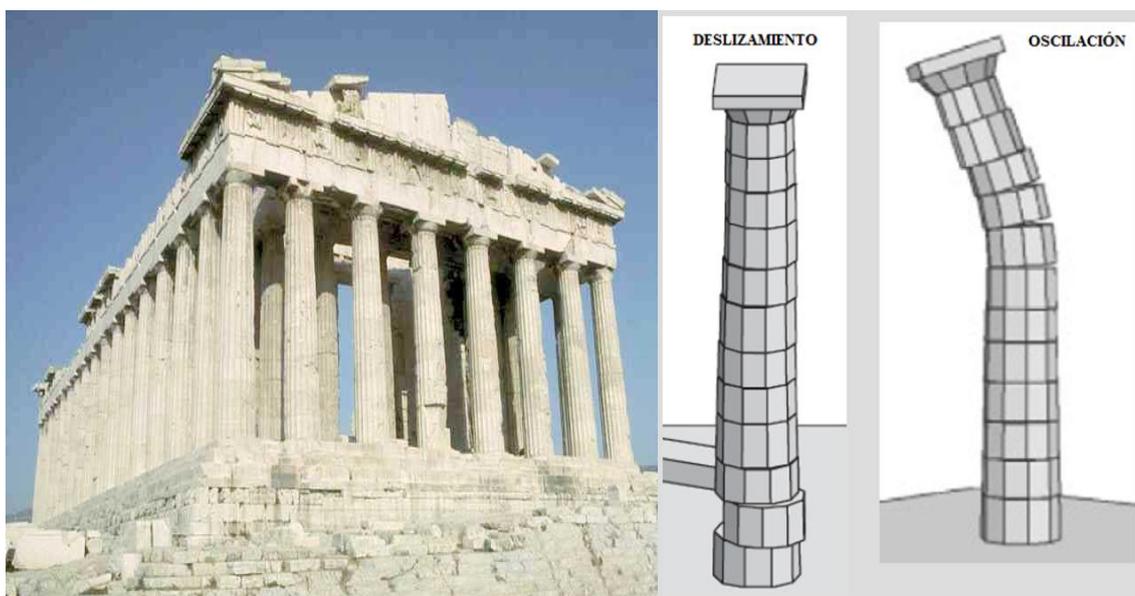


Figura 7: Partenón – Grecia (400 A.C.)

Edificio con muros de corte (Figura 8).



Figura 8: Palacio Toprak-Kala – Asia Central - Uzbekistán (300 A.C.)

A partir del final del siglo XIX y comienzos del siglo XX, los estudios por desarrollar mejores sistemas de protección sísmica se intensifican especialmente en Europa, Asia y Estados Unidos, como resultado se desarrollaron sistemas novedosos de disipación y aislamiento sísmico, como los Aisladores de base elastoméricos, FPS, deslizadores, disipadores de energía por fricción y fluido, masas concentradas etc., como ejemplo tenemos:

Escuela Pestalozzi, en Skopia – Macedonia 1969, (Figura 9).

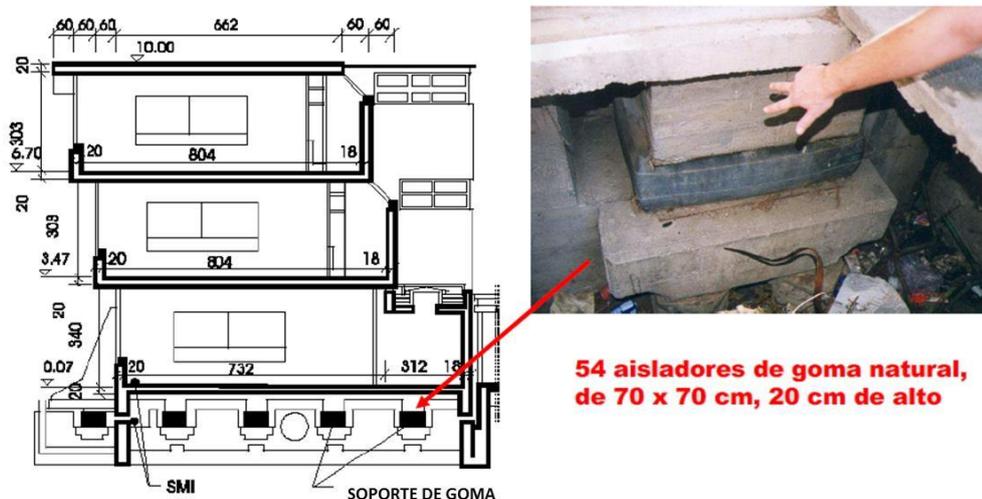


Figura 9: Primer edificio con aisladores de goma.

Instituto de Investigación de Obras Públicas – Japón 1998, (Figura 10).



Figura 10: Edificio con deslizadores.

En Latinoamérica tenemos la Torre Mayor en México (2003) Figura 11, considerada la estructura más fuerte del mundo y la primera en utilizar sistemas de protección sísmica en la región.

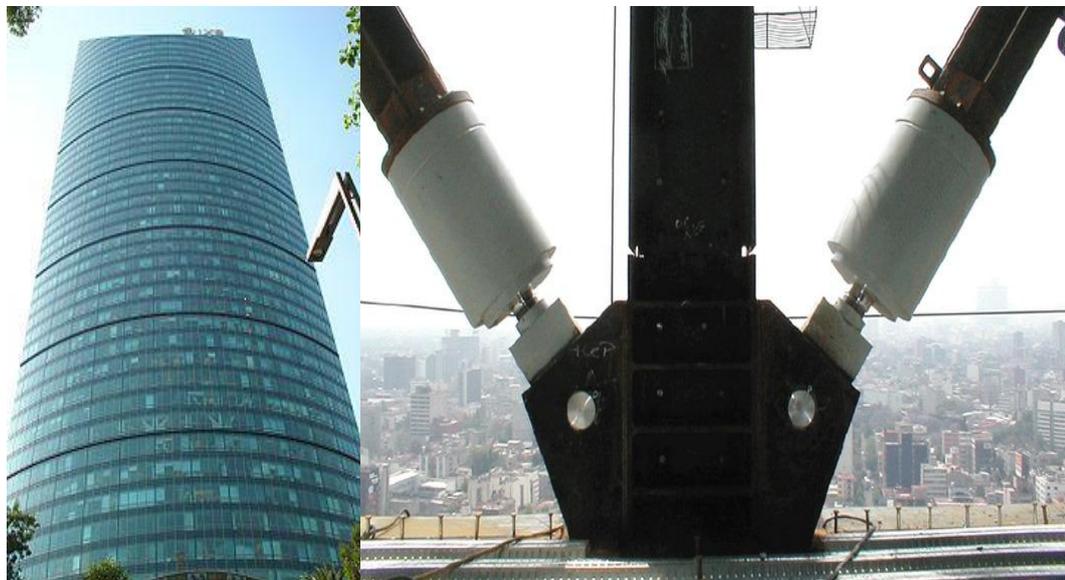


Figura 11: Disipadores de Energía.

El Taipéi 101 República de China 2004, (Figura 12).

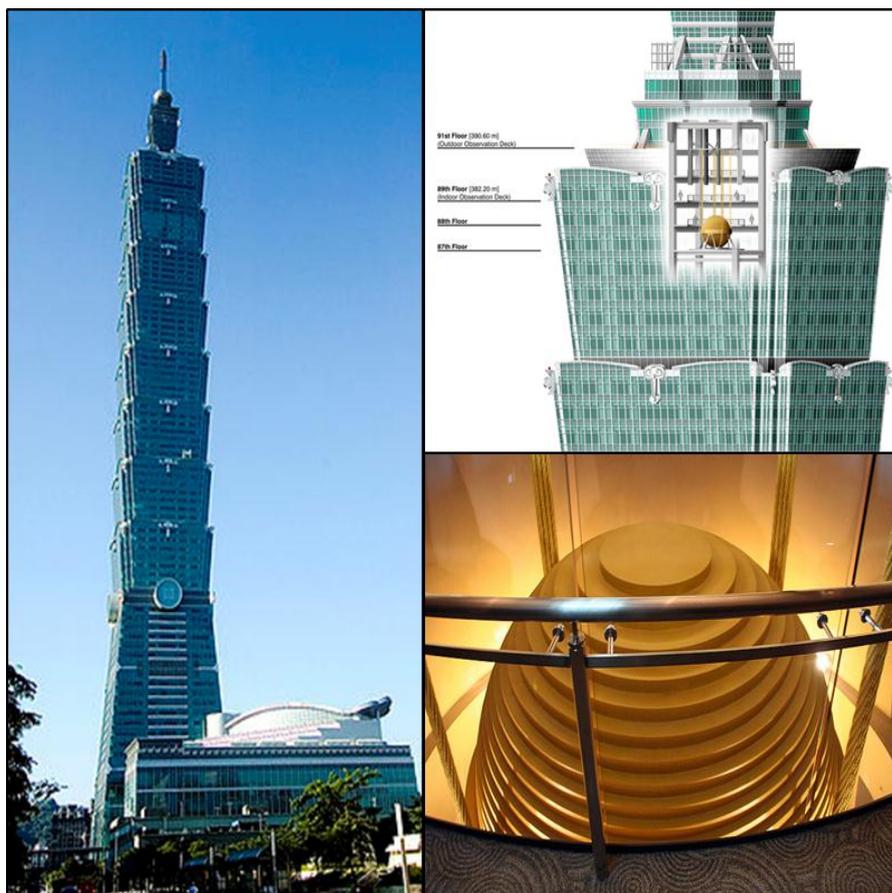


Figura 12: Amortiguador de Masa Sintonizada.

En el Ecuador se incursiona en el campo del aislamiento sísmico, con la construcción del puente los “Caras” en el 2007, considerado como el puente más largo del país con una longitud de 1980 m., se encuentra en la Provincia de Manabí, y une las poblaciones de Bahía de Caráquez y San Vicente; debido a que el puente se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico, se decidió apoyar el sistema de losa sobre aisladores sísmicos (FPS), los cuales consisten en elementos de última tecnología que permiten que las vigas y losas del puente soporten grandes desplazamientos, disipando la energía del sismo, esto hace que disminuyan notablemente las cargas laterales transmitidas a los elementos de cimentación, y

causen el menor daño posible lo que permite el funcionamiento continuo del puente (Figura 13).



Figura 13: Puente los Caras aislado sísmicamente con FPS (FRICTION PENDULUM SYSTEM)

En el 2010 sobre el estuario del río Esmeraldas se construyen cuatro puentes, los que permiten el acceso directo entre el sector de Tachina y la Ciudad de Esmeraldas, de los cuales en tres de ellos (Puente Norte 1, Puente Norte, Puente Sur), se incorporaron aisladores sísmicos tipo FPS (Figura 14)



Figura 14: Puente Norte (Esmeraldas) con Aisladores Elastoméricos FPS

3.2.1 ORÍGENES DE LOS CÓDIGOS SÍSMICOS.

“Las normas de construcción datan de 20 siglos antes de nuestra era con el código de Hammurabi, rey de Babilonia (1792 a.C. - 1750 a.C.), pero no fue hasta el siglo XX que los científicos aprendieron de las lecciones que dejan los sismos para que hoy se tengan modernos códigos de construcción sismo resistente.

A raíz del sismo de Mesina, Italia en 1908, una comisión compuesta por ingenieros civiles fue la encargada de analizar los efectos del sismo y proponer las medidas que consideraran convenientes para que en un supuesto evento similar en el futuro, los daños fueran menores. En 1909 la comisión recomendó que los edificios debieran diseñarse para una carga lateral equivalente a 1/12 del peso.

Posterior al sismo de Tokio, Japón en 1923, los ingenieros japoneses encontraron que los peores daños ocurrieron en los edificios de mampostería mientras que los de hormigón armado y madera habrían sufrido pocos daños. A raíz de varias discusiones se propuso los primeros conceptos de diseño sismo resistente: frente a las cargas sísmicas, un edificio debía comportarse tan cerca de lo que es un cuerpo rígido, como las circunstancias lo permitieran; se debía emplear plantas tan simétricas como fuera posible; se debía emplear paredes rígidas mientras fuera posible, manteniendo la continuidad de estos elementos desde la cimentación hasta la cubierta; las fuerzas sísmicas se repartían a las líneas de columnas en proporción a las rigideces del pórtico o sistema estructural.

En 1972 en los Estados Unidos, se produce el primer intento de normalización a raíz del sismo de Santa Bárbara. En 1933 ocurrió el sismo de Long Beach que motivó al gobierno a encargar a su División de Arquitectura la preparación de un reglamento de construcción. Este reglamento exigía, entre otras cosas, que los edificios de mampostería no reforzada se debían diseñar para resistir una carga lateral

igual al diez por ciento de la suma de la carga muerta y una porción de la carga viva. En 1974 el Consejo de Tecnología Aplicada, ATC, de California formó un grupo muy sólido de ingenieros y científicos que propusieron unas bases de normalización y apareció el documento "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings", conocido con el nombre de ATC-3-06. Este documento conformó las bases de la elaboración de un buen número de códigos modernos de construcción sísmo resistente en el mundo y de estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones existentes.

Los estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones existentes tienen su origen en las llamadas Técnicas de Screening durante la década de los 60s y 70s. Estas técnicas fundamentalmente trataban de cuantificar la resistencia de la estructura por aproximaciones, con el fin de determinar la capacidad existente ante cargas monotónicas. Algunos de estos métodos por lo tanto, fueron la base para posteriores métodos que para el caso sísmico, incluyeron estimaciones de la ductilidad y de desplazamiento lateral de la estructura. Entre estos ha existido una gran diversidad desde sus orígenes y a nivel mundial se han propuesto desde entonces métodos como el de Whitman, 1972; ATC-14, 1987; ATC-21, 1988; Grases, 1985; Iglesias, 1985; Okada T., Bresler B., 1976; Petrovski J., Milutinovic Z., 1985; entre otros.

3.3 CARACTERÍSTICAS.

Los sistemas de protección sísmica se basan en el concepto de Distribución de Energía, que consiste en distribuir las fuerzas sísmicas en tantos lugares como sea posible.

Con el fin de estudiar la respuesta de la estructura ante la imposición de cargas se utiliza un modelo matemático que se basa en la mecánica newtoniana. Para cargas o deformaciones aplicadas de una manera lenta, que es el caso de cargas muertas y vivas no dinámicas, las fuerzas inerciales pueden despreciarse, lo que hace posible un análisis estático de la estructura. Esta simplificación no se aplica cuando la estructura se somete a cargas dinámicas o deformaciones rápidas como las causadas por viento o sismo, en estos casos las fuerzas inerciales no son despreciables y se hace necesario un análisis dinámico.

Si se considera un sistema estructural idealizado en un modelo de un grado de libertad como el que se muestra en la figura 15, se realiza el análisis dinámico para obtener la respuesta del sistema.

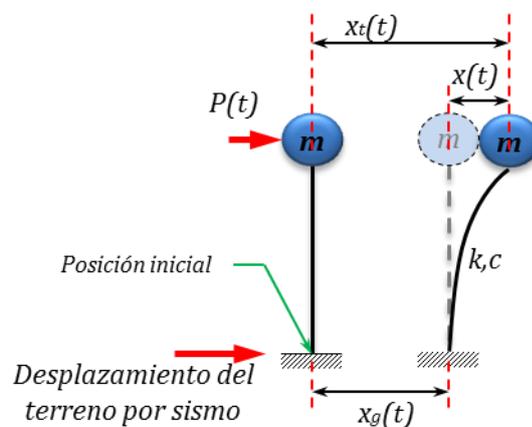


Figura 15: Sistema de Un grado de libertad.

El modelo consta de una masa concentrada m soportada por un elemento de rigidez k , con un coeficiente de amortiguamiento viscoso c propio del sistema. El sistema se somete a una carga sísmica caracterizada por un desplazamiento del suelo $x_g(t)$ y una carga $P(t)$ que puede ser o no dependiente del tiempo. La respuesta del sistema consiste en determinar el desplazamiento de la masa en cualquier instante con respecto a su posición inicial general $x_t(t)$. Este parámetro se calcula en función

del desplazamiento del terreno y del desplazamiento de la masa con respecto a su base:

$$x_t(t) = x_g(t) + x(t) \quad (3.1)$$

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

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = -M\ddot{x}_g + p \quad (3.2)$$

Dónde:

$M\ddot{x}$: representa la fuerza inercial de la masa de la edificación.

$C\dot{x}$: es el amortiguamiento inherente del sistema.

kx : es la Fuerza elástica del sistema.

Debido a que la ecuación de equilibrio dinámico se plantea en términos de fuerzas, éstas se multiplican por el desplazamiento **dx** , que se expresa como **$\dot{x}dt$** , que es una función de la velocidad, para encontrar el trabajo realizado. Al integrar la ecuación resultante respecto al tiempo de aplicación de la carga (sismo, viento u otras) se obtiene la ecuación de balance de energía que se desarrolla en el sistema estructural:

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (3.3)$$

Dónde:

$$E_K = \int M\dot{x}dx = \frac{M\dot{x}^2}{2} \quad \text{Es la energía cinética de la masa } \mathbf{M} \quad (3.4)$$

$$E_D = \int C\dot{x}dx = \int C\dot{x}^2 dt \quad \text{Es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura} \quad (3.5)$$

$$E_S = \int kx dx = \frac{kx^2}{2} \quad \text{Es la energía de deformación elástica del sistema;} \quad (3.6)$$

E_I : Es la energía impuesta por las cargas dinámicas.

$$E_I = E_{IS} + E_{IW} \quad (3.7)$$

Y

$$E_{IS} = - \int m\ddot{x}_g dx \quad \text{Es la energía impuesta por el sismo} \quad (3.8)$$

$$E_{IW} = \int P_{(t)} dx \quad \text{Es la energía impuesta por el viento} \quad (3.9)$$

En el caso de que el sistema alcance a responder en el rango inelástico de los materiales, en el término E_S se debe incluir y distinguir la participación de la estructura dentro del rango elástico y el inelástico. Esto se logra al introducir la función $f_s(x)$ que incluye la respuesta elástica y la inelástica histerética en el cálculo de la energía total proporcionada por la estructura, y queda como:

$$E_S = \int f_s(x) dx = E_{Ss} + E_{Sp} \quad (3.10)$$

Donde E_{Sp} es la energía disipada por efectos histeréticos de deformación plástica y daño de los elementos estructurales, y el término E_{Ss} es la energía de deformación elástica no disipada (Figura 16).

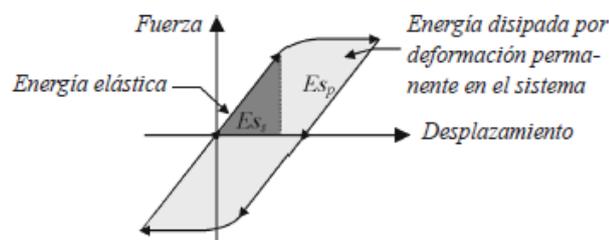


Figura 16: Ciclo de histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica

Cuando se utilizan dispositivos especiales, disipadores o amortiguadores de energía (dependientes de la velocidad, la deformación o la aceleración), se debe introducir un término en la ecuación 3.3 que permita distinguir la participación de estos dispositivos en el balance de energía, este término se identifica como E_p .

$$E_p = \int \Gamma \bar{x} dx \quad (3.11)$$

La contribución de la energía obtenida por los disipadores o amortiguadores se suma al lado izquierdo de la ecuación de balance de energía:

$$E_K + E_D + E_{SS} + E_{Sp} + E_p = E_I \quad (3.12)$$

Los sistemas de protección sísmica, tienen como objetivo aumentar la participación de los términos E_{Sp} , energía disipada por histéresis propia de la estructura, y E_p , energía disipada por dispositivos adicionales, al lado izquierdo de la ecuación 3.12. Debido al balance de energía, en la medida en que se aumente el término E_p , la disipación de energía por histéresis de la estructura disminuye y la participación de los componentes estructurales es menor, el nivel de daño en la estructura se reduce y se concentra en los dispositivos adicionales, que son elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar.

Otra forma de disminuir la disipación de energía por histéresis de la estructura, término E_{Sp} , consiste en modificar la energía de entrada al sistema, término E_I , al lado derecho de la ecuación.

3.4 CLASIFICACIÓN.

Los sistemas de Protección Sísmica se pueden clasificar según la forma como el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción y disipación. Se

conocen como sistemas de disipación de energía aquellos que aportan al término E_p en el balance de energía y se conocen como sistemas aisladores los que se enfocan a disminuir la energía de entrada al sistema estructural, término E_I .

En la ISO 3010 International Standard “Basis for design of structures Seismic action on structures” se plantea una clasificación, que consiste en tres sistemas: Sistemas Activos, Sistemas Semi - Activos y Sistemas Pasivos.

3.4.1 SISTEMAS ACTIVOS.

Son sistemas complejos que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. La Figura 17 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación. El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura se miden mediante sensores, principalmente acelerómetros, instalados en puntos estratégicos de la estructura. Un algoritmo de control procesa, también en tiempo real, la información obtenida por los instrumentos, y determina las fuerzas necesarias que deben aplicar los actuadores para estabilizar la estructura.

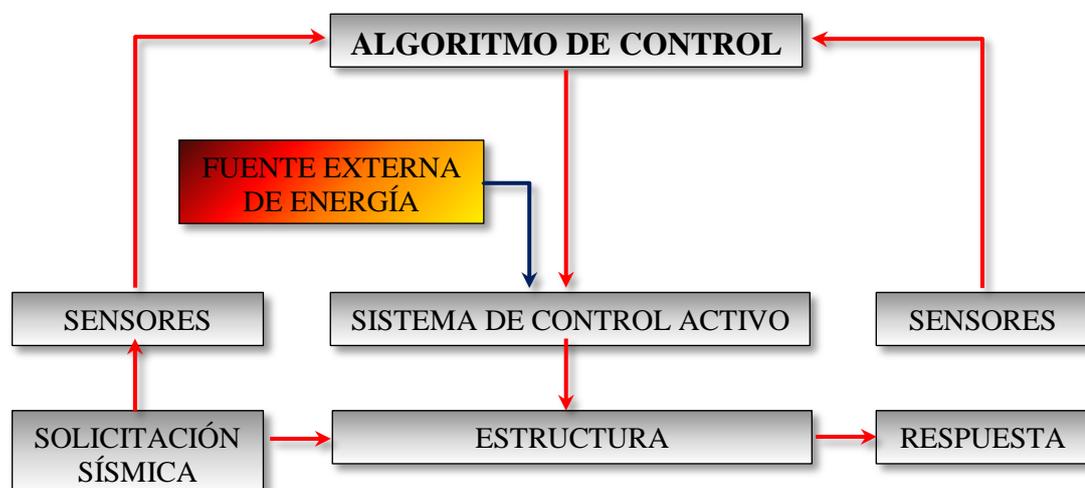


Figura 17: Esquema mecanismo de operación de sistemas activos.

Las fuerzas que estos sistemas utilizan son, generalmente, aplicadas por actuadores que actúan sobre masas, elementos de arrioste o tendones activos. Una de las principales desventajas, además de su costo, es que necesitan de una fuente de alimentación externa continua para su funcionamiento durante un sismo. No obstante, constituyen la mejor alternativa de protección sísmica de estructuras, ya que permiten modificar la respuesta de los dispositivos en tiempo real, lo que implica un mejor comportamiento de la estructura durante el sismo.

Estos sistemas se desarrollaron en Estados Unidos y en Japón, país que los usa principalmente, por la construcción de estructuras de gran esbeltez. La Figura 18 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistemas activos.

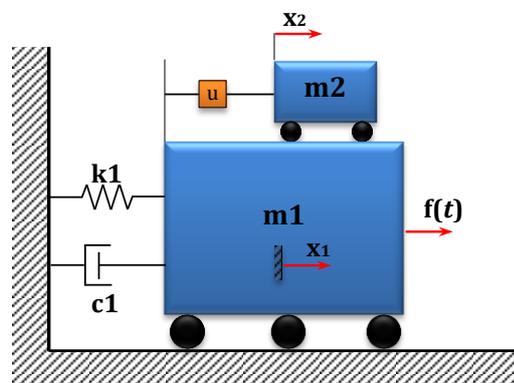


Figura 18: Representación de un sistema de control activo.

Para analizar el efecto de los sistemas de control activo en una estructura lineal bajo condiciones ideales, se considera una estructura modelada mediante un sistema discreto de N grados de libertad. La ecuación matricial de movimiento del sistema estructural se expresa mediante:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad (3.13)$$

Donde M , C y K son las matrices de dimensión $N \times N$ de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente; $x(t)$ es el vector de dimensión $N \times 1$ de desplazamiento

de la estructura; el vector $\mathbf{f}(t)$, de dimensión $N \times 1$, representa la excitación externa; y el vector $\mathbf{u}(t)$, de dimensión $N \times 1$, representa las fuerzas de control. Las matrices \mathbf{D} y \mathbf{E} , de dimensión $N \times N$, definen la ubicación en la estructura de las fuerzas de control y excitación, respectivamente. Al asumir que se usa una configuración de retroalimentación – proalimentación (feedback – feedforward), en la que la fuerza de control, $\mathbf{u}(t)$ es una función lineal de los desplazamientos $\mathbf{x}(t)$ y velocidades $\dot{\mathbf{x}}(t)$ de la estructura, y de la excitación $\mathbf{f}(t)$, el vector de la fuerza de control es de la forma:

$$u(t) = G_x x(t) + G_v \dot{x}(t) + G_f f(t) \quad (3.14)$$

Donde \mathbf{G}_x , \mathbf{G}_v y \mathbf{G}_f son las ganancias de control que pueden ser dependientes del tiempo. Al sustituir la ecuación 3.14 en la ecuación 3.13 se tiene:

$$M\ddot{x} + (C - DG_v)\dot{x} + (k - DG_x)x = (-M + DG_f)\ddot{x}_s \quad (3.15)$$

Al comparar la ecuación 3.15 con la ecuación 3.13, se observa que el control de retroalimentación tiene el efecto de modificar dos parámetros estructurales: rigidez y amortiguamiento, de modo que la respuesta de la estructura sea más favorable ante la excitación. El efecto del componente de proalimentación modifica la excitación.

3.4.2 SISTEMAS SEMI - ACTIVOS.

Al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural. Sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Estos sistemas actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de

disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semi – activos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro o magneto – reológicos. La Figura 19 muestra esquemáticamente una estructura protegida con un sistema semi – activo.

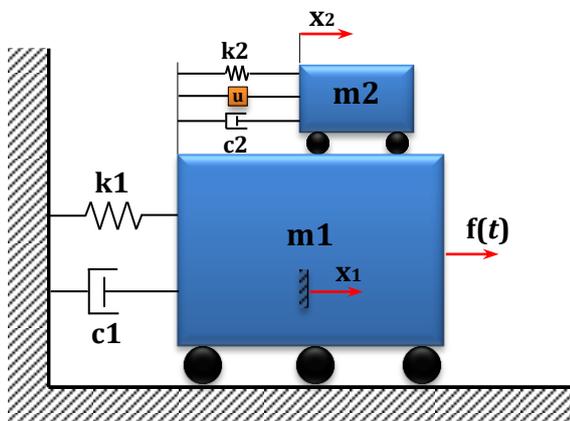


Figura 19: Representación de un sistema de control semi – activo.

3.4.3 SISTEMAS PASIVOS.

Son los sistemas que más se usan en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislación sísmica de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados para disipar energía por medio de calor. La Figura 20 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica pasivos.



Figura 20: Esquema mecanismo de operación de sistemas pasivos.

CAPÍTULO 4

AISLADORES SÍSMICOS

CAPÍTULO 4

AISLADORES SÍSMICOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El Aislamiento sísmico es una de las opciones más utilizadas en la actualidad como sistema de protección sísmica para las edificaciones, por el bajo costo y facilidad de implementación con relación al resto de sistemas como son los sistemas activos o semi-activos.

La característica fundamental de los sistemas de aislación es reducir la intensidad de la fuerza sísmica que ingresa a la estructura mediante la separación de la misma del suelo (Figura 21), aunque en ocasiones se pueden colocar aisladores en pisos superiores.

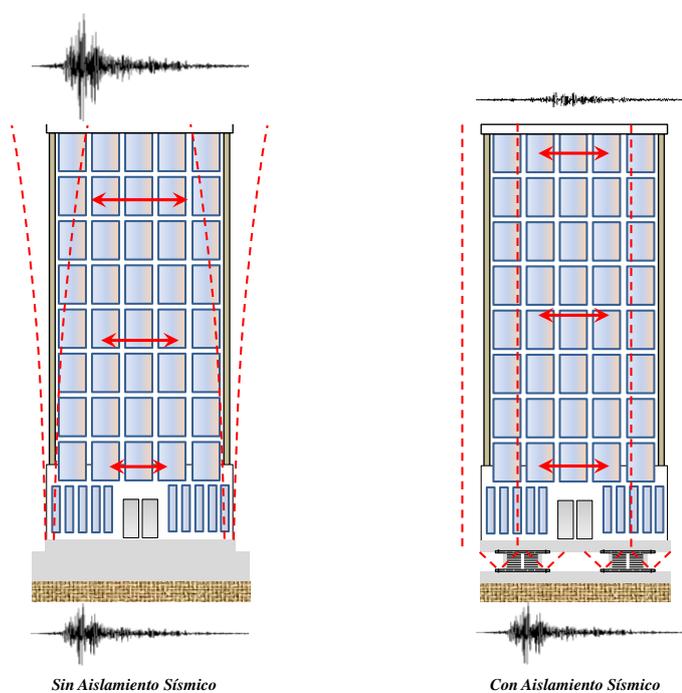


Figura 21: Comportamiento de una edificación sin aislación y con aislación sísmica.

La implementación de aisladores sísmicos permite reducir la rigidez del sistema estructural, esto hace que el periodo de vibración de la estructura sea aproximadamente tres veces mayor al periodo de la estructura sin aislación sísmica.

4.2 TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS

Los aisladores sísmicos que más se usan y se desarrollan son los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (con o sin núcleo de plomo) y los deslizantes o friccionales. A continuación se detallan brevemente las características generales de los aisladores en mención.

4.2.1 AISLADORES ELASTOMÉRICOS

Están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con láminas de acero. Las láminas de elastómeros son vulcanizadas a las capas de acero y, por lo general, presentan una sección circular o cuadrada. Mediante esta configuración se logra la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura aislada y el suelo. La rigidez vertical del sistema es comparable con la rigidez vertical de una columna de hormigón armado. El comportamiento de los aisladores elastoméricos depende de la amplitud de la deformación a la que son sometidos y, en menor grado, de la temperatura, el envejecimiento y la frecuencia del movimiento. Existen varios tipos de aisladores elastoméricos, entre ellos se tiene:

- Aisladores de goma natural (NRB, Natural Rubber Bearing).
- 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).

4.2.1.1 Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)

Son los dispositivos más simples dentro de los aisladores elastoméricos, presentan bajo amortiguamiento (2-5% como máximo), por lo que general se utilizan en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema. Estos dispositivos presentan la ventaja de ser fáciles de fabricar (Figura 22).



Figura 22: Aislador tipo LDRB

4.2.1.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo (LRB, Figura 23) son aisladores elastoméricos similares a los LDRB pero poseen un núcleo de plomo en el centro del aislador, que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 25-30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza.

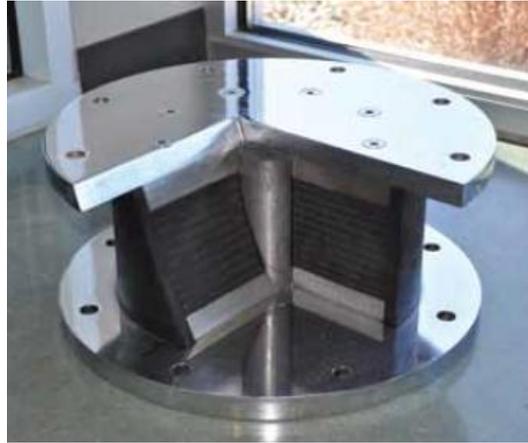


Figura 23: Aislador tipo LRB.

4.2.1.3 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Los HDRB son aisladores elastoméricos cuyas láminas de elastómeros son fabricadas con la inclusión de elementos como carbón, aceites y resinas, con el fin de aumentar el amortiguamiento de la goma hasta niveles cercanos al 10-15%.

Estos dispositivos presentan mayor sensibilidad a cambios de temperatura y frecuencia que los aisladores tipo LDRB y LRB. A su vez, presentan una mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabiliza luego del tercer ciclo de carga, al igual que los dispositivos tipo LRB, combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento, con la característica de ser, relativamente, de fácil fabricación.

4.2.2 AISLADORES DESLIZANTES

Los aisladores deslizantes o también llamados deslizadores friccionales utilizan una superficie de deslizamiento, típicamente de acero inoxidable, sobre la que desliza una placa de acero revestida de Politetra Fluoro Etileno (PTFE). La superficie de deslizamiento permite el movimiento horizontal de la estructura de manera independiente del suelo. Este sistema permite disipar energía por medio de las fuerzas de rozamiento que se generan durante un sismo. El coeficiente de fricción del

aislador depende de variables tales como la temperatura de trabajo, la presión de contacto, la velocidad de movimiento, el estado de las superficies de contacto (limpieza, rugosidad, etc.) y el envejecimiento. Adicionalmente, estos sistemas requieren de mayor mantención y cuidado, ya que cualquier modificación en las superficies deslizantes puede resultar en un coeficiente de fricción distinto al del diseño, entre estos se tiene: apoyos deslizantes planos y FPS.

4.2.2.1 Apoyos deslizantes planos

Consisten en dos superficies, una adherida a la estructura y la otra a la fundación, poseen un bajo coeficiente de roce, lo que permite movimientos horizontales. Poseen, generalmente, una capa de un material elastomérico con el fin de facilitar el movimiento del deslizador en caso de sismos. Por lo general, las superficies deslizantes son de acero inoxidable pulida espejo, y de un material polimérico de baja fricción. Este tipo de aislación puede requerir de disipadores de energía adicionales. A fin de prevenir deformaciones residuales luego de un evento sísmico, se debe proveer de sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos o con núcleo de plomo) que restituyan la estructura a su posición original. La Figura 24 muestra un esquema de un apoyo deslizante plano.



Figura 24: Apoyo Deslizante plano (Universidad Católica Del Maule, CHILE)

4.2.2.2 Péndulos friccionales (FPS, Friction Pendulum System)

Los péndulos friccionales (Figura 25), cuentan con un deslizador articulado que se ubica sobre una superficie cóncava, a diferencia de los apoyos deslizantes planos, cuentan con la característica y ventaja de ser autocentrantes, luego de un movimiento sísmico, la estructura regresa a su posición inicial gracias a la geometría de la superficie y a la fuerza inducida por la gravedad.

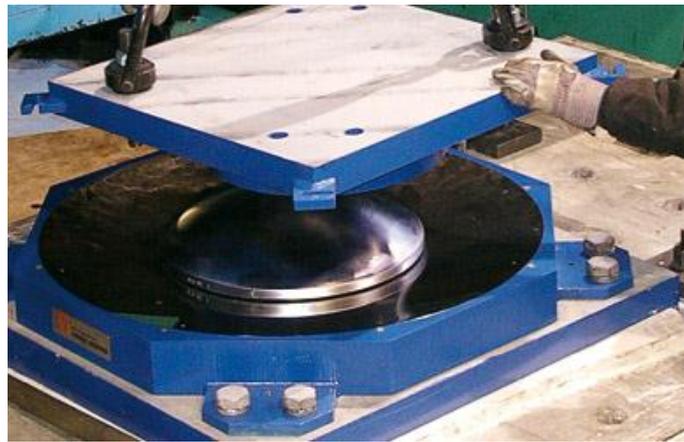


Figura 25: Aislador Sísmico FPS.

4.3 ASPECTOS ARQUITECTÓNICOS

Los aisladores sísmicos no representan una tarea compleja en términos de solución arquitectónica, en general, los dispositivos de aislación sísmica se instalan en las plantas bajas de los edificios, sobre las fundaciones, o entre el entrepiso del primer subterráneo y el primer piso de la estructura. Sin embargo, existen casos, donde se han instalado aisladores sísmicos en pisos superiores (Figura 26).

Los aisladores sísmicos generan una interfaz donde, en caso de sismos, se produce un gran desplazamiento horizontal relativo entre la estructura aislada y la no aislada o el suelo. Este desplazamiento, que suele estar en el rango entre 40 y 60 cm (o más), se debe considerar en el diseño de cañerías y ductos de servicios y redes distribuidas como agua, gas, electricidad, alcantarillado, etc., además de sistemas de

ascensores, escaleras, accesos al edificio y, en general, cualquier instalación, servicio o componente arquitectónico que cruce de la estructura aislada a la no aislada. Un espacio de similares dimensiones debe disponerse alrededor de la estructura a fin de prevenir el impacto de la estructura aislada con sectores no aislados de la estructura o estructuras adyacentes.

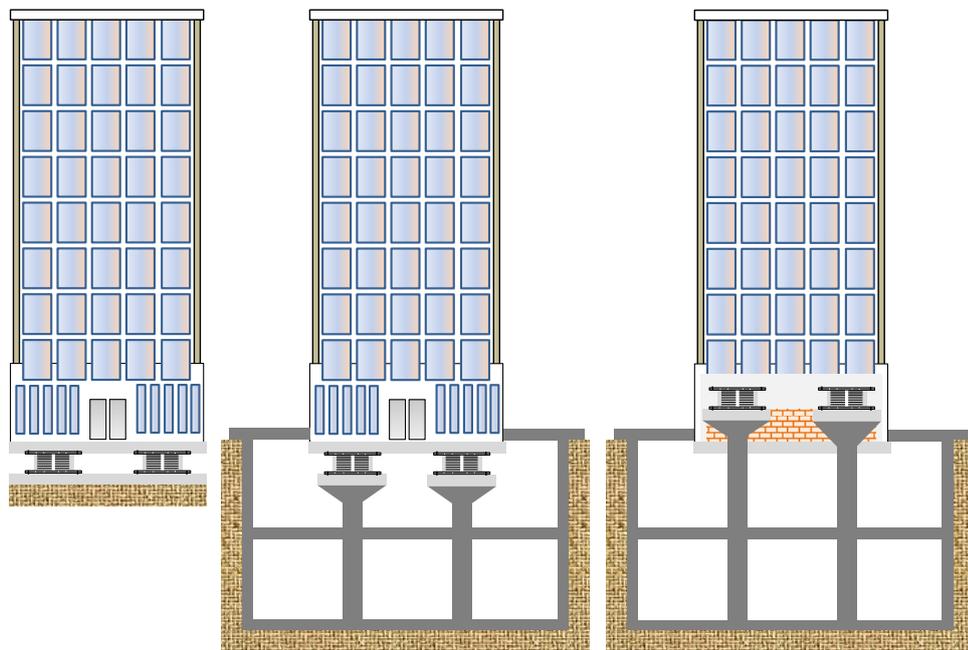


Figura 26: Ubicación de los Aisladores Sísmicos en una estructura

Los aisladores sísmicos deben instalarse en puntos de la estructura donde se los pueda inspeccionar, dar mantenimiento o reemplazarlos en el caso que se requiera.

Se recomienda considerar el uso de dispositivos de aislación sísmica desde las etapas iniciales del proyecto, a fin de mitigar el impacto de su incorporación en la arquitectura.

4.4 BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE USO

4.4.1 BENEFICIOS

- Actúan como filtro del movimiento sísmico, evitan que gran parte de la energía sísmica se traspase a la estructura aislada, lo que reduce los esfuerzos y por lo tanto, el daño producido a elementos estructurales, no estructurales y contenidos de los edificios.
- Mantienen a la Estructura completamente operable después de un evento sísmico.
- Minimiza los gastos por reparación en la Estructura.
- Brinda seguridad a los ocupantes de la Estructura aislada.

4.4.2 LIMITACIONES DE USO.

Si bien es cierto que los aisladores sísmicos representan una gran solución a la protección sísmica de la estructura también presentan ciertas limitaciones y se presentan a continuación:

- La principal limitación de uso es la altura de la edificación, se recomienda el uso de los aisladores en estructuras cuya relación de altura y base no sea mayor a 3.

$$\frac{H}{B} < 3 \quad (4.1)$$

- Otra limitación considerable que se debe tomar muy en cuenta es, el tipo de suelo en el cual se va a construir la edificación, esto se debe a que los aisladores proporcionan un mayor periodo a la estructura y por lo tanto si esta se construye en un suelo blando (suelo malo), por las características que estos suelos presentan, pueden filtrar las altas frecuencias generadas por el sismo y generar frecuencias que produzcan periodos largos como sucedió en 1985 en la ciudad de

México, en el cual las estructuras que resultaron afectadas e incluso que llegaron a colapsar fueron aquellas de más de 15 niveles (estructuras flexibles), mientras que los edificios como iglesias y otros que inclusive eran de época colonial no sufrieron daños tan severos. Esto se debió a que el periodo largo del suelo amplificó de manera indeseable los desplazamientos de las estructuras ya flexibles.

- El espacio en donde se va a construir la estructura aislada, debe ser el suficiente para que el desplazamiento de la estructura no afecte a otras obras aledañas.

4.5 CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA EN EL USO DE AISLADORES

Uno de los factores importantes que predominan en el uso de sistemas de aislación es el factor económico, por lo tanto a continuación se presenta una serie de costos y beneficios que se deben considerar al evaluar económicamente la instalación de aisladores sísmicos. Estos aspectos varían de acuerdo al tipo de aislación que se instale y las características de cada proyecto.

Costos:

- Costo de los dispositivos.
 - Costos del proyecto de aislación.
 - Costos de fabricación y ensayo de prototipos y aisladores de obra.
 - Costos de instalación. Costos directos (insertos, anclajes, etc.) y gastos generales por aumento de plazos.
 - Costo de protección al fuego de los dispositivos (en caso que se requiera).
 - Costo del sistema de conectores flexibles en las instalaciones y juntas de dilatación.

- Costo del diafragma adicional requerido por sobre el nivel de aislación y columnas de gran dimensión o envigados por debajo del sistema de aislación.
- Costos de la súper y subestructuras requeridas para alcanzar objetivos de desempeño compatibles con los provistos por el sistema de aislación.
- Costos de mantención e inspección.
- Costo de proveer un espacio físico adicional para la instalación de los aisladores.

Beneficios:

- Mantienen la estructura operativa durante e inmediatamente después de un evento sísmico.
- Disminución de los costos de reparación de daños, luego de eventos sísmicos severos, dado que se reducen:
 - Daños de componentes y sistemas no estructurales.
 - Daños estructurales.
- Menores daños de contenidos no estructurales.
- Beneficio para el diseñador y constructor de la obra, ayuda en su reputación al diseñar o construir una estructura segura.
- Percepción de mayor seguridad por parte del usuario.

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE AISLADORES DE BASE SÍSMICOS

ELASTOMÉRICOS

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE AISLADORES DE BASE SÍSMICOS

ELASTOMÉRICOS

5.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de aisladores de base, comprende un proceso iterativo, en el cual se involucran parámetros que se obtienen en el laboratorio, los cuales varían para cada uno de los diferentes tipos de aisladores elastoméricos, sin embargo se pueden realizar ciertas suposiciones que permitan que se pueda llegar a realizar un diseño.

Para poder comenzar con el diseño, es muy importante seleccionar el tipo de aislador a utilizar, ¿Pero cómo saber qué tipo de aislador emplear?, esto depende del criterio de cada uno, saber utilizar las ventajas y evitar las debilidades de cada uno de los diferentes tipos de aisladores que existen.

También es muy importante conocer el número de aisladores a utilizar y el peso que se va a aislar, este último dato se lo obtiene del análisis de cargas que se realiza previamente, para ello es fundamental que la obra se encuentre en un punto en el cual los posibles cambios a realizarse sean mínimos y no alteren de forma significativa el análisis de cargas realizado previamente.

El desplazamiento al cual vayan a ser sometidos, es otro factor y quizá el más importante, debido a que la capacidad de los aisladores depende de este.

5.2 MODELO BILINEAL

Es un modelo matemático el cual se emplea en la investigación, para el estudio de los aisladores sísmicos, este modelo se lo utiliza debido a que caracteriza

adecuadamente las propiedades mecánicas tanto de aisladores elastoméricos como aisladores de fricción.

La determinación de un modelo bilineal se inicia con la definición de tres parámetros básicos, según las propiedades de cada tipo de aislador, y se emplean ecuaciones específicas para calcular cada uno de estos.

Los parámetros que podemos identificar y que reflejan las características mecánicas y suministran una estimación satisfactoria del comportamiento no lineal de un aislador se los menciona a continuación y se los muestra en la figura 27:

- Rigidez Elástica k_e
- Rigidez Postfluencia k_p
- Fuerza Característica Q

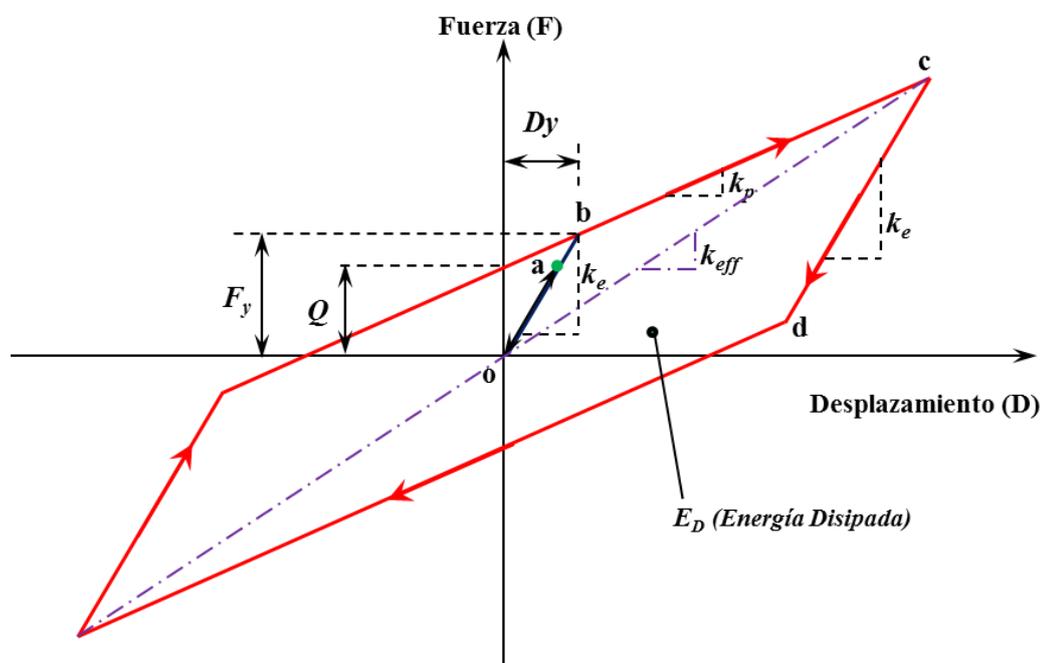


Figura 27: Modelo Bilineal de una unidad de Aislamiento

En el gráfico se encuentran las siguientes relaciones: \overline{oa} se define como la relación lineal entre el cortante y el desplazamiento lateral cuando se comienza a aplicar una fuerza cortante al aislador, una vez que el cortante llega al punto **b**

comienza la fluencia en el aislador, por encima de este punto se producen grandes desplazamientos con pequeños incrementos en el cortante, k_p se define como la rigidez Postfluencia; c es el punto en donde se inicia la trayectoria de descarga \overline{cd} , que tiene la misma rigidez inicial de \overline{oa} . El valor de cortante de \overline{cd} es igual a $2F_y$, F_y es la fuerza de fluencia; después del punto d , la trayectoria de descarga es paralela a \overline{bc} con la misma magnitud de k_p .

La rigidez efectiva k_{eff} puede ser expresada en términos de rigidez postfluencia k_p y la fuerza característica Q con el correspondiente desplazamiento lateral D en la región de postfluencia de la siguiente manera:

$$K_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (5.1)$$

El desplazamiento de fluencia D_y , también se deriva de k_p , k_e y Q .

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \quad (5.2)$$

La fuerza de fluencia F_y , en el desplazamiento de fluencia D_y se determina a través de la siguiente ecuación:

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (5.3)$$

El amortiguamiento efectivo β_{eff} se define como:

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (5.4)$$

Se define E_D como la energía disipada por ciclo, E_D es considerada como el área del ciclo de histéresis, limitada por el desplazamiento lateral $-D$ y en cada ciclo de la siguiente manera:

$$E_D = 4Q(D - D_y) \quad (5.5)$$

Por lo tanto:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5.6)$$

5.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.

La característica mecánica más importante de estos aisladores es la rigidez horizontal representada por k_H y se define por la siguiente ecuación:

$$k_H = \frac{GA}{T_r} \quad (5.7)$$

Dónde:

G = Módulo de cortante del elastómero.

A = Área de la sección transversal.

T_r = Espesor total de la goma.

El máximo desplazamiento horizontal D se relaciona a la máxima deformación por cortante a través de:

$$\gamma = \frac{D}{T_r} \quad (5.8)$$

La rigidez vertical k_V está dada por la siguiente ecuación:

$$k_V = \frac{E_c A}{T_r} \quad (5.9)$$

Dónde:

A = Área de la sección transversal.

T_r = Espesor total del caucho.

E_C = Módulo de compresión instantánea del compuesto de goma – acero bajo el nivel específico de carga vertical.

El valor de E_C para una sola capa de goma está controlado por el factor de forma S el cual se puede definir como:

$$S = \frac{\text{Area cargada}}{\text{Area libre de fuerzas}} \quad (5.10)$$

Para el cálculo del factor S se emplean diferentes ecuaciones en función de la geometría del aislador como se muestra a continuación (figura 28):

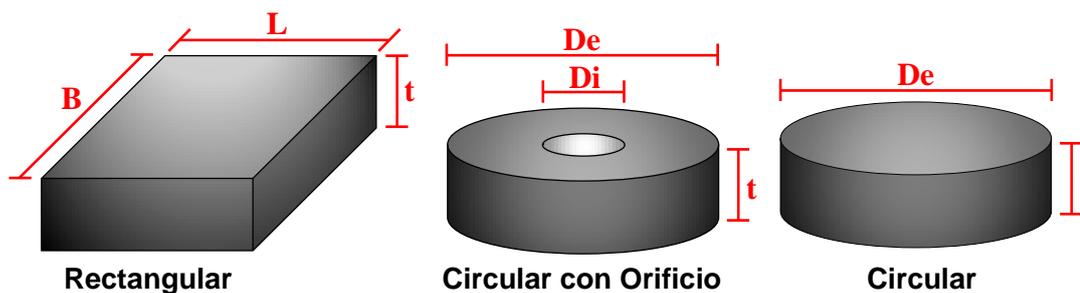


Figura 28: Formas y Dimensiones de una sola capa de goma.

A continuación se muestran las ecuaciones que se aplican para las formas mostradas en la figura 5.2.

- ***Aislador Rectangular***

$$S = \frac{BL}{2(B+L)t} \quad (5.11)$$

- ***Aislador Cuadrado***

$$S = \frac{L}{4t} \quad (5.12)$$

- *Aislador Circular*

$$S = \frac{D_e}{4t} \quad (5.13)$$

- *Aislador Circular Agujerado*

$$S = \frac{D_e - D_i}{4t} \quad (5.14)$$

El módulo de compresión E_C de acuerdo a la *Seismic Rehabilitation Comentary de FEMA – 274* se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$E_C = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

5.4 DISEÑO

El diseño es un proceso iterativo en el cual, se debe ajustar las dimensiones del aislador en función de las necesidades de cada proyecto. Para ello esta etapa se la divide en dos procesos:

- Cálculo y Dimensionamiento Previo conocido también como pre-dimensionamiento.
- Y el Diseño y Comprobación; este proceso es el diseño en sí.

Para esto es necesario que el proyecto se encuentre en una etapa madura, en la cual los cambios a realizarse dentro de la obra sean mínimos y que no afecten significativamente a los datos que se entregan para el diseño de los aisladores.

5.4.1 CÁLULO Y DIMENSIONAMIENTO PREVIO

El pre-dimensionamiento es una etapa del proceso de diseño en el cual se establecen las diversas características y dimensiones del aislador con el fin de establecer los parámetros necesarios que se necesitaran en el diseño posterior.

A continuación se muestran los pasos para realizar un pre-diseño de un aislador elastomérico.

1. Conocer las Características del Proyecto.

A partir de este punto se arranca con todo el proceso tanto de Pre-diseño y posterior Diseño, cualquier cambio que se genere en el proyecto afectaría directamente en el diseño del Aislador.

Dentro de las características del proyecto que debemos conocer están:

- Planos del Proyecto.
- El peso que se va a aislar.
- Numero de aisladores a Utilizar.
- Desplazamiento de Diseño.
- Desplazamiento Máximo.
- Periodo Objetivo.
- Resistencia del Hormigón sobre el cual serán colocados los aisladores.

2. Escoger el tipo de Aislador a Utilizar.

No existe una guía o una norma que indiquen como escoger el tipo de aislador que se debe utilizar, por lo tanto el tipo de aislador a emplearse dependerá del criterio de cada proyectista; sin embargo pueden ser de mucha utilidad al momento de escoger el tipo de Aislador el saber aprovechar los beneficios de cada aislador y

evitar sus debilidades y otra alternativa para escoger sería también el costo de cada uno de ellos.

En el capítulo 4 se dieron a conocer los tipos de Aisladores que existen y sus respectivas características.

3. Establecer las Propiedades de los Materiales del Aislador a Diseñar.

Después de definir el tipo de Aislador, se debe establecer las propiedades de los materiales a emplear en el diseño a continuación se enumeran las propiedades que se deben considerar de acuerdo al tipo de Aislador:

- *Aisladores Elastoméricos de bajo amortiguamiento, alto amortiguamiento y con núcleo de plomo.*
 - *K: Módulo Volumétrico de la Goma.*
 - *G: Módulo de Corte de la Goma.*
 - *F_{ys}: Esfuerzo de Fluencia del Acero.*
- *Aisladores con núcleo de plomo.*
 - *G_{LEAD}: Módulo de Corte del Plomo.*
 - *τ_{py}: Esfuerzo de Corte del Plomo.*

4. Establecer una Geometría Inicial.

Es necesario definir la forma del Aislador que se quiere diseñar para poder establecer sus dimensiones; en base a la geometría deseada se establecen las ecuaciones a continuación:

- **Área del Aislador.**

$$f'_c \geq \frac{P}{A} \quad (5.16)$$

Dónde:

f'_c = Resistencia del Hormigón

P = Carga que soportara el aislador

A = Área del Aislador

Despejando A de 5.16:

$$A \geq \frac{P}{f'_c} \quad (5.17)$$

Para encontrar las dimensiones se puede emplear las fórmulas respectivas para el cálculo de áreas de acuerdo a la geometría escogida así:

Aislador Cuadrado:

$$L = \sqrt{A} \quad (5.18)$$

Aislador Rectangular:

$$L = \frac{A}{B} \quad (5.19)$$

Aislador Circular:

$$D_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.20)$$

Aislador Circular con agujero en el centro:

$$\frac{D_e}{10} \leq D_i \leq \frac{D_e}{5} \quad (5.21)$$

De la ecuación anterior se toma una media para el D_i :

$$D_i = \frac{D_e}{5} \text{ o } D_i = \frac{D_e}{10} \quad (5.22)$$

$$D_e = 8 * \sqrt{\frac{A}{15\pi}} \quad (5.23)$$

De las ecuaciones anteriores se tiene:

L = Lado del Aislador.

B = Lado del Aislador el cual podemos asumir en caso de aislador rectangular.

D_e = Diámetro exterior en Aislador Circular.

D_i = Diámetro interior en Aislador Circular con agujero.

▪ ***Altura total de las Gomas (T_r).***

Es una dimensión que se impone al igual que el espesor de las láminas de caucho y el espesor de las láminas de acero de refuerzo, estos valores se revisan posteriormente, si no cumplen se debe tomar un nuevo valor y repetir el proceso.

Para encontrar el número de capas de goma a utilizar se impone un espesor t y se divide para el espesor total así:

$$\text{No. de capas de goma} = \frac{T_r}{t}$$

El número de capas de acero de refuerzo será igual al número de capas de goma menos 1.

$$\text{No. de capas de Acero} = \text{No. de capas de goma} - 1$$

5. Realizar la curva de Histéresis.

Los parámetros con los que se construye la curva de Histéresis dependen del tipo de Aislador.

▪ *Aislador Elastomérico de Alto Amortiguamiento.*

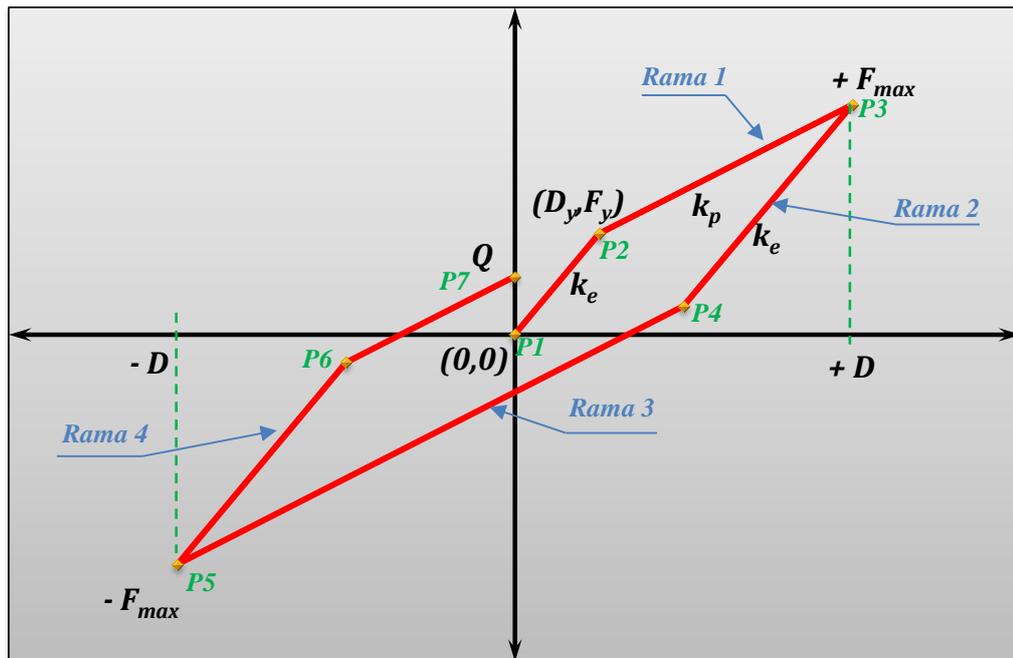


Figura 29: Curva de Histéresis de un Aislador HDRB

En la figura 29 se puede ver los puntos característicos para realizar la curva de histéresis para un aislador elastomérico de Alto Amortiguamiento, A continuación se muestran las coordenadas correspondientes para cada uno de estos puntos y las ecuaciones respectivas para obtenerlos:

Punto 1 (P1) = origen de coordenadas (0 ; 0)

Punto 2 (P2) = (D_y ; F_y)

$$Q = \frac{\pi\beta_{eff}k_p D^2}{(2 - \pi\beta_{eff})D - 2D_y} \quad (5.24)$$

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (5.25)$$

Punto 3 (P3) = (D ; F_{max})

$$F_{max} = Q + k_p D \quad (5.26)$$

Punto 4 (P4) = (x_1 ; y_1)

Para obtener este punto se encuentra las ecuaciones de la rama 2 y rama 3

Rama 2:

$$y = k_e(x - D) + F_{max} \quad (5.27)$$

Rama 3:

$$y = k_p x - Q \quad (5.28)$$

Con las ecuaciones anteriores se realiza un sistema y se obtiene los puntos como se muestra a continuación:

Se reemplaza 5.28 en 5.27

$$x_1 = \frac{F_{max} + Q - k_e D}{k_p - k_e} \quad (5.29)$$

y_1 se obtiene al reemplazar el valor de x_1 en cualquier ecuación del sistema anterior.

Punto 5 (P5) = (- D ; - F_{max})

Se obtiene al multiplicar el punto 3 por -1

Punto 6 (P6) = (x_2 ; y_2)

Se multiplica los valores del punto 4 (x_1 ; y_1) por -1

Punto 7 (P7) = (0 ; Q)

Se forma con el punto de origen de coordenadas como abscisa y la fuerza característica como ordenada.

De las ecuaciones anteriores se tiene:

$$k_e = \frac{F_y}{D_y} \quad (5.30)$$

D_y : Se impone un valor igual a 25mm

β_{eff} : Es el amortiguamiento que se le da al Aislador

D : Desplazamiento esperado del Aislador

k_p : Se utiliza la ecuación 5.7

▪ ***Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo.***

La curva de histéresis para este tipo de aislador es igual a la que se muestra en la figura 29, para el cálculo de los puntos característicos se mantienen las ecuaciones descritas anteriormente, el único parámetro que cambia y que se debe tomar en cuenta al momento de resolver las ecuaciones es la fuerza característica Q , a continuación se detalla la ecuación para el cálculo de este parámetro:

$$Q = A_{LEAD} G_{LEAD} \quad (5.31)$$

6. Calcular las propiedades Dinámicas del Aislador.

Las propiedades dinámicas a calcular son: Rigidez efectiva (K_{eff}), Periodo efectivo (T_{eff}) y Amortiguamiento efectivo (β_{eff}) y se calculan tanto para Aisladores HDRB, LDRB y con núcleo de plomo, a continuación se detallan las ecuaciones para el cálculo:

$$K_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (5.32)$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{K_{eff} * g}} \quad (5.33)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5.34)$$

De las ecuaciones anteriores tenemos:

D = desplazamiento del aislador.

W = Combinaciones de carga (Peso a Aislar).

g = Gravedad.

5.4.2 COMPROBACIÓN

El proceso de diseño consiste en revisar los valores obtenidos en el dimensionamiento previo y de ser necesario realizar un ajuste para que el Aislador cumpla con las necesidades requeridas.

Para esto se debe partir de ciertos cálculos que nos ayudaran en la revisión del diseño del aislador.

El chequeo se realizará tomando en cuenta tres estados de carga los cuales se presenta a continuación en la tabla 6.

Tabla 6: Combinaciones de carga para la evaluación de los aisladores elastoméricos.

COMBINACIÓN	ESTADO DE CARGA
D + L	Cargas de Servicio
1.2D + 1.6L	Cargas Últimas
1.2D + L + E	Cargas Dinámicas

Una vez establecidos los estados de carga se procede a realizar el análisis del aislador para cada uno de los estados mostrados en la tabla anterior para esto se usa el proceso que se muestra a continuación:

- 1) Cálculo de deformaciones debido a la compresión (γ_c), rotación (γ_r) y desplazamiento lateral (γ_s), y comprobación con los límites admisibles.
- 2) Cálculo de pandeo.
- 3) Cálculo de desplazamientos Críticos.
- 4) Cálculo del espesor de las placas de acero de refuerzo.
- 5) Cálculo de las placas de montaje.

El procedimiento se lo debe realizar para cada uno de los estados de carga antes mostrados. A continuación se establecen las ecuaciones que serán empleadas para el cálculo de las deformaciones por compresión, rotación y desplazamiento lateral.

Deformación por compresión:

$$\gamma_c = \frac{P}{AGS} \cdot f_1 \quad (5.35)$$

Deformación por rotación:

$$\gamma_r = \frac{L^2 \theta}{tT_r} \cdot f_2 \quad (5.36)$$

Deformación por desplazamiento lateral:

$$\gamma_s = \frac{\Delta}{T_r} \quad (5.37)$$

Los factores f_1 y f_2 en las ecuaciones 5.35 y 5.36 se obtienen de las tablas que se muestran a continuación, estos coeficientes se encuentran en función de la forma del aislador.

Tabla 7: Coeficiente f_1 para aisladores circulares. (Constantinou, 2011)

S	K/G			
	2000	4000	6000	∞
5	1.02	1.01	1.01	1
7.5	1.05	1.03	1.02	1
10	1.1	1.05	1.03	1
12.5	1.15	1.08	1.05	1
15	1.2	1.11	1.07	1
17.5	1.27	1.14	1.1	1
20	1.34	1.18	1.13	1
22.5	1.41	1.23	1.16	1
25	1.49	1.27	1.19	1
27.5	1.57	1.32	1.23	1
30	1.66	1.37	1.26	1

Tabla 8: Coeficiente f1 para Aisladores circulares huecos (localización superficie interior). (Constantinou, 2011)

	De/Di = 10				De/Di=5			
	K/G				K/G			
S	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	3.18	3.1S	3.18	3.18	2.34	2.35	2.35	2.33
7.5	3.19	3.1S	3.18	3.18	2.35	2.34	2.34	2.35
10	3.19	3.1S	3.18	3.18	2.36	2.35	2.34	2.35
12.5	3.2	3.19	3.18	3.18	2.38	2.35	2.35	2.35
15	3.21	3.19	3.19	3.18	2.41	2.37	2.35	2.35
17.5	5.22	3.2	3.19	3.18	2.44	2.38	2.36	2.35
20	3.25	3.2	3.19	3.18	2.47	2.4	2.31	2.35
22.5	3.27	3.21	3.2	3.18	2.51	2.42	2.39	2.35
25	3.3	3.23	3.21	3.18	2.55	2.44	2.4	2.35
27.5	3.34	3.24	3.21	3.18	2.6	2.46	2.42	2.35
30	3.38	3.26	3.22	3.18	2.66	2.49	2.43	2.35

Tabla 9: Coeficiente f1 para Aisladores circulares huecos (localización superficie exterior). (Constantinou, 2011)

	De/Di = 10				De/Di = 5			
	K/G				K/G			
S	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	1.24	1.23	1.22	1.22	1.28	1.27	1.27	1.27
7.5	1.26	1.24	1.23	1.22	1.31	1.29	1.28	1.27
10	1.29	1.26	1.24	1.22	1.34	1.3	1.29	1.27
12.5	1.32	1.28	1.26	1.22	1.37	1.32	1.3	1.27
15	1.38	1.3	1.27	1.22	1.42	1.34	1.32	1.27
17.5	1.43	1.33	1.29	1.22	1.47	1.37	1.34	1.27
20	1.49	1.36	1.31	1.22	1.51	1.4	1.36	1.27
22.5	1.55	1.4	1.34	1.22	1.59	1.44	1.38	1.27
25	1.62	1.43	1.37	1.22	1.65	1.47	1.41	1.27
27.5	1.69	1.48	1.39	1.22	1.72	1.51	1.44	1.27
30	1.77	1.52	1.43	1.22	1.8	1.56	1.47	1.27

Tabla 10: Coeficiente f_1 para Aisladores rectangulares con $K / G = 2000$.

(Constantinou, 2011)

		K/G = 2000					
	L/B	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S							
5		1.53	1.44	1.39	1.33	1.27	1.22
7.5		1.55	1.45	1.41	1.35	1.3	1.25
10		1.57	1.48	1.43	1.38	1.33	1.29
12.5		1.6	1.51	1.46	1.41	1.37	1.34
15		1.64	1.54	1.5	1.46	1.42	1.39
17.5		1.69	1.59	1.54	1.51	1.48	1.45
20		1.74	1.64	1.6	1.56	1.54	1.52
22.5		1.19	1.7	1.65	1.63	1.61	1.59
25		1.85	1.76	1.72	1.69	1.68	1.66
27.5		1.92	1.83	1.79	1.77	1.75	1.74
30		1.98	1.9	1.86	1.84	1.83	1.82

Tabla 11: Coeficiente f_1 para Aisladores rectangulares con $K / G = 4000$.

(Constantinou, 2011)

		K/G = 4000					
	L/B	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S							
5		1.52	1.43	1.39	1.33	1.26	1.21
7.5		1.53	1.44	1.4	1.34	1.27	1.22
10		1.54	1.45	1.41	1.35	1.29	1.24
12.5		1.56	1.47	1.42	1.37	1.31	1.27
15		1.58	1.48	1.44	1.39	1.34	1.3
17.5		1.6	1.5	1.46	1.41	1.37	1.33
20		1.63	1.53	1.48	1.44	1.4	1.37
22.5		1.66	1.56	1.51	1.48	1.44	1.41
25		1.69	1.59	1.55	1.51	1.48	1.46
27.5		1.72	1.63	1.58	1.55	1.52	1.5
30		1.76	1.67	1.62	1.59	1.57	1.55

Tabla 12: Coeficiente f1 para Aisladores rectangulares con $K / G = 6000$.

(Constantinou, 2011)

		K/G = 6000						
S		L/B	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
5			1.52	1.43	1.39	1.32	1.26	1.21
7.5			1.52	1.44	1.39	1.33	1.27	1.22
10			1.53	1.44	1.4	1.34	1.28	1.23
12.5			1.54	1.45	1.41	1.35	1.29	1.25
15			1.56	1.46	1.42	1.36	1.31	1.27
17.5			1.57	1.48	1.43	1.38	1.33	1.29
20			1.59	1.49	1.45	1.4	1.35	1.32
22.5			1.61	1.51	1.47	1.42	1.38	1.35
25			1.63	1.53	1.49	1.45	1.41	1.3S
27.5			1.66	1.56	1.51	1.47	1.44	1.41
30			1.68	1.59	1.54	1.5	1.47	1.45

Tabla 13: Coeficiente f1 para Aisladores rectangulares con $K / G = \infty$

(Materiales Incomprensibles). (Constantinou, 2011)

		K/G = ∞						
S		L/B	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
5			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
7.5			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
10			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
12.5			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
15			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
17.5			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
20			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
22.5			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
25			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
27.5			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2
30			1.51	1.43	1.38	1.32	1.25	1.2

Tabla 14: Coeficiente f_2 para Aisladores circulares. (Constantinou, 2011)

S	K/G			
	2000	4000	6000	∞
5	0.37	0.37	0.37	0.37
7.5	0.36	0.36	0.37	0.37
10	0.34	0.36	0.36	0.37
12.5	0.33	0.35	0.36	0.37
15	0.31	0.34	0.35	0.37
17.5	0.3	0.33	0.34	0.37
20	0.28	0.32	0.33	0.37
22.5	0.27	0.31	0.32	0.37
25	0.25	0.29	0.32	0.37
27.5	0.24	0.28	0.31	0.37
30	0.23	0.27	0.3	0.37

Tabla 15: Coeficiente f_2 para Aisladores circulares huecos (localización superficie exterior). (Constantinou, 2011)

S	SUPERFICIE EXTERIOR							
	De/Di = 10				De/Di = 5			
	K/G				K/G			
	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	0.37	0.38	0.38	0.38	0.36	0.36	0.37	0.37
20	0.27	0.31	0.33	0.38	0.25	0.29	0.31	0.37
30	0.22	0.27	0.29	0.38	0.2	0.25	0.27	0.37

Tabla 16: Coeficiente f_2 para Aisladores circulares huecos (localización superficie interior). (Constantinou, 2011)

S	SUPERFICIE INTERIOR							
	De/Di = 10				De/Di = 5			
	K/G				K/G			
	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	0.3	0.31	0.31	0.32	0.31	0.31	0.32	0.33
20	0.18	0.23	0.26	0.33	0.18	0.23	0.25	0.33
30	0.12	0.19	0.23	0.33	0.12	0.18	0.22	0.33

Tabla 17: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = 2000$.

(Constantinou, 2011)

		K/G = 2000					
L/B		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S							
5		0.49	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46
7.5		0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.44
10		0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42
12.5		0.47	0.46	0.45	0.43	0.41	0.39
15		0.46	0.44	0.43	0.41	0.39	0.37
17.5		0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35
20		0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.32
22.5		0.42	0.39	0.37	0.35	0.32	0.3
25		0.41	0.38	0.35	0.33	0.31	0.28
27.5		0.39	0.36	0.34	0.31	0.29	0.27
30		0.38	0.35	0.32	0.29	0.27	0.25

Tabla 18: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = 4000$.

(Constantinou, 2011)

		K/G = 4000					
L/B		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S							
5		0.5	0.49	0.49	0.49	0.48	0.46
7.5		0.49	0.49	0.49	0.48	0.47	0.45
10		0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.44
12.5		0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43
15		0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.41
17.5		0.47	0.46	0.45	0.43	0.42	0.4
20		0.46	0.45	0.43	0.42	0.4	0.38
22.5		0.45	0.44	0.42	0.4	0.38	0.36
25		0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35
27.5		0.44	0.42	0.39	0.37	0.35	0.33
30		0.43	0.40	0.38	0.36	0.34	0.31

Tabla 19: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = 6000$.

(Constantinou, 2011)

		K/G = 6000					
	L/B	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S							
5		0.5	0.5	0.5	0.49	0.48	0.47
7.5		0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.46
10		0.49	0.49	0.49	0.48	0.47	0.45
12.5		0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.44
15		0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43
17.5		0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42
20		0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.4
22.5		0.47	0.46	0.44	0.43	0.41	0.39
25		0.46	0.45	0.43	0.42	0.4	0.3S
27.5		0.45	0.44	0.42	0.4	0.3S	0.36
30		0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35

Tabla 20: Coeficiente f_2 para Aisladores rectangulares con $K / G = \infty$

(Materiales Incomprensibles). (Constantinou, 2011)

		K/G = ∞					
	L/B	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
S							
5		0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.47
7.5		0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.47
10		0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.47
12.5		0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.47
15		0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.47
17.5		0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.47
20		0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.47
22.5		0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.47
25		0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.47
27.5		0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.47
30		0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.47

Para el cálculo del pandeo la carga viene definida por la siguiente ecuación para el estado en el cual no está deformado:

$$P_{cr} = \frac{\pi\sqrt{\lambda}GSAr}{T_r} \quad (5.38)$$

De la ecuación anterior:

$\lambda = 2$ Para Aisladores circulares y con orificio en el centro, 2.25 para rectangulares y cuadrados.

r = radio de giro.

La carga de pandeo también se la puede definir de acuerdo a la geometría del aislador así:

Aislador Cuadrado:

$$P_{cr} = 0.340 \frac{GL^4}{tT_r} \quad (5.39)$$

Aislador Circular:

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD^4}{tT_r} \quad (5.40)$$

Aislador Circular con agujero en el centro:

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD_e^4 \left(1 - \frac{D_i}{D_e}\right) \left(1 - \frac{D_i^2}{D_e^2}\right)}{tT_r \left(1 + \frac{D_i^2}{D_e^2}\right)} \quad (5.41)$$

Cuando el Aislador se encuentra sometido a compresión y deformación lateral la carga de pandeo viene dada por la siguiente ecuación:

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (5.42)$$

De la cual:

A_r = área reducida del aislador, la cual se la calcula en función de la geometría y viene dada por las siguientes ecuaciones:

Aislador Rectangular:

$$A_r = B(L - \Delta) \quad (5.43)$$

Δ = desplazamiento en dirección de la dimensión L

Aislador Circular:

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \quad (5.45)$$

Aislador Circular con agujero en el centro:

$$A_r = A \left(\frac{\delta - \sin \delta}{\pi} \right) \quad (5.46)$$

El desplazamiento crítico se presenta cuando el momento de volcamiento supera el momento estabilizador producido por el peso del aislador, en la figura 30 se ilustra un aislador en la fase de vuelco y las relaciones de fuerza-desplazamiento laterales supuestos para el cálculo del desplazamiento crítico.

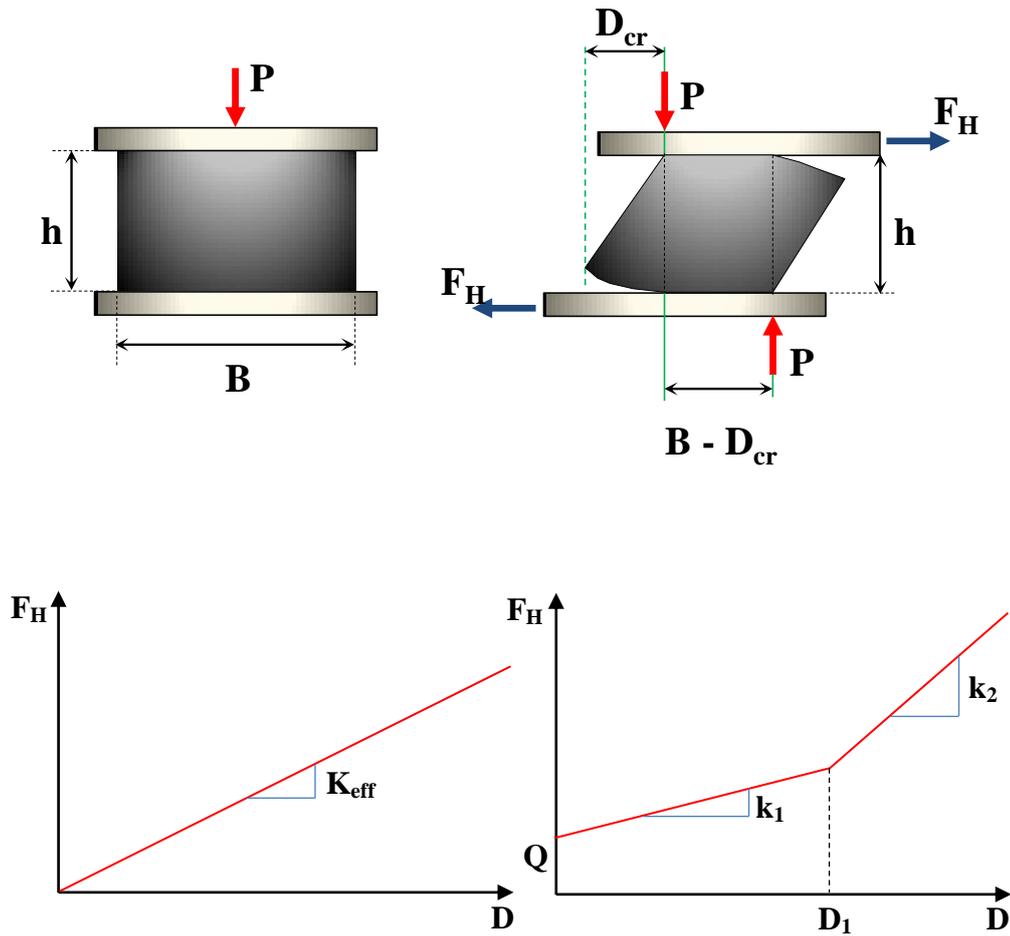


Figura 30: Fases de Vuelco de un Aislador y relaciones de fuerza-desplazamiento laterales. (Constantinou, 2011)

Si el $D_{cr} \geq D_1$

$$D_{cr} = \frac{PB - Qh + (k_2 - k_1)D_1h}{k_2h + P} \quad (5.47)$$

Si el $D_{cr} \leq D_1$

$$D_{cr} = \frac{PB - Qh}{k_1h + P} \quad (5.48)$$

Representando el D_{cr} en función de la rigidez efectiva:

$$D_{cr} = \frac{PB}{K_{eff}h + P} \quad (5.49)$$

Para el cálculo del espesor de las láminas de acero de refuerzo se presentan a continuación dos ecuaciones, en las cuales se ha considerado dos casos; el primero para láminas que no presenten agujeros y el segundo para láminas con agujeros como serían las utilizadas en la fabricación de aisladores con núcleo de plomo.

Para láminas de acero sin agujeros:

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

Para láminas de acero con agujeros:

$$t_s \geq \frac{3t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.51)$$

Para el cálculo de las placas de montaje se establece dos alternativas y los controles de diseño de estas placas deberán realizarse para el Sismo de Diseño (DE), y para el Sismo Máximo considerado (MCE):

- **Área Reducida.**- se considera que la carga axial P se trasmite al caucho a través del área efectiva la cual se define como la superposición de las áreas de caucho unidas en la parte superior e inferior del aislador.
- **Carga – Momento.**- se considera que la carga axial P y el momento de volcamiento M actúan sobre toda la superficie de las placas de montaje.

Procedimiento de Área Reducida.

- Calcular el Área reducida del Aislador para ello se puede emplear las ecuaciones 5.43 a la 5.46. en el caso de tener un aislador con núcleo de plomo el área del

núcleo no se debe ser retirada debido a que la carga axial P también es transmitida a través de este.

- Calcular la dimensión b del área reducida rectangular equivalente (figura 31).

$$b = \frac{A_r}{0.75L} \quad (5.52)$$

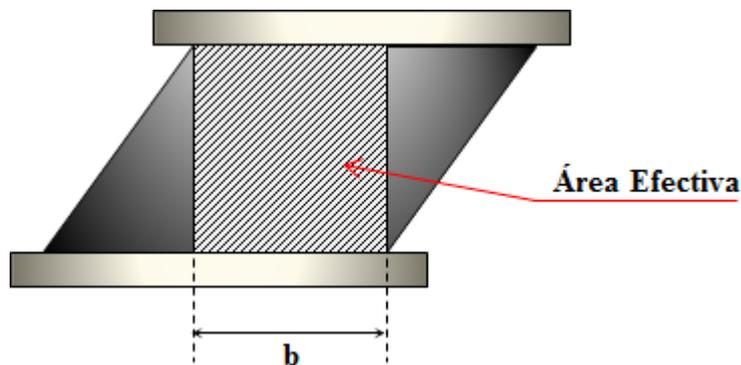


Figura 31: Área efectiva (Área reducida)

- Calcular la resistencia del hormigón en el apoyo.

$$f_b = 1.7\phi_c f'_c \quad (5.53)$$

- Calcular la dimensión b_1 del área de carga del hormigón.

$$b_1 = \frac{P}{0.75L f_b} \quad (5.54)$$

- Calcular el brazo de palanca.

$$r = \frac{b_1 - b}{2} \quad (5.55)$$

- Calcular el momento generado en el apoyo.

$$M_u = \frac{f_b r^2}{2} \quad (5.56)$$

- Calculo del espesor de la placa de montaje.

$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4M_u}{\phi_b F_y}} \quad (5.57)$$

De las ecuaciones anteriores:

F_y : Esfuerzo de Fluencia del Acero.

f'_c : Esfuerzo de Compresión del hormigón.

ϕ_c : Factor de reducción del hormigón **0.65** para **DE**, **1** para **MCE**.

ϕ_b : Factor de reducción **0.9** para **DE**, **1** para **MCE**.

Adicionalmente al proceso descrito anteriormente es necesario considerar dos chequeos adicionales que son:

- Calculo de los esfuerzos en los pernos de anclaje.- se calculara empleando el procedimiento de carga – momento.
- El esfuerzo transmitido a través del área reducida a la sección del concreto donde se ubica el aislador.

$$A_c = (0.75L + 2t_{es} + 2t)(b + 2t_{es} + 2t) \quad (5.58)$$

$$f_b \geq \frac{P}{A_c} \quad (5.59)$$

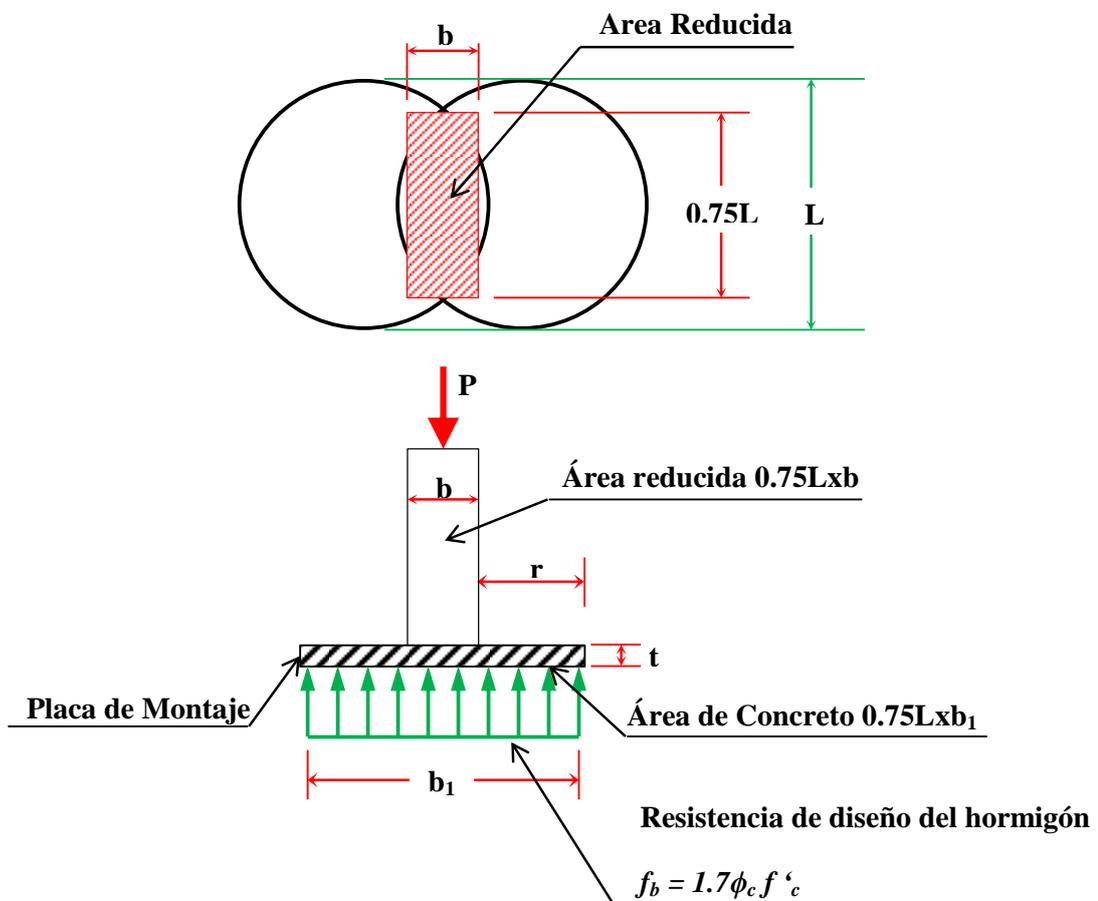


Figura 32: Elementos usados en el Procedimiento de Área reducida.

Procedimiento de Carga – Momento.

Este método se aplica partiendo de la suposición que no existen Tensiones en los pernos de anclaje como se ve en la figura 33. Se utiliza para calcular la distribución de esfuerzos entre el hormigón y la placa de montaje, además podemos encontrar las tensiones que se producen en los pernos de anclaje que sujetan las placas.

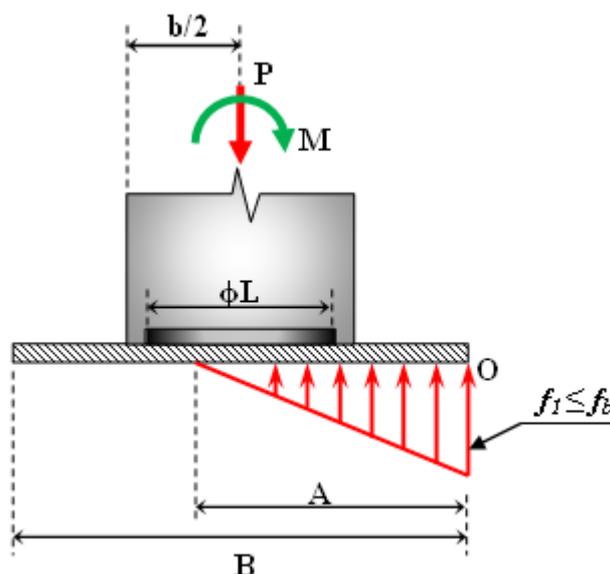


Figura 33: Diagrama de distribución de esfuerzos en la placa sin tensión en los pernos de anclaje.

Para calcular el esfuerzo f_1 y la dimensión A mostrados en la gráfica anterior, se asume una placa cuadrada de lado B en la cual se realiza equilibrio de fuerzas en el punto O , de acuerdo con esto tenemos las siguientes ecuaciones:

$$f_1 = \frac{2P}{AB} \leq f_b \quad (5.60)$$

$$A = \frac{3}{2}B - 3\frac{M}{P} \quad (5.61)$$

En el caso de que A sea mayor B se debe asumir una distribución de esfuerzos trapezoidal, la cual se debe distribuir a lo largo de B .

Si el esfuerzo f_1 es mayor que la resistencia del hormigón en el apoyo f_b se produce tensión en los pernos (figura 34), en este caso el equilibrio de fuerzas se lo realiza en el sitio donde se encuentran los pernos O' , dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$A^2 \left(\frac{B f_b}{6} \right) - A \left(\frac{f_b B C}{2} \right) + \left(M - P C - \frac{P B}{2} \right) = 0 \quad (5.62)$$

$$T = \frac{f_b A B}{2} - P \quad (5.63)$$

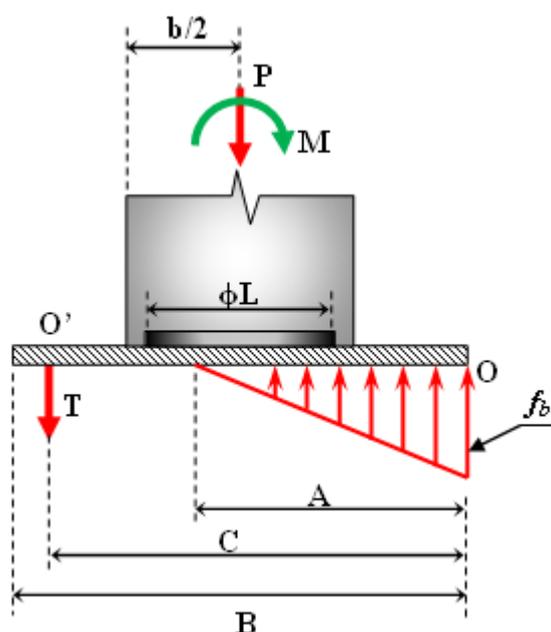
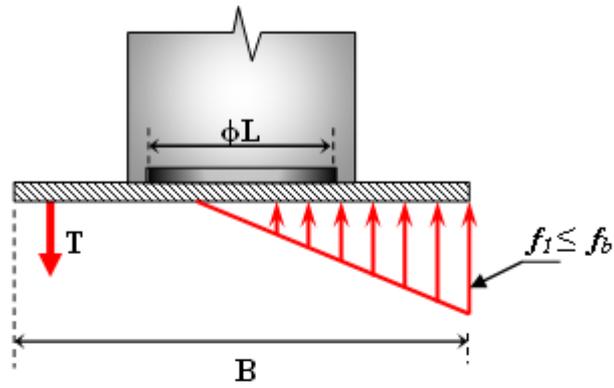


Figura 34: Distribución de esfuerzos en la placa con tensión en los pernos de anclaje.

Se debe tener en cuenta que la tensión T en el punto O' puede ser generada por un perno o por una serie de pernos en ese punto, por lo tanto para el diseño de los pernos se debe tomar en cuenta la cantidad a utilizar para realizar una correcta distribución de tensiones para cada uno de ellos.

Cuando el aislador tiene una placa interna sobre la placa de montaje y esta placa interna es de forma circular, se debe realizar un cambio de sección a una sección rectangular equivalente como se muestra en la figura 35.



Sección rectangular equivalente de la placa interna

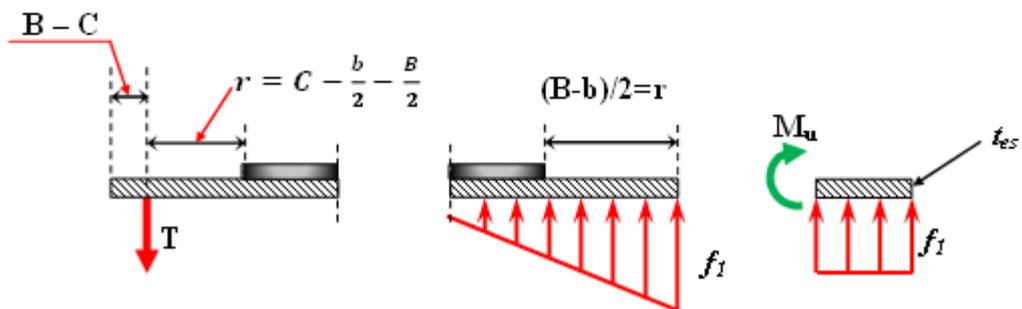


Diagrama de cuerpo libre utilizado para encontrar el espesor de la placa

Figura 35: Distribución de esfuerzos en la placa con tensión en los pernos de anclaje.

Del grafico anterior se deduce las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$b^2 = \frac{\pi L^2}{4} \quad (5.64)$$

$$b \approx 0.93L \quad (5.65)$$

$$M_u = f_1 \frac{r^2}{2} \quad (5.66)$$

El espesor de la placa de montaje t_{es} se calcula con la ecuación 5.57

COMPROBACIÓN PARA CARGAS DE SERVICIO.

Deformación por compresión:

$$\gamma_{ccs} = \frac{P_u}{A_r GS} \cdot f_1 \quad (5.67)$$

Deformación por rotación:

$$\gamma_{rcs} = \frac{L^2(\theta_{st} + \theta)}{tT_r} \cdot f_2 \quad (5.68)$$

Dónde:

$\theta_{st} = 0.005$ rad (componente estático de rotación)

θ = componente de rotación proveniente del análisis de la estructura.

Deformación por desplazamiento lateral:

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{T_r} \quad (5.69)$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\frac{P_u}{A_r GS} * f_1 \leq 3.5 \quad (5.70)$$

$$\gamma_{ccs} + \gamma_{scs} + \gamma_{rcs} \leq 6 \quad (5.71)$$

$$t_s \geq 1.9mm \quad (5.72)$$

t_s Se calcula con las ecuaciones 5.50 o 5.51.

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0 \quad (5.73)$$

COMPROBACIÓN PARA SISMO DE DISEÑO.

Deformación por compresión:

$$\gamma_{CDE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.74)$$

Deformación por desplazamiento lateral:

$$\gamma_{SDE} = \frac{\Delta + \Delta_{DE}}{T_r} \quad (5.75)$$

Dónde:

Δ_{DE} = Desplazamiento lateral sísmica

Δ = Desplazamiento proveniente del análisis de la estructura.

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{CDE} + \gamma_{SDE} + 0.5\gamma_{rcs} \leq 7 \quad (5.76)$$

El control del espesor de la lámina de acero t_s , se lo hace con la ecuación 5.72 y se lo calcula con las ecuaciones 5.50 o 5.51

COMPROBACIÓN PARA SISMO MÁXIMO CONSIDERADO.

Deformación por compresión:

$$\gamma_{CMCE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.77)$$

Deformación por desplazamiento lateral:

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.5\Delta + \Delta_{MCE}}{T_r} \quad (5.78)$$

Dónde:

Δ_{MCE} = Desplazamiento lateral sísmica

Δ = Desplazamiento proveniente del análisis de la estructura.

Comprobación por Pandeo:

$$P'_{crMCE} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \geq 0.15P_{cr} \quad (5.79)$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{CMCE} + \gamma_{SMCE} + \gamma_{rcs} \leq 9 \quad (5.80)$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1 \quad (5.81)$$

$$\frac{D_{cr}}{0.5\Delta + \Delta_{MCE}} \geq 1.1 \quad (5.82)$$

Al igual que en la comprobación para el sismo de diseño, el control del espesor de la lámina de acero t_s se lo hace con la ecuación 5.72 y se lo calcula con las ecuaciones 5.50 o 5.51

PRUEBAS EN EL LABORATORIO.

Hay dos fases para las pruebas de los aisladores elastoméricos. La primera fase es la prueba de los prototipos, que sirve para confirmar los valores de diseño utilizados para la elaboración de los aisladores y para validar su estabilidad bajo

cargas máximas y desplazamientos. La segunda fase es un programa de pruebas de control de calidad durante la fabricación de los aisladores.

▪ **Pruebas a los Prototipos.**

1. Los Prototipos que se van a ensayar deben ser nuevos y que no hayan pasado por prueba alguna anteriormente, además deben estar contruidos de acuerdo con las especificaciones de fabricación y con los materiales especificados.
2. Todas las pruebas que se realice a los prototipos deben llevarse a cabo a una temperatura ambiente constante de 20°C.
3. Los prototipos deben ser sometidos a una prueba de rasgadura antes de realizar cualquier otro tipo de prueba, este ensayo se la realiza colocando una carga de compresión $P_1 = D + 0.5L$ durante tres ciclos totalmente invertidos en una amplitud de desplazamiento igual al Desplazamiento de Diseño D_D , y deberán cumplir con los requisitos a continuación:
 - La rigidez horizontal a partir del tercer ciclo debe estar dentro de un rango de $\pm 10\%$ con respecto a la rigidez inicial dada para el desplazamiento de diseño D_D .
 - La amortiguación se calcula para cada ciclo y el coeficiente de amortiguamiento efectivo se lo calcula como el promedio de las amortiguaciones obtenidas en cada ciclo y se lo hace utilizado la fórmula 5.4. donde la E_D (energía Disipada) corresponde al Área encerrada en cada ciclo.
4. Prueba de Estabilidad.

La prueba de estabilidad se realiza para un ciclo completo en una amplitud igual al desplazamiento máximo D_M , sometido a una carga de compresión $P_2 = 1.2D + L + MCE$.

▪ ***Pruebas de Control de Calidad***

1. Todos los aisladores, que se fabriquen ya sean prototipos, de línea de producción y adicionales, deben ser sometidos a las pruebas de control de calidad.

2. Detalles de la conexión.

Los aisladores que sean objeto de ensayo deben incorporar las conexiones, las mismas que deben representar los detalles de conexión típicos que son usados en la obra para el tipo de aislador que se ensaya.

3. Pruebas de Compresión.

Cada aislador se prueba a compresión a una temperatura ambiente de 20°C. Se aplica una carga axial inicial de 2000 psi, esta se mantiene durante 10 min, y luego se retira, se deja reposar al aislador por un lapso mínimo de 30 minutos antes de continuar con la prueba. Luego de esto se carga el aislador nuevamente con incrementos progresivos de 300psi hasta llegar a los 1500psi. El intervalo de tiempo entre incrementos será de 1.5 a 3 minutos y luego de alcanzar el valor del incremento la carga se mantiene constante durante 30 segundos tiempo en el cual se debe medir el desplazamiento vertical, el mismo que debe ser registrado. La Descarga se realiza de forma gradual y se mide nuevamente los desplazamientos verticales en la misma secuencia que se hizo para la carga.

Con los datos obtenidos se realiza una gráfica carga – desplazamiento, y este proceso se debe realizar para todos los aisladores que sean ensayados.

La rigidez a la compresión se calcula como la pendiente de la recta de mejor ajuste a través de los puntos de carga-desplazamiento, haciendo caso omiso de los puntos de carga cero, el promedio de esta se calcula con todos los

valores obtenidos de los aisladores ensayados y deberá cumplir que, para cuando el corte tenga un valor igual a cero la ordenada será igual a la rigidez vertical k_v , si este requisito no se cumple, los aisladores deben ser rechazados. Por último el aislador se vuelve a cargar con 2000psi y se mantiene la carga durante un periodo mínimo de 1 hora; antes de retirar la carga, se debe inspeccionar que no presente ninguna falla de las mencionadas a continuación, la presencia de una de estas será motivo de rechazo del aislador:

- Falla en la unión caucho-acero
- Presencia de fallo en el Laminado
- Por lo menos tres grietas superficiales cuya separación o profundidad sea mayor a 2mm.

4. Prueba de compresión y corte combinados.

Cada aislador que se ensaye a compresión debe ser sometido a la prueba de compresión y corte combinados, este ensayo se lo realiza a temperatura ambiente constante de 20°C, siguiendo el procedimiento a continuación:

- Se somete al aislador a tres ciclos totalmente invertidos en una amplitud de desplazamiento igual al Desplazamiento de Diseño D_D , con una carga de compresión $P_I = D + 0.5L$.
- En el primer ciclo se registra la fuerza de corte cuando el desplazamiento sea el máximo ósea igual a D_D .
- Se registra la gráfica continua del ciclo de histéresis, de los tres ciclos. Para determinar la gráfica media se emplean las coordenadas promedio de los tres ciclos registrados.

- El **Área**, y la rigidez efectiva K_{eff} se calculan en base a la gráfica media obtenida.
 - La rigidez horizontal a partir del tercer ciclo debe estar dentro de un rango de $\pm 10\%$ con respecto a la rigidez inicial dada para el desplazamiento de diseño D_D . Si el aislador no cumple con esto debe ser rechazado, adicionalmente se debe chequear antes de retirar las cargas que no posea ninguna falla de las que se menciona a continuación:
 - Falla en la unión caucho-acero
 - Presencia de fallo en el Laminado
 - Por lo menos tres grietas superficiales cuya separación o profundidad sea mayor a 2mm.
- ***Informe de los ensayos.***
- Todos los datos obtenidos en las pruebas de los aisladores se documentan en un informe consolidado que lleva por nombre "Informe Final de Pruebas de los Aisladores Sísmicos Elastoméricos", este informe debe ser firmado por el técnico que realizó los ensayos y por el director del laboratorio donde se efectuaron las pruebas.
- ***Identificación.***
- La identificación de cada aislador debe ser estampada en caracteres de 3 pulgadas de altura en dos lugares equidistantes en la parte exterior del núcleo del aislador como se muestra en la figura 36, esto también se lo debe hacer en cada cara del paquete y se estampará en caracteres $\frac{1}{2}$ pulgada de alto en la superficie exterior de la placa de montaje superior.

En la etiqueta debe ir el tipo de aislador si es HDRB o LRB, una letra y el número de secuencia de fabricación.

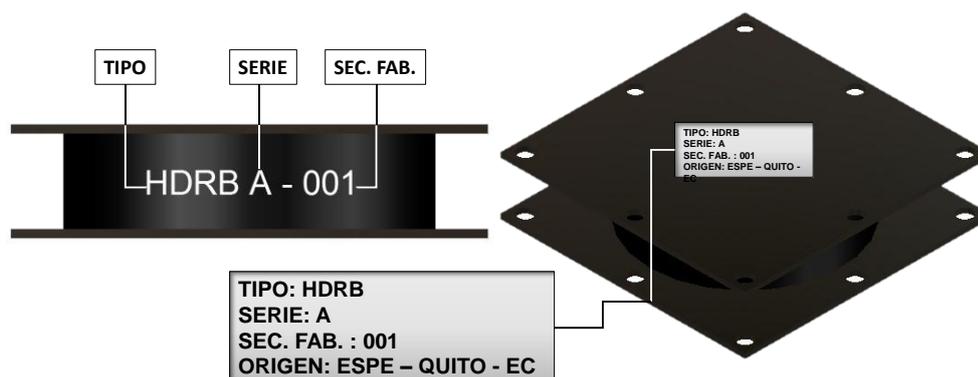


Figura 36: Identificación de aisladores sísmicos elastoméricos.

▪ ***Entrega, almacenamiento y manipulación.***

1. Se debe proporcionar por escrito las instrucciones de instalación de los aisladores.
2. Los aisladores se entregan embalados para su protección.
3. Se deben almacenar en pallets de madera para permitir el transporte con montacargas y el sitio donde van a ser almacenados debe ser un lugar limpio, libre de humedad y que garantice protección contra daños físicos.
4. El manejo debe ser cuidadoso para evitar averías en los elementos como roturas o abolladuras y para proteger la integridad de las personas que los manipulen, esto debido al peso de los aisladores.
5. Por último se debe entregar también los pernos con los que se van a instalar los aisladores, los mismos que deben ser de las mismas características a los utilizados en las pruebas.

5.4.3 EJEMPLOS DE DISEÑO

En la presente sección se propone tres ejemplos en los que se detallan paso a paso el proceso de diseño de los aisladores elastoméricos; para el desarrollo de estos ejemplos, se utiliza como apoyo el software de diseño y análisis estructural ETABS.

EJEMPLO 1. Aislador Elastomérico de Alto Amortiguamiento (HDRB)

Circular.

Enunciado del Ejemplo.

Considere una estructura de Hormigón armado de 4 niveles (Figura 37), que se edificará en una zona sísmica V y el tipo de suelo presente en el lugar de construcción es tipo A de acuerdo a la NEC-11. La Utilidad que se le dará será como vivienda, y la configuración tanto en planta como en elevación es regular y se lo puede apreciar en la figura 38 y figura 39. Las dimensiones de los elementos estructurales son:

Columnas	:	45 x 45	cm
Vigas	:	25 x 35	cm
Losa maciza	:	14.5	cm

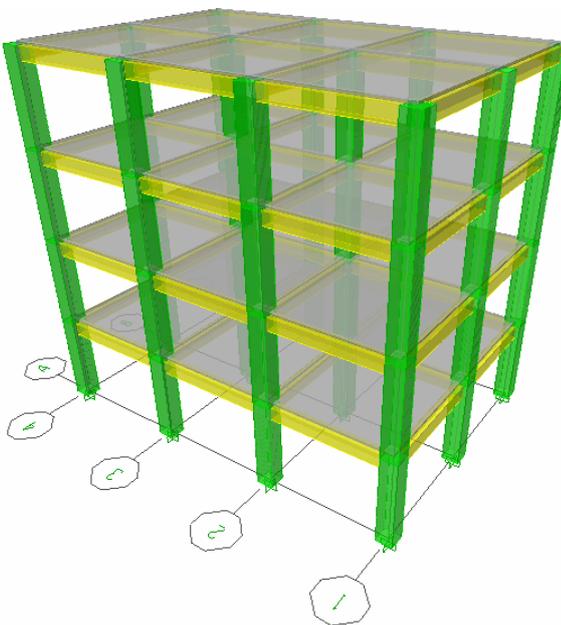


Figura 37: Estructura a ser Aislada.

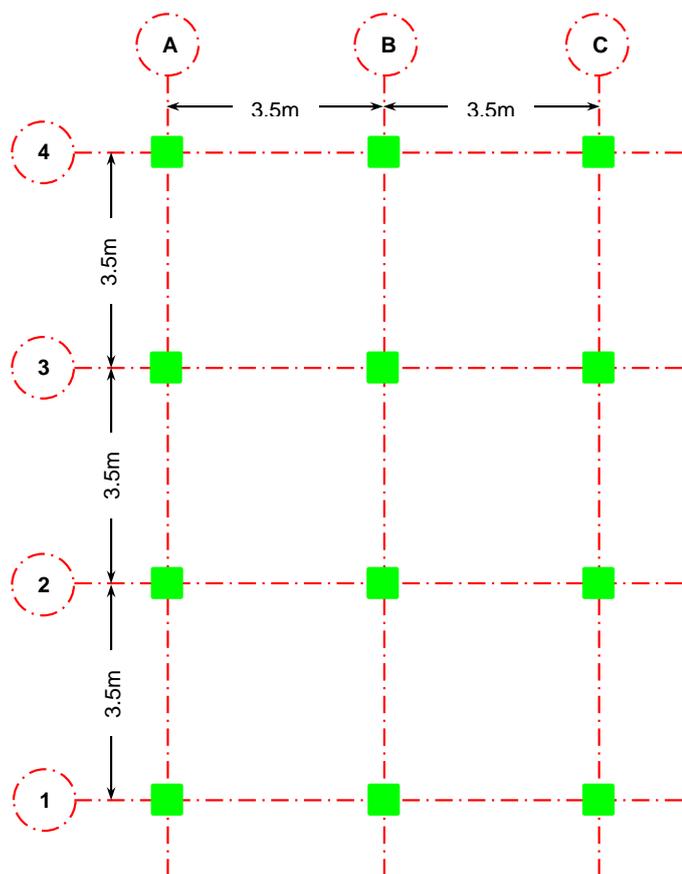


Figura 38: Configuración de la estructura en planta.

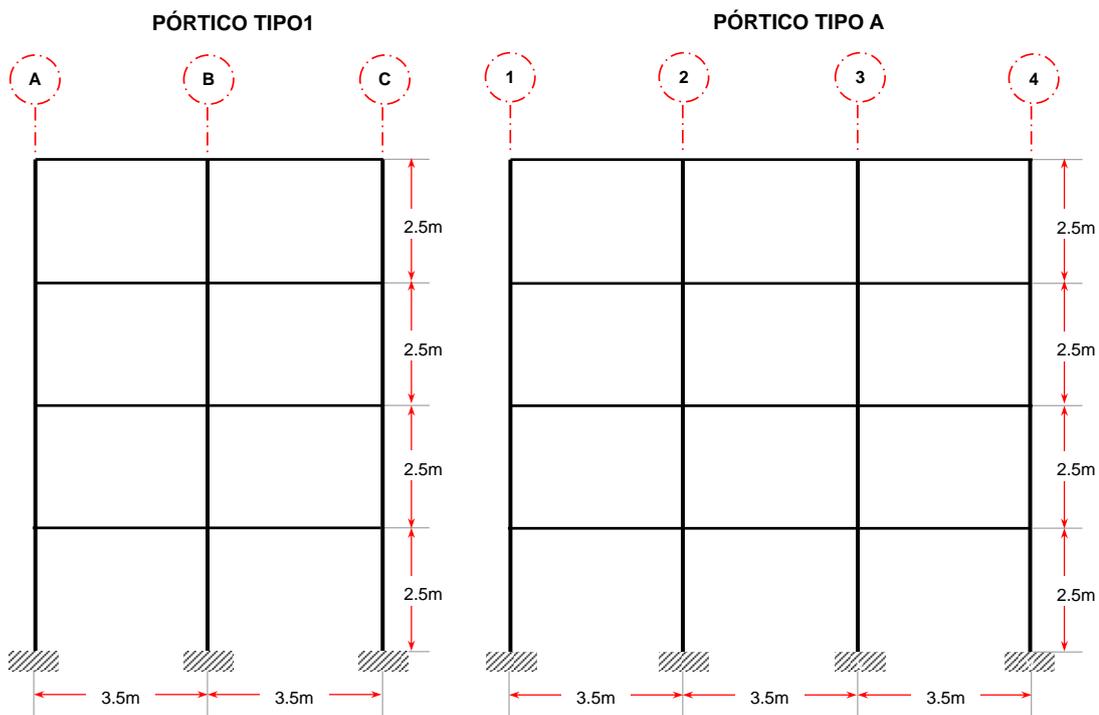


Figura 39: Configuración de la estructura en elevación.

Las cargas que gravitan sobre esta corresponden a una carga muerta permanente de 0.332T/m^2 y una carga viva de acuerdo al uso de la edificación que establece La NEC-11 de 0.2T/m^2 , mediante un análisis de cargas vivas y muertas se pudo calcular las cargas verticales que llegan a cada columna (Figura 40).

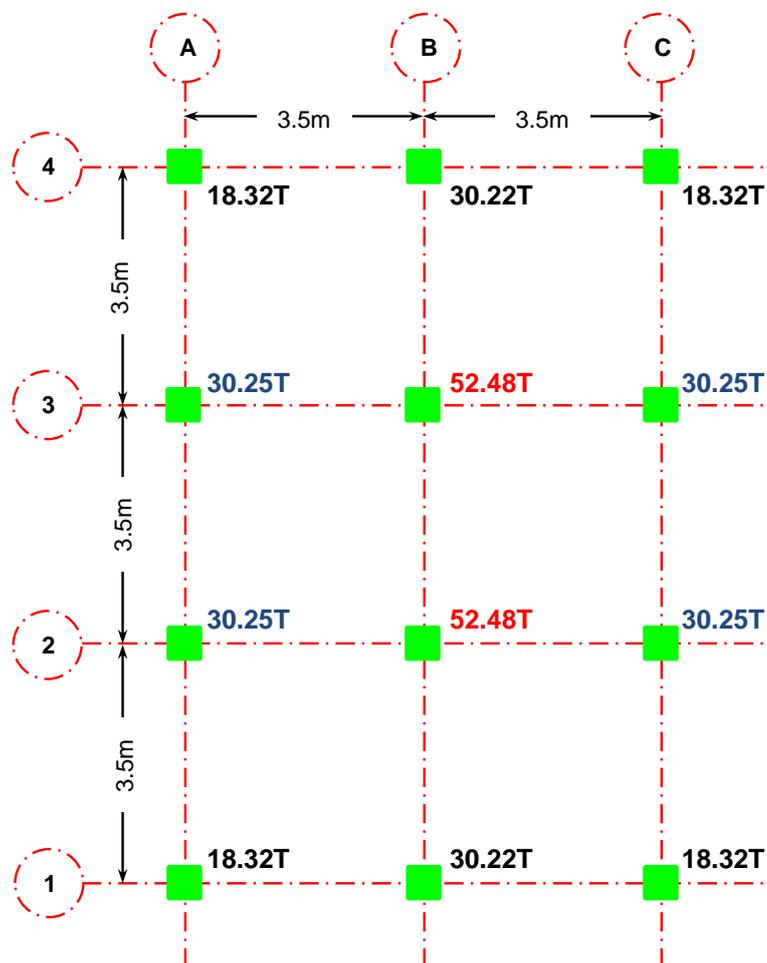


Figura 40: Cargas verticales que actúan en cada columna.

Solución.

Como se mencionó el material de la estructura es Hormigón Armado, la resistencia característica será de $f^c=210\text{Kg/cm}^2$, el esfuerzo de fluencia del acero $f_y=4200\text{Kg/cm}^2$, el módulo de elasticidad del hormigón $E_c=14000\sqrt{f^c}$ $=202879.2744\text{ Kg/cm}^2$, se utiliza este valor con la finalidad de apegarse a la realidad ecuatoriana, a pesar que el código ACI establece $E_c=15000\sqrt{f^c}$.

Para el diseño de los aisladores sísmicos se toma en cuenta un módulo volumétrico $K=20400 \text{ Kg/cm}^2$, módulo de corte de la goma $G=7.14 \text{ Kg/cm}^2$, un desplazamiento $D=10\text{cm}$ y un amortiguamiento $\beta=15\%$, el esfuerzo de fluencia para las láminas de acero de refuerzo es $f_y=4200\text{Kg/cm}^2$

El procedimiento a seguir para el diseño del aislador para esta edificación es el que se describió anteriormente, y sus pasos se muestran a continuación:

- Obtener las características del Proyecto.
- Escoger el tipo de Aislador a diseñar.
- Establecer las características de los materiales.
- Establecer la geometría del Aislador (forma).
- Realizar un pre-dimensionamiento y obtener la curva de Histéresis.
- Obtener las propiedades dinámicas.
- Comprobar el diseño del Aislador.

▪ **Características del proyecto:**

Del análisis de cargas realizado, se toma las fuerzas más representativas para diseñar los aisladores, esto se lo hace con el fin de tener un solo tipo de aislador y reducir los costos de fabricación además con esto se evita problemas en la obra por variaciones de dimensiones que puedan presentar los aisladores al diseñar para cada carga que llega a las columnas.

Para este caso las fuerzas más representativas son 18.32T, 30.25T y 52.48T, de estas tres se selecciona las más críticas para empezar el análisis, 30.25T y 52.48T. Por tener un rango de seguridad el análisis se realiza con 55T. Realizado esto el cuadro de las características del proyecto quedaría de la siguiente forma (Tabla 21).

Tabla 21: Características del Proyecto

Zona sísmica	:	V	0.4g
Tipo de Suelo	:	A	
Fa	:	0.9	
Fd	:	0.9	
Fs	:	0.75	
D	:	10 cm	
f'c	:	210	Kg/cm ²
Columnas	:	45 x 45	cm
Carga (P)	:	55	T

- **Tipo de Aislador a utilizar:**

Aislador Elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB).

- **Propiedades de los Materiales del Aislador:**

$$K = 20400 \text{ Kg/cm}^2$$

$$G = 7.14 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$$

- **Geometría del Aislador:**

Circular.

- **Dimensionamiento Previo:**

Área transversal del Aislador.

$$A \geq \frac{P}{f'_c} \quad (5.17)$$

$$P = 55 \text{ T.}$$

$$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$A \geq \frac{(55 * 1000)}{210}$$

$$A \geq 261.90 \text{ cm}^2$$

Se asume una $A = 400 \text{ cm}^2$.

Calculo del Diámetro del Aislador.

$$D_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.20)$$

$$D_e = \sqrt{\frac{4 * 400}{\pi}}$$

$$D_e = 22.57 \text{ cm}$$

La diámetro obtenido es menor que las dimensiones de la columna, por lo tanto se asume un diámetro 5cm mayor a las dimensiones de la columna $D_e = 50 \text{ cm}$.

Con el diámetro asumido se calcula nuevamente la sección trasversal que va a tener el aislador.

$$A = \pi * \frac{D_e^2}{4}$$

$$A = \pi * \frac{(50)^2}{4}$$

$$A = 1963.50 \text{ cm}^2$$

Altura Total de la gomas

Se asume un $T_r = 30\text{cm}$.

Número de láminas de goma.

Se impone un espesor $t = 5\text{mm}$, posteriormente se comprobara si el espesor es el adecuado.

$$\text{No. de capas de goma} = \frac{T_r}{t}$$

$$\text{No. de capas de goma} = \frac{30}{0.5}$$

$$\text{No. de capas de goma} = 60$$

Número de láminas de Acero de refuerzo.

$$\text{No. de capas de Acero} = \text{No. de capas de goma} - 1$$

$$\text{No. de capas de Acero} = 60 - 1$$

$$\text{No. de capas de Acero} = 59$$

▪ **Curva de Histéresis :**

Se utiliza el desplazamiento esperado $D=10\text{cm}$, y se calcula la rigidez postfluencia kp , la fuerza característica Q , la fuerza de fluencia Fy , la rigidez efectiva K_{eff} , y el periodo efectivo T_{eff} .

Con el T_{eff} se grafica el espectro elástico de desplazamientos utilizando los parámetros mencionados en el capítulo 2; al espectro obtenido se lo divide para un factor de reduccion B y se multiplica por 1 para obtener el espectro de diseño y por 1.5 para el espectro asociado al maximo sismo considerado.

$$B = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05} \right)^{0.3} \quad (5.83)$$

Con el T_{eff} se ingresa en el espectro de diseño y se obtiene un nuevo desplazamiento D_I . Para obtener el desplazamiento real del aislador se establece una tolerancia entre el desplazamiento esperado D y el desplazamiento obtenido D_I , para este caso se establece un valor de 0.1 . Esta tolerancia se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Tol = |D_1 - D| \quad (5.84)$$

Si el valor obtenido en la ecuación 5.84 es mayor al valor de 0.1 establecido para la tolerancia se asigna un nuevo valor D_2 al desplazamiento utilizando la siguiente expresión:

$$D_2 = D_1 + \frac{(D - D_1)}{2} \quad (5.85)$$

Dónde:

D_1 : Desplazamiento obtenido con el T_{eff}

D : Desplazamiento esperado por el Aislador.

Este proceso se lo repite hasta que el valor obtenido en la ecuación 5.84 sea igual o menor al valor establecido para la tolerancia.

En la Figura 41 se muestra el espectro elástico de desplazamiento y los espectros para el desplazamiento de Diseño y desplazamiento Máximo.

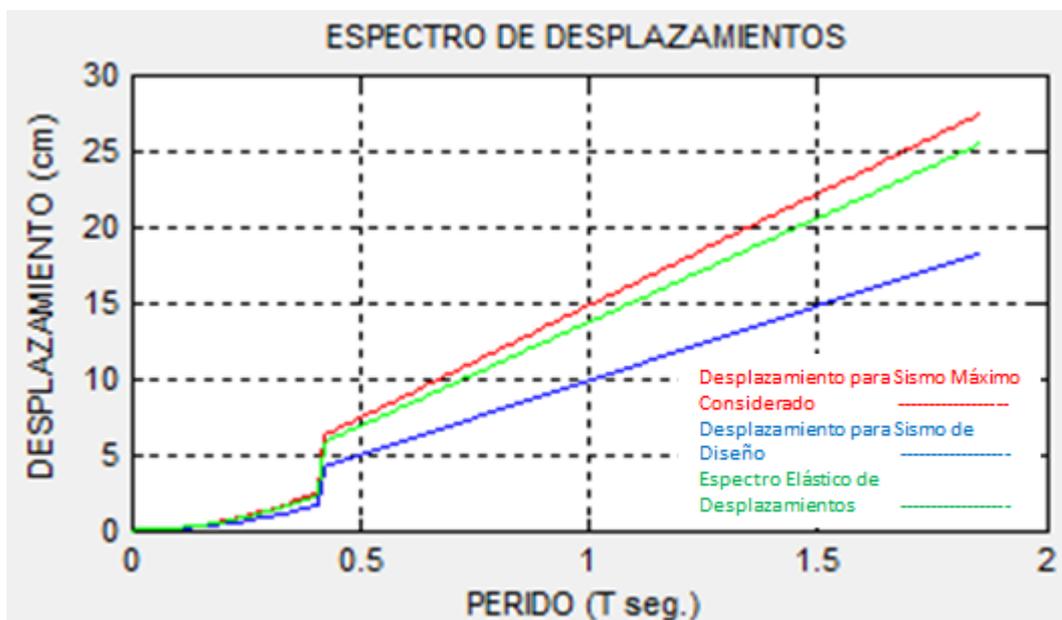


Figura 41: Espectros de desplazamientos.

Para este ejemplo el valor del desplazamiento de diseño es de 18.18 cm y el desplazamiento máximo 27.28 cm.

Con el valor del desplazamiento de diseño se procede a calcular los puntos para graficar la curva de histéresis.

Punto 1 (P1) = origen de coordenadas (0 ; 0)

Punto 2 (P2) = (D_y ; F_y)

$$Q = \frac{\pi \beta_{eff} k_p D^2}{(2 - \pi \beta_{eff})D - 2D_y} \quad (5.24)$$

$D_y = 2.5\text{cm}$

$\beta_{eff} = 15\%$

$$k_p = \frac{G * A}{T_r}$$

$$k_p = \frac{7.14 * 1963.50}{30}$$

$$k_p = 467.312 \text{ Kg/cm}$$

$$Q = \frac{\pi * 0.15 * 467.312 * (10)^2}{(2 - \pi * 0.15) * 10 - 2 * 2.5}$$

$$Q = 3193.74 \text{ Kg}$$

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (5.25)$$

$$F_y = 3193.74 + 467.312 * 2.5$$

$$F_y = 4362.02 \text{ Kg}$$

Punto 3 (P3) = (D ; F_{max})

$$F_{max} = Q + k_p D \quad (5.26)$$

$$F_{max} = 3193.74 + 467.312 * 18.1834$$

$$F_{max} = 11691.1 \text{ Kg}$$

Punto 4 (P4) = (x₁ ; y₁)

$$x_1 = \frac{F_{max} + Q - k_e D}{k_p - k_e} \quad (5.29)$$

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

$$k_e = \frac{4362.02}{2.5}$$

$$k_e = 1744.81 \text{ Kg/cm}$$

$$x_1 = \frac{11691.1 + 3193.74 - 1744.81 * 18.1834}{467.312 - 1744.81}$$

$$x_1 = 13.18 \text{ cm}$$

$$y_1 = k_p x - Q$$

$$y_1 = 467.312 * 13.18 - 3193.74$$

$$y_1 = 2965.43 \text{ Kg}$$

Punto 5 (P5) = (- D ; - F_{max})

$$P5 = (-18.18, -11691.1)$$

Punto 6 (P6) = (x₂ ; y₂)

$$P6 = (-13.18, -2965.43)$$

Punto 7 (P7) = (0 ; Q)

$$P7 = (0, 3193.74)$$

En la figura 42, se puede observar el diagrama de histéresis que se obtiene al graficar los 7 puntos obtenidos.

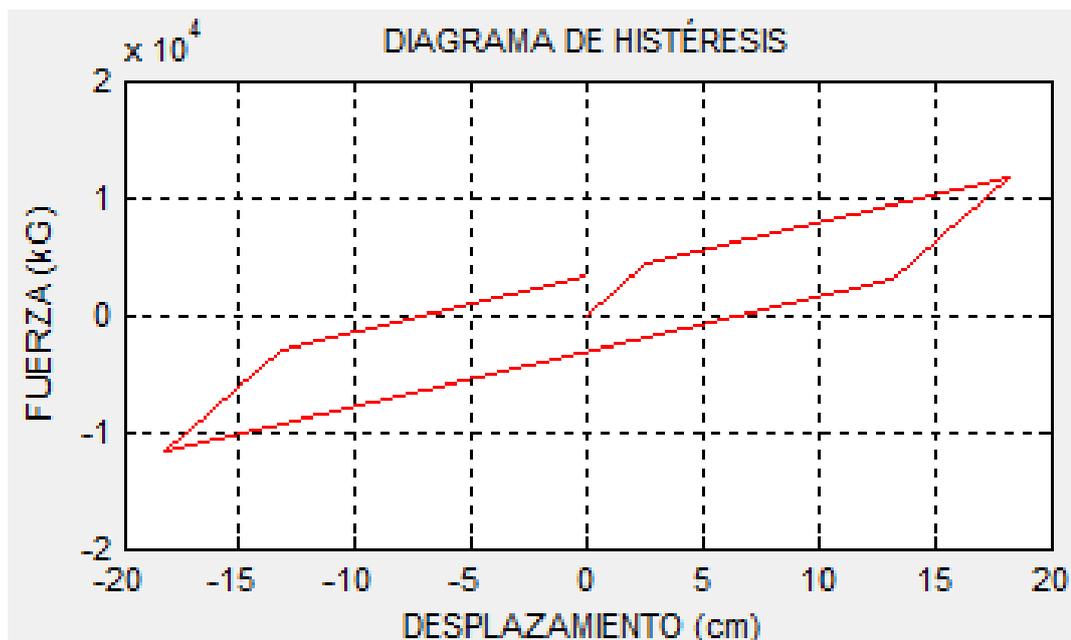


Figura 42: Diagrama de histéresis.

- **Propiedades Dinámicas del Aislador.**

Rigidez efectiva.

$$K_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (5.32)$$

$$K_{eff} = 467.312 + \frac{3193.74}{18.18}$$

$$K_{eff} = 642.952 \text{ Kg/cm}$$

Periodo efectivo.

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{K_{eff} * g}} \quad (5.33)$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{55000}{642.952 * 981}}$$

$$T_{eff} = 1.86 \text{ seg.}$$

Amortiguamiento efectivo.

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5.34)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2 * 3193.74 * (18.18 - 2.5)}{\pi * 642.952 * 18.18^2}$$

$$\beta_{eff} = 0.15$$

Carga Crítica.

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD^4}{tT_r} \quad (5.40)$$

$$P_{cr} = 0.218 \frac{7.14 * 50^4}{0.5 * 30}$$

$$P_{cr} = 648550 \text{ Kg}$$

▪ **Comprobación.**

Para este punto es necesario obtener los desplazamientos y giros en la base de la estructura con el aislador prediseñado. Estos valores se obtienen analizando la Estructura con la incorporación de los aisladores, el análisis se lo puede hacer ingresando el modelo en un software de cálculo estructural o también a mano mediante análisis matricial.

Sea el método que se use, se debe calcular la rigidez vertical del aislador.

- *Calculo del factor de forma S.*

$$S = \frac{\text{Area cargada}}{\text{Area libre de fuerzas}} \quad (5.10)$$

$$S = \frac{A}{\pi * D_e * t}$$

$$S = \frac{1963.50}{\pi * 50 * 0.5}$$

$$S = 25$$

- *Calculo del módulo de compresión E_c .*

$$E_c = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

$$E_c = \left(\frac{1}{6 * 7.14 * (25)^2} + \frac{4}{3 * 20400} \right)^{-1}$$

$$E_c = 9736.36 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Calculo de la rigidez vertical k_v .*

$$k_v = \frac{E_c A}{T_r} \quad (5.9)$$

$$k_v = \frac{9736.36 * 1963.5}{30}$$

$$k_v = 637244.762 \text{ Kg/cm}$$

Los desplazamientos y giros de la estructura se los pueden ver en la tabla 22, para encontrarlos se usó el programa ETABS, en la figura 43 se muestra la ubicación de los nudos correspondientes a la tabla 22; en el último ejemplo de aplicación se indica el procedimiento para realizar el diseño de aisladores elastoméricos usando el programa ETABS.

Tabla 22: Desplazamientos y giros en la base de la Estructura.

NUDOS	DESPLAZAMIENTOS (m)		ROTACIONES (rad)	
	x	y	x	y
1	-0.0003	-0.0003	-0.00012	0.00012
2	-0.0005	0	0	0.0002
3	-0.0005	0	0	0.0002
4	-0.0003	0.0003	0.00012	0.00012
5	0	-0.0005	-0.0002	0
6	0	0	-0.00001	0
7	0	0	0.00001	0
8	0	0.0005	0.0002	0
9	0.0003	-0.0003	-0.00012	-0.00012
10	0.0005	0	0	-0.0002
11	0.0005	0	0	-0.0002
12	0.0003	0.0003	0.00012	-0.00012

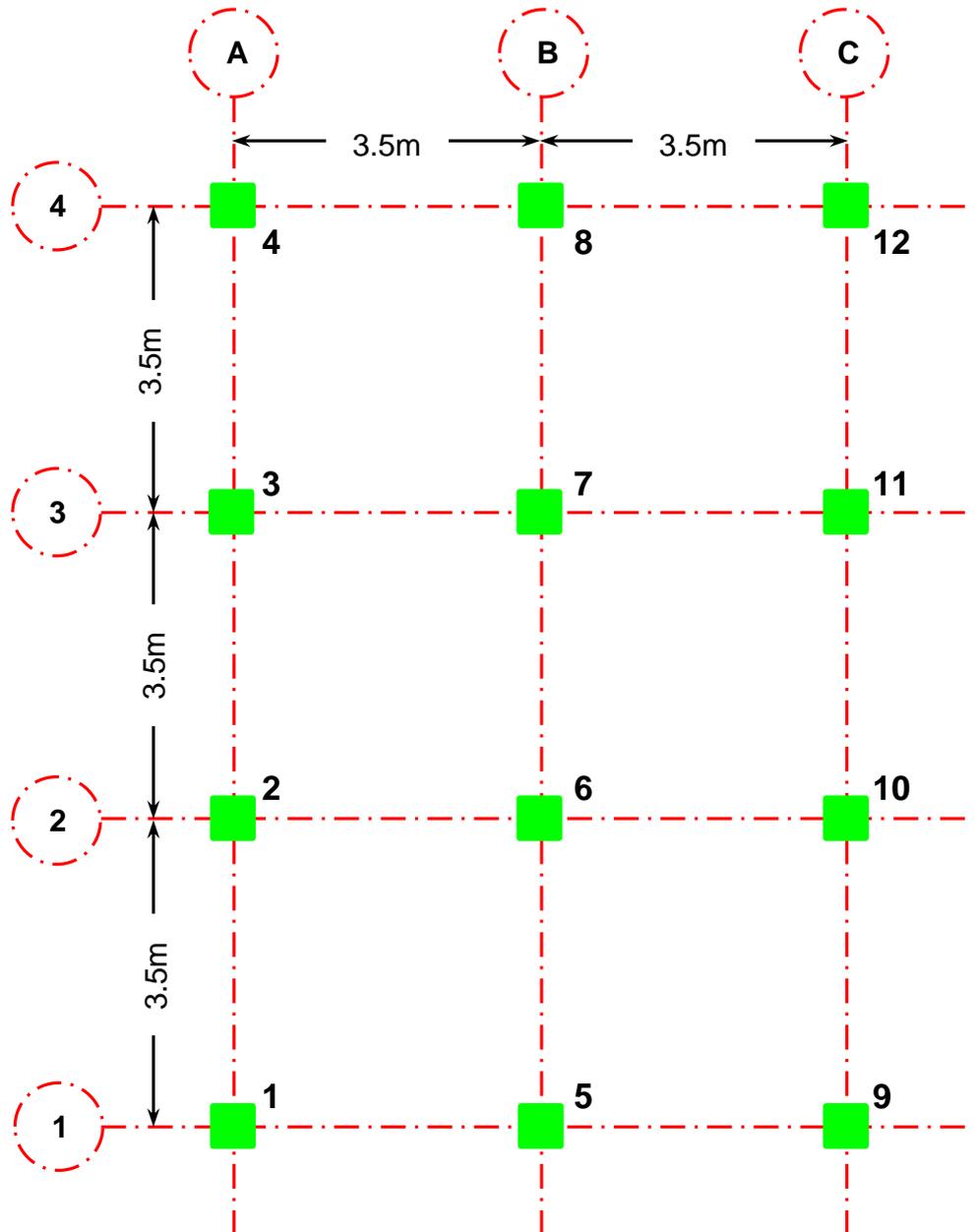


Figura 43: Ubicación de los nudos en la base de la estructura.

A demás se debe encontrar los factores f_1 y f_2 en función del factor de forma S y el modulo volumétrico K , para ello se utilizan las tablas 7 y 14 respectivamente, para este ejemplo $f_1=1.49$ y $f_2=0.25$.

La comprobación se realiza para los tres estados de carga definidos en la tabla 6, comprobación para cargas de servicio, Sismo de Diseño y Sismo Máximo Considerado.

Comprobación para Cargas de Servicio.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$P = 52.48T$.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

$h = 41.8$ cm (Altura del núcleo del Aislador).

- *Calculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{0.05}{50} \right)$$

$$\delta = 3.14$$

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$A_r = \frac{50^2}{4} (3.14 - \sin(3.14))$$

$$A_r = 1961.50 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{ccs} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.67)$$

$$\gamma_{ccs} = \frac{52.48 * 1000}{1961.50 * 7.14 * 25} * 1.49$$

$$\gamma_{ccs} = 0.22$$

- *Deformación por rotación:*

$$\gamma_{rcs} = \frac{L^2 (\theta_{st} + \theta)}{t T_r} \cdot f_2 \quad (5.68)$$

$$\gamma_{rcs} = \frac{50^2 (0.005 + 0.0002)}{0.5 * 30} * 0.25$$

$$\gamma_{rcs} = 0.22$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{T_r} \quad (5.69)$$

$$\gamma_{scs} = \frac{0.05}{30}$$

$$\gamma_{scs} = 0.0017$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\frac{P_u}{A_r G S} * f_1 \leq 3.5 \quad (5.70)$$

$$\frac{52.48 * 1000}{1961.50 * 7.14 * 25} * 1.49 \leq 3.5$$

$$0.22 < 3.5 \text{ OK}$$

$$\gamma_{ccs} + \gamma_{scs} + \gamma_{rcs} \leq 6 \quad (5.71)$$

$$0.22 + 0.22 + 0.0017 \leq 6$$

$$0.4417 < 6 \text{ OK}$$

$$t_s \geq 1.9 \text{ mm} \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

$$t_s = \frac{1.65 * 0.5}{1.08 * 4200 * \frac{1961.50}{52.48 * 1000} - 2}$$

$$t_s = 0.05 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 2 \text{ mm}$ está correcto.

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (5.42)$$

$$P'_{cr} = 648550 * \frac{1961.50}{1963.50}$$

$$P'_{cr} = 647889.39$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0 \quad (5.73)$$

$$\frac{647889.39}{52480} \geq 2.0$$

$$12.34 \geq 2.0 \quad \mathbf{OK}$$

Comprobación para Sismo de Diseño.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$D_{DE} = 18.18$ cm (Desplazamiento por sismo de Diseño).

$P = 66.39T$.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

- *Cálculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta = 0.05 + D_{DE}$$

$$\Delta = 0.05 + 18.18$$

$$\Delta = 18.23$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{18.23}{50} \right)$$

$$\delta = 2.39$$

$$A_r = \frac{D_e^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$A_r = \frac{50^2}{4} (2.39 - \sin(2.39))$$

$$A_r = 1066.99 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{cDE} = \frac{P_u}{A_r GS} \cdot f_1 \quad (5.74)$$

$$\gamma_{cDE} = \frac{66.39 * 1000}{1066.99 * 7.14 * 25} * 1.49$$

$$\gamma_{cDE} = 0.52$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{sDE} = \frac{\Delta + \Delta_{DE}}{T_r} \quad (5.75)$$

$$\gamma_{sDE} = \frac{0.05 + 18.18}{30}$$

$$\gamma_{sDE} = 0.61$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{cDE} + \gamma_{sDE} + 0.5\gamma_{rcs} \leq 7 \quad (5.76)$$

$$0.52 + 0.61 + 0.5 * 0.22 \leq 7$$

$$1.24 \leq 7 \quad \mathbf{OK}$$

$$t_s \geq 1.9mm \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

$$t_s = \frac{1.65 * 0.5}{1.08 * 4200 * \frac{1066.99}{66.39 * 1000} - 2}$$

$$t_s = 0.12 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 2\text{mm}$ está correcto.

Comprobación para Sismo Máximo Considerado.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$D_{MCE} = 27.28$ cm (Desplazamiento por sismo Máximo Considerado).

$P = 72.96$ T.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

- *Calculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta = 0.05 + D_{MCE}$$

$$\Delta = 0.05 + 27.28$$

$$\Delta = 27.33$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{27.33}{50} \right)$$

$$\delta = 1.98$$

$$A_r = \frac{D_e^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$A_r = \frac{50^2}{4} (1.98 - \sin(1.98))$$

$$A_r = 664.10 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{CMCE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.77)$$

$$\gamma_{CMCE} = \frac{72.96 * 1000}{664.10 * 7.14 * 25} * 1.49$$

$$\gamma_{CMCE} = 0.92$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.5\Delta + \Delta_{MCE}}{T_r} \quad (5.78)$$

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.5 * 0.05 + 27.28}{30}$$

$$\gamma_{SMCE} = 0.91$$

- *Comprobación por Pandeo:*

$$P'_{crMCE} \geq 0.15P_{cr} \quad (5.79)$$

$$P'_{crMCE} = 648550 * \frac{664.10}{1963.50}$$

$$P'_{crMCE} = 219354.24 \text{ Kg}$$

$$0.15P_{cr} = 0.15 * 648550$$

$$0.15P_{cr} = 97282.5 \text{ Kg}$$

$$219354.24.25 \text{ Kg} > 97282.5 \text{ Kg} \text{ OK}$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{CMCE} + \gamma_{SMCE} + \gamma_{rcs} \leq 9 \quad (5.80)$$

$$0.92 + 0.91 + 0.22 \leq 9$$

$$2.05 < 9 \text{ OK}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1 \quad (5.81)$$

$$\frac{219354.24}{72.96 * 1000} \geq 1.1$$

$$3.01 \geq 1.1 \text{ OK}$$

$$D_{cr} = \frac{PB}{K_{eff}h + P} \quad (5.49)$$

$$D_{cr} = \frac{72.96 * 1000 * 50}{642.952 * 41.8 + (72.96 * 1000)}$$

$$D_{cr} = 36.54 \text{ cm}$$

$$\frac{D_{cr}}{0.5\Delta + \Delta_{MCE}} \geq 1.1 \quad (5.82)$$

$$\frac{36.54}{0.5 * 0.05 + 27.28} \geq 1.1$$

$$1.34 > 1.1 \text{ OK}$$

Después de realizar las comprobaciones para los tres casos, se puede ver que las dimensiones propuestas para el aislador cumplen con todos los parámetros.

Por lo tanto el aislador, se puede mandar a fabricar con las dimensiones establecidas, para finalizar con el diseño se calcula las dimensiones de las placas de montaje, proceso que se muestra a continuación.

Procedimiento de Área Reducida.

Para este método se usa los datos obtenidos en la comprobación para Sismo Máximo Considerado.

- *Calculo de la dimensión **b** del área reducida rectangular equivalente*

$$b = \frac{A_r}{0.75L} \quad (5.52)$$

$$b = \frac{664.10}{0.75 * 50}$$

$$b = 17.71 \text{ cm}$$

- *Calculo de la resistencia del hormigón en el apoyo.*

$$f_b = 1.7\phi_c f'_c \quad (5.53)$$

$$f_b = 1.7 * 1 * 210$$

$$f_b = 357 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Calculo la dimensión b_1 del área de carga del hormigón.*

$$b_1 = \frac{P}{0.75L f_b} \quad (5.54)$$

$$b_1 = \frac{72.96 * 1000}{0.75 * 50 * 357}$$

$$b_1 = 5.45 \text{ cm}$$

- *Calculo del brazo de palanca.*

$$r = \frac{b_1 - b}{2} \quad (5.55)$$

$$r = \frac{5.45 - 17.71}{2}$$

$$r = -6.13 \text{ cm}$$

- *Calculo del momento generado en el apoyo.*

$$M_u = \frac{f_b r^2}{2} \quad (5.56)$$

$$M_u = \frac{357 * (-6.13)^2}{2}$$

$$M_u = 6707.48 \text{ Kg.cm}$$

- *Calculo del espesor de la placa de montaje.*

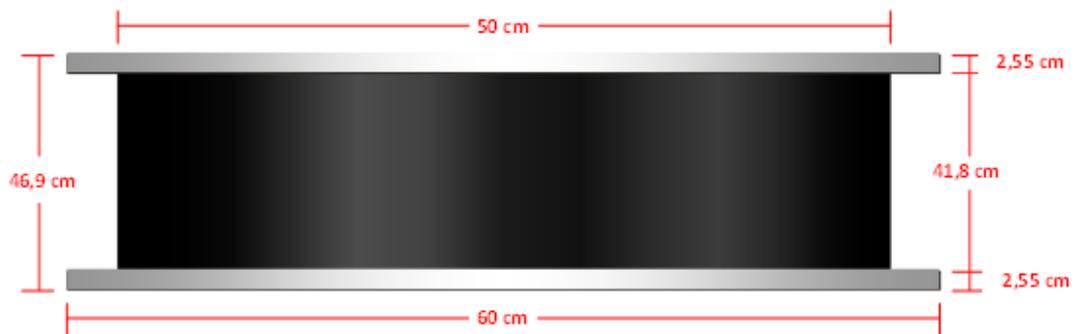
$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4M_u}{\phi_b F_y}} \quad (5.57)$$

$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4 * 6707.48}{1 * 4200}}$$

$$t_{es} \geq 2.53 \text{ cm}$$

$$t_{es} \geq 25.3 \text{ mm}$$

Adopto un espesor $t_{es}=25.5\text{mm}$, con esto las dimensiones finales del aislador se muestran a continuación en la figura 44.



ESQUEMA DE LA PARTE INTERNA DEL NÚCLEO DEL AISLADOR

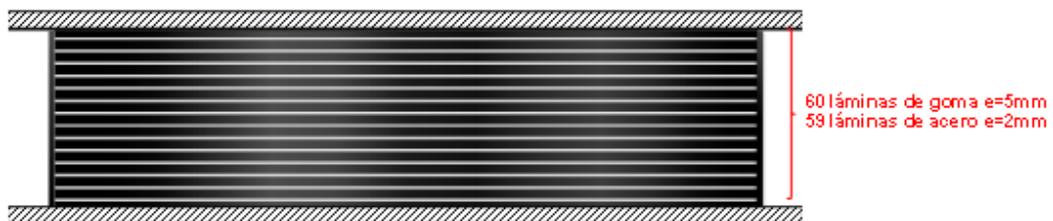


Figura 44: Dimensiones finales y Esquema interior del núcleo del Aislador.

EJEMPLO 2. Aislador Elastomérico con núcleo de plomo (LRB).**Enunciado del Ejemplo.**

En base a los datos del primer ejercicio se pide diseñar un aislador sísmico elastomérico con núcleo de plomo de forma circular. Se considera para este caso un módulo de corte del Plomo $G_{LEAD} = 100 \text{ Kg/cm}^2$.

Solución.

El procedimiento a seguir para el diseño de este aislador es el mismo que se empleó en el ejemplo 1, y se muestran a continuación:

- Obtener las características del Proyecto.
- Escoger el tipo de Aislador a diseñar.
- Establecer las características de los materiales.
- Establecer la geometría del Aislador (forma).
- Realizar un pre-dimensionamiento y obtener la curva de Histéresis.
- Obtener las propiedades dinámicas.
- Comprobar el diseño del Aislador.

▪ Características del proyecto:

Se utiliza la tabla 21 del ejemplo 1, añadiendo a esta los desplazamientos por sismo de diseño, y por sismo máximo considerado.

▪ Tipo de Aislador a utilizar:

Se escoge un aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

- **Propiedades de los Materiales del Aislador:**

$$K = 20400 \text{ Kg/cm}^2$$

$$G = 7.14 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$$

$$G_{LEAD} = 100 \text{ Kg/cm}^2$$

- **Geometría del Aislador:**

Se escoge un Aislador circular hueco.

- **Dimensionamiento Previo:**

Como se está utilizando los datos del ejemplo anterior se mantiene el diámetro exterior del Aislador y se calcula el diámetro del núcleo del plomo.

$$D_i = \frac{D_e}{5} \quad (5.22)$$

$$D_i = \frac{50}{5}$$

$$D_i = 10 \text{ cm}$$

Con el diámetro ***D_i*** establecido se calcula el área del plomo

$$A_{LEAD} = \pi * \frac{D_i^2}{4}$$

$$A_{LEAD} = \pi * \frac{10^2}{4}$$

$$A_{LEAD} = 78.539 \text{ cm}^2$$

Altura total de las gomas.

Se asume una altura **Tr = 30cm.**

Número de láminas de goma.

Se impone un espesor $t = 5\text{mm}$, posteriormente se comprobara si el espesor es el adecuado.

$$\text{No. de capas de goma} = \frac{T_r}{t}$$

$$\text{No. de capas de goa} = \frac{30}{0.5}$$

$$\text{No. de capas de goma} = 60$$

Número de láminas de Acero de refuerzo.

$$\text{No. de capas de Acero} = \text{No. de capas de goma} - 1$$

$$\text{No. de capas de Acero} = 60 - 1$$

$$\text{No. de capas de Acero} = 59$$

▪ **Curva de Histéresis :**

Igual que en el ejemplo anterior, se impone un desplazamiento $D=10\text{cm}$, y se calcula la rigidez postfluencia k_p , la fuerza característica Q , la fuerza de fluencia F_y , la rigidez efectiva K_{eff} , y el periodo efectivo T_{eff} .

Después de realizar el proceso mencionado en el ejercicio 1 y las iteraciones correspondientes se obtiene los siguientes valores: 10.88 cm para el desplazamiento de diseño y 16.32 para desplazamiento máximo en la figura 45 se aprecia el espectro de desplazamiento elástico y los espectros de desplazamiento de diseño y desplazamiento máximo para este ejercicio.

A continuación se muestran los puntos calculados para la elaboración de la curva de histéresis.

Punto 1 (P1) = origen de coordenadas (0 ; 0)

Punto 2 (P2) = (D_y ; F_y)

$$Q = A_{LEAD} * G_{LEAD} \quad (5.31)$$

$$Q = 78.539 * 100$$

$$Q = 7853.98 \text{ Kg}$$

D_y = 2.5cm

$$k_p = \frac{G * A}{Tr}$$

$$k_p = \frac{7.14 * 1884.96}{30}$$

$$k_p = 448.62 \text{ Kg/cm}$$

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (5.25)$$

$$F_y = 7853.98 + 448.62 * 2.5$$

$$F_y = 8975.53 \text{ Kg}$$

Punto 3 (P3) = (D ; F_{max})

$$F_{max} = Q + k_p D \quad (5.26)$$

$$F_{max} = 7853.98 + 448.62 * 10.88$$

$$F_{max} = 12734.96 \text{ Kg}$$

Punto 4 (P4) = (x₁ ; y₁)

$$x_1 = \frac{F_{max} + Q - k_e D}{k_p - k_e} \quad (5.29)$$

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

$$k_e = \frac{8975.53}{2.5}$$

$$k_e = 3590.21 \text{ Kg/cm}$$

$$x_1 = \frac{12734.96 + 7853.98 - 3590.21 * 10.88}{448.62 - 3590.21}$$

$$x_1 = 5.88 \text{ cm}$$

$$y_1 = k_p x - Q$$

$$y_1 = 448.62 * 5.88 - 7853.98$$

$$y_1 = -5216.09 \text{ Kg}$$

Punto 5 (P5) = (- D ; - F_{max})

$$\mathbf{P5 = (-10.88 , -12734.96)}$$

Punto 6 (P6) = (x₂ ; y₂)

$$\mathbf{P6 = (-5.88 , 5216.09)}$$

Punto 7 (P7) = (0 ; Q)

$$\mathbf{P7 = (0 , 7853.98)}$$

En la figura 46, se puede observar el diagrama de histéresis que se obtiene al graficar los 7 puntos obtenidos.

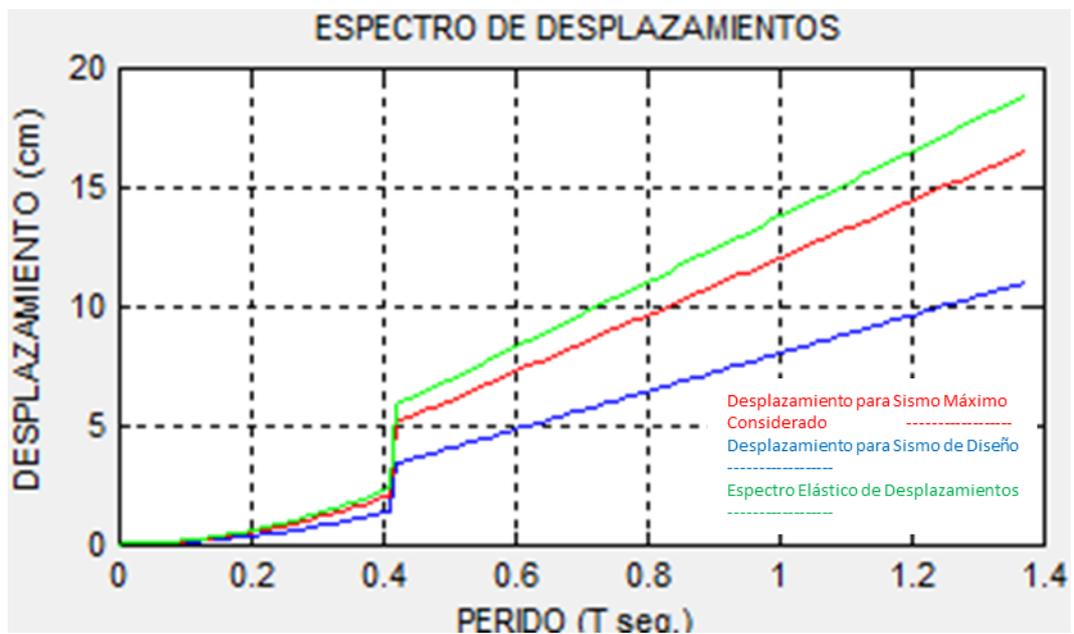


Figura 45: Espectro de Desplazamientos.

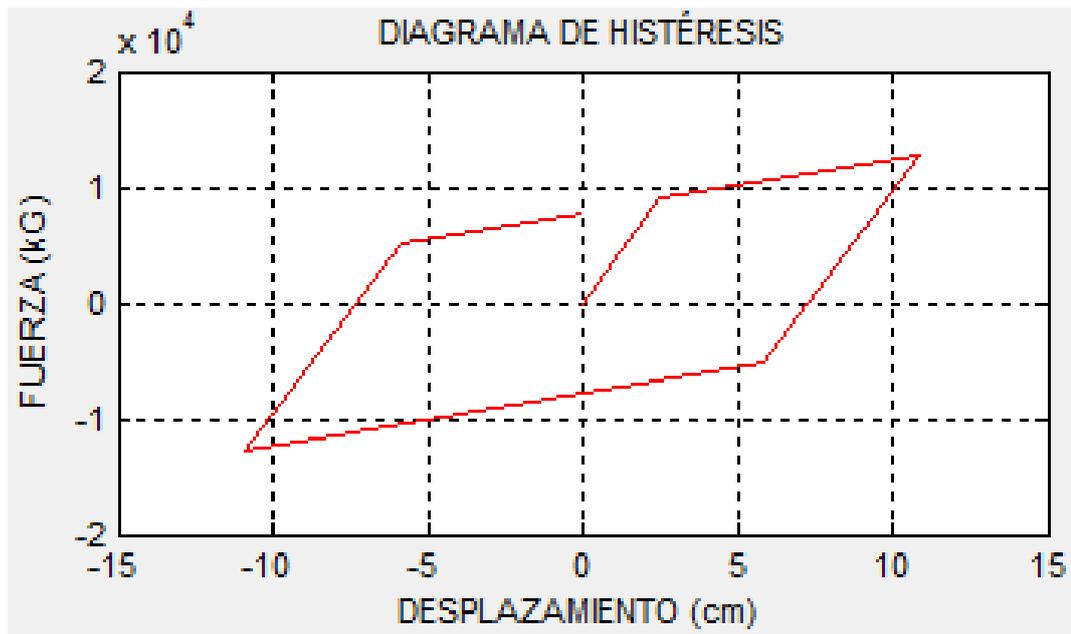


Figura 46: Diagrama de Histéresis del Aislador LRB.

- Propiedades Dinámicas del Aislador.

Rigidez efectiva.

$$K_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (5.32)$$

$$K_{eff} = 448.62 + \frac{7853.98}{10.88}$$

$$K_{eff} = 1170.49 \text{ Kg/cm}$$

Periodo efectivo.

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{K_{eff} * g}} \quad (5.33)$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{55000}{1170.49 * 980}}$$

$$T_{eff} = 1.376 \text{ seg.}$$

Amortiguamiento efectivo.

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5.34)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2 * 7853.98 * (10.88 - 2.5)}{\pi * 1170.49 * 10.88^2}$$

$$\beta_{eff} = 0.302$$

El factor de reduccion **B** se lo calcula con la ecuación 5.83.

$$B = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05} \right)^{0.3} \quad (5.83)$$

$$B = \left(\frac{0.302}{0.05} \right)^{0.3}$$

$$B = 1.72$$

Carga Crítica.

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD_e^4 \left(1 - \frac{D_i}{D_e}\right) \left(1 - \frac{D_i^2}{D_e^2}\right)}{tT_r \left(1 + \frac{D_i^2}{D_e^2}\right)} \quad (5.41)$$

$$P_{cr} = 0.218 * \frac{7.14 * 50^4 * \left(1 - \frac{10}{50}\right) * \left(1 - \frac{10^2}{50^2}\right)}{0.5 * 30 * \left(1 + \frac{10^2}{50^2}\right)}$$

$$P_{cr} = 478929.23 \text{ Kg}$$

▪ **Comprobación.**

- *Calculo del factor de forma S.*

$$S = \frac{\text{Area cargada}}{\text{Area libre de fuerzas}} \quad (5.10)$$

$$S = \frac{A}{\pi * D_e * t}$$

$$S = \frac{1884.96}{\pi * 50 * 0.5}$$

$$S = 24$$

- *Calculo del módulo de compresión E_c .*

$$E_c = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

$$E_c = \left(\frac{1}{6 * 7.14 * (24)^2} + \frac{4}{3 * 20400} \right)^{-1}$$

$$E_c = 9444.21 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Calculo de la rigidez vertical K_v .*

$$k_v = \frac{E_c A}{T_r} \quad (5.9)$$

$$k_v = \frac{9444.21 * 1884.96}{30}$$

$$k_v = 593398.60 \text{ Kg/cm}$$

Los desplazamientos y giros se toman de la tabla 22 del ejemplo anterior.

Para encontrar los factores f_1 y f_2 se utilizan las tablas 9 y 16, para ello se encuentra la relación D_e/D_i :

$$\frac{D_e}{D_i} = \frac{50}{10}$$

$$\frac{D_e}{D_i} = 5$$

Con el valor de la relación D_e/D_i , el factor de forma $S = 24$ y el modulo volumétrico $K = 2000 \text{ MPa}$, los valores son $f_1=1.626$ y $f_2=0.144$.

Comprobación para Cargas de Servicio.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$P = 52.48T$.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

$h = 41.8$ cm (Altura del núcleo del Aislador).

- *Calculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{0.05}{50} \right)$$

$$\delta = 3.14$$

$$A_r = A \left(\frac{\delta - \sin \delta}{\pi} \right) \quad (5.46)$$

$$A_r = 1884.96 \left(\frac{3.14 - \sin(3.14)}{\pi} \right)$$

$$A_r = 1883.05 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{ccs} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.67)$$

$$\gamma_{ccs} = \frac{52.48 * 1000}{1883.05 * 7.14 * 24} * 1.626$$

$$\gamma_{ccs} = 0.26$$

- *Deformación por rotación:*

$$\gamma_{rcs} = \frac{L^2(\theta_{st} + \theta)}{t T_r} \cdot f_2 \quad (5.68)$$

$$\gamma_{rcs} = \frac{50^2(0.005 + 0.0002)}{0.5 * 30} * 0.144$$

$$\gamma_{rcs} = 0.125$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{T_r} \quad (5.69)$$

$$\gamma_{scs} = \frac{0.05}{30}$$

$$\gamma_{scs} = 0.0017$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\frac{P_u}{A_r G S} * f_1 \leq 3.5 \quad (5.70)$$

$$\frac{52.48 * 1000}{1883.05 * 7.14 * 24} * 1.626 \leq 3.5$$

$$0.26 < 3.5 \text{ OK}$$

$$\gamma_{ccs} + \gamma_{scs} + \gamma_{rcs} \leq 6 \quad (5.71)$$

$$0.26 + 0.125 + 0.0017 \leq 6$$

$$0.3867 < 6 \text{ OK}$$

$$t_s \geq 1.9 \text{ mm} \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{3t}{1.08 F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.51)$$

$$t_s = \frac{3 * 0.5}{1.08 * 4200 * \frac{1883.05}{52.48 * 1000} - 2}$$

$$t_s = 0.093 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 2 \text{ mm}$ está correcto.

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (5.42)$$

$$P'_{cr} = 478929.23 * \frac{1883.05}{1884.96}$$

$$P'_{cr} = 478443.94$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0 \quad (5.73)$$

$$\frac{478443.94}{52480} \geq 2.0$$

$$9.12 \geq 2.0 \quad \mathbf{OK}$$

Comprobación para Sismo de Diseño.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$D_{DE} = 10.88$ cm (Desplazamiento por sismo de Diseño).

$P = 66.39T$.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

- *Cálculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta = 0.05 + D_{DE}$$

$$\Delta = 0.05 + 10.88$$

$$\Delta = 10.93$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{10.93}{50} \right)$$

$$\delta = 2.70$$

$$A_r = A \left(\frac{\delta - \sin \delta}{\pi} \right) \quad (5.46)$$

$$A_r = 1884.96 \left(\frac{2.70 - \sin(2.70)}{\pi} \right)$$

$$A_r = 1363.57 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{cDE} = \frac{P_u}{A_r GS} \cdot f_1 \quad (5.74)$$

$$\gamma_{cDE} = \frac{66.39 * 1000}{1363.57 * 7.14 * 24} * 1.626$$

$$\gamma_{cDE} = 0.46$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{sDE} = \frac{\Delta + \Delta_{DE}}{T_r} \quad (5.75)$$

$$\gamma_{sDE} = \frac{0.05 + 10.88}{30}$$

$$\gamma_{sDE} = 0.36$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{cDE} + \gamma_{sDE} + 0.5\gamma_{rcs} \leq 7 \quad (5.76)$$

$$0.46 + 0.36 + 0.5 * 0.125 \leq 7$$

$$0.88 \leq 7 \quad \mathbf{OK}$$

$$t_s \geq 1.9mm \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{3t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.51)$$

$$t_s = \frac{3 * 0.5}{1.08 * 4200 * \frac{1363.57}{66.39 * 1000} - 2}$$

$$t_s = 0.16 mm$$

Como se asumió un $t_s = 2mm$ está correcto.

Comprobación para Sismo Máximo Considerado.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$D_{MCE} = 16.32$ cm (Desplazamiento por sismo Máximo Considerado).

$P = 72.96$ T.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

- *Calculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta = 0.05 + D_{MCE}$$

$$\Delta = 0.05 + 16.32$$

$$\Delta = 16.37$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{16.37}{50} \right)$$

$$\delta = 2.47$$

$$A_r = A \left(\frac{\delta - \sin \delta}{\pi} \right) \quad (5.46)$$

$$A_r = 1884.96 \left(\frac{2.47 - \sin(2.47)}{\pi} \right)$$

$$A_r = 1108.66 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{CMCE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.77)$$

$$\gamma_{MCE} = \frac{72.96 * 1000}{1108.66 * 7.14 * 24} * 1.626$$

$$\gamma_{MCE} = 0.62$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.5\Delta + \Delta_{MCE}}{T_r} \quad (5.78)$$

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.5 * 0.05 + 16.32}{30}$$

$$\gamma_{SMCE} = 0.54$$

- *Comprobación por Pandeo:*

$$P'_{crMCE} \geq 0.15P_{cr} \quad (5.79)$$

$$P'_{crMCE} = 478929.23 * \frac{1108.66}{1884.96}$$

$$P'_{crMCE} = 281687.50 \text{ Kg}$$

$$0.15P_{cr} = 0.15 * 478929.23$$

$$0.15P_{cr} = 71839.38 \text{ Kg}$$

$$281687.50 \text{ Kg} > 71839.38 \text{ Kg} \text{ OK}$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{MCE} + \gamma_{SMCE} + \gamma_{rcs} \leq 9 \quad (5.80)$$

$$0.62 + 0.54 + 0.125 \leq 9$$

$$1.285 < 9 \text{ OK}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1 \quad (5.81)$$

$$\frac{281687.50}{72.96 * 1000} \geq 1.1$$

$$3.86 \geq 1.1 \text{ OK}$$

$$D_{cr} = \frac{PB}{K_{eff}h + P} \quad (5.49)$$

$$D_{cr} = \frac{72.96 * 1000 * 50}{1170.49 * 41.8 + (72.96 * 1000)}$$

$$D_{cr} = 29.93 \text{ cm}$$

$$\frac{D_{cr}}{0.5\Delta + \Delta_{MCE}} \geq 1.1 \quad (5.82)$$

$$\frac{29.93}{0.5 * 0.05 + 16.32} \geq 1.1$$

$$1.83 > 1.1 \text{ OK}$$

Después de realizar las comprobaciones para los tres casos, se puede ver que las dimensiones propuestas para el aislador cumplen con todos los parámetros.

Por lo tanto el aislador, puede ser fabricado con las dimensiones establecidas, para finalizar con el diseño se calcula las dimensiones de las placas de montaje, proceso que se muestra a continuación.

Procedimiento de Área Reducida.

Para este método se usa los datos obtenidos en la comprobación para Sismo Máximo Considerado.

- *Calculo de la dimensión **b** del área reducida rectangular equivalente*

$$b = \frac{A_r}{0.75L} \quad (5.52)$$

$$b = \frac{1108.66}{0.75 * 50}$$

$$b = 29.56 \text{ cm}$$

- *Calculo de la resistencia del hormigón en el apoyo.*

$$f_b = 1.7\phi_c f'_c \quad (5.53)$$

$$f_b = 1.7 * 1 * 210$$

$$f_b = 357 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Calculo la dimensión b_1 del área de carga del hormigón.*

$$b_1 = \frac{P}{0.75L f_b} \quad (5.54)$$

$$b_1 = \frac{72.96 * 1000}{0.75 * 50 * 357}$$

$$b_1 = 5.45 \text{ cm}$$

- *Calculo del brazo de palanca.*

$$r = \frac{b_1 - b}{2} \quad (5.55)$$

$$r = \frac{5.45 - 29.56}{2}$$

$$r = -12.05 \text{ cm}$$

- *Calculo del momento generado en el apoyo.*

$$M_u = \frac{f_b r^2}{2} \quad (5.56)$$

$$M_u = \frac{357 * (-12.05)^2}{2}$$

$$M_u = 25918.65 \text{ Kg.cm}$$

- *Calculo del espesor de la placa de montaje.*

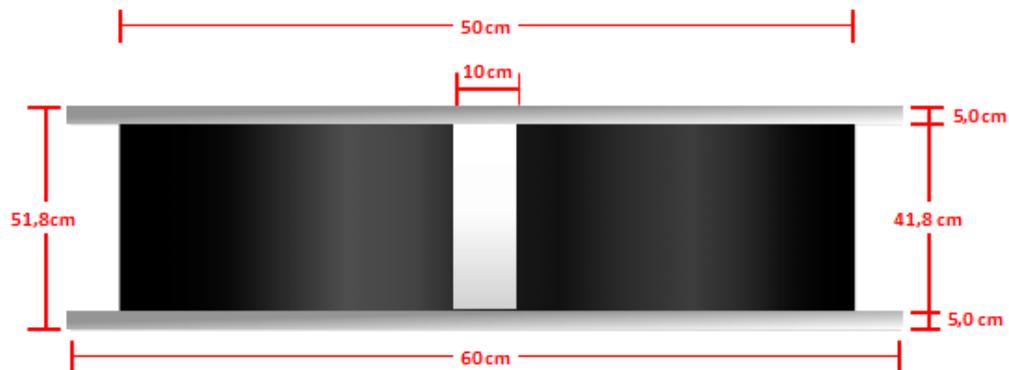
$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4M_u}{\phi_b F_y}} \quad (5.57)$$

$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4 * 25918.65}{1 * 4200}}$$

$$t_{es} \geq 4.97 \text{ cm}$$

$$t_{es} \geq 49.7 \text{ mm}$$

Como el cálculo del espesor da 49.7mm, se puede adoptar 50mm y las dimensiones finales del aislador se muestran a continuación en la figura 47.



ESQUEMA DE LA PARTE INTERNA DEL NÚCLEO DEL AISLADOR

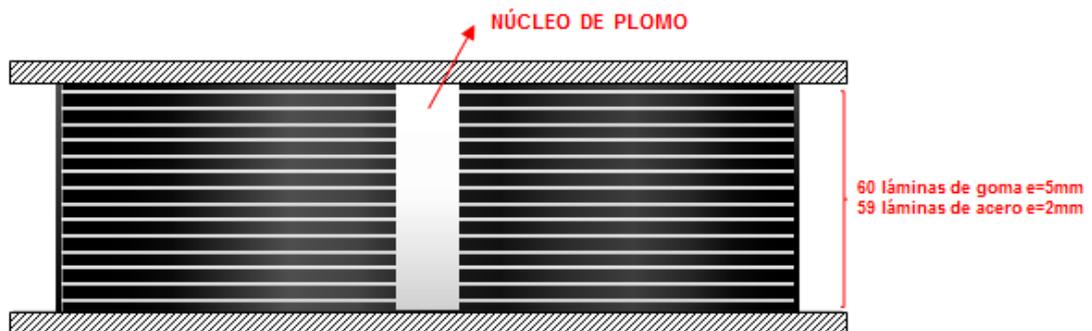


Figura 47: Dimensiones finales y Esquema interior del núcleo del Aislador.

EJEMPLO 3. Uso del programa ETABS en el diseño de un Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB)

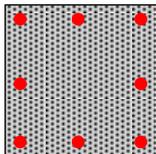
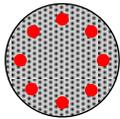
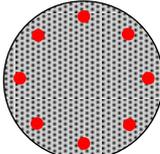
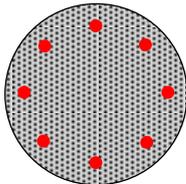
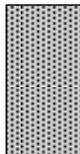
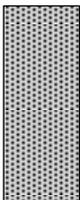
Enunciado del Ejemplo.

Se considera un edificio de Hormigón armado de 15 niveles (Figura 48), que se edificará en una zona sísmica V, el tipo de suelo presente en el lugar de construcción es tipo C. El edificio tendrá un uso residencial, la configuración tanto en planta como en elevación es irregular, la altura de entrepiso es de 4m. Las dimensiones del edificio se las muestra en la figuras 49, 50, 51 y 52.

La resistencia característica del Hormigón Armado, será de $f'c=350\text{Kg/cm}^2$, el esfuerzo de fluencia del acero $f_y=4200\text{Kg/cm}^2$, el módulo de elasticidad del hormigón al igual que en el ejemplo 1 se tomara $E_c=14000\sqrt{f'c} =261916.0171\text{ Kg/cm}^2$, con la finalidad de apegarse a la realidad ecuatoriana.

Las dimensiones de los elementos estructurales se muestran en la tabla 23 y la ubicación de los mismos en las figuras 53 y 54, las losas de entrepiso son macizas con un espesor de 17.5cm.

Tabla 23: Dimensiones de vigas y columnas del proyecto

C1	C2	C3	C4	V1	V2
60 x 60 cm	D = 50 cm	D = 80 cm	D = 90 cm	30 x 60 cm	30 x 80 cm
					

Para el diseño de los aisladores sísmicos se toma en cuenta un módulo volumétrico $K=40800\text{ Kg/cm}^2$, módulo de corte de la goma $G=6.171\text{ Kg/cm}^2$, y un

amortiguamiento $\beta=15\%$, el esfuerzo de fluencia para las láminas de acero de refuerzo es $f_y=4200\text{Kg/cm}^2$

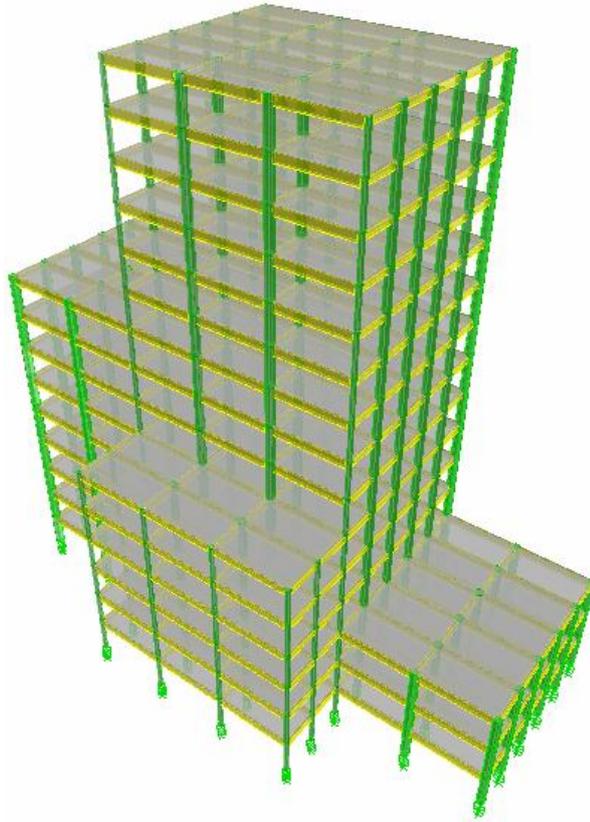


Figura 48: Edificio a ser aislado.

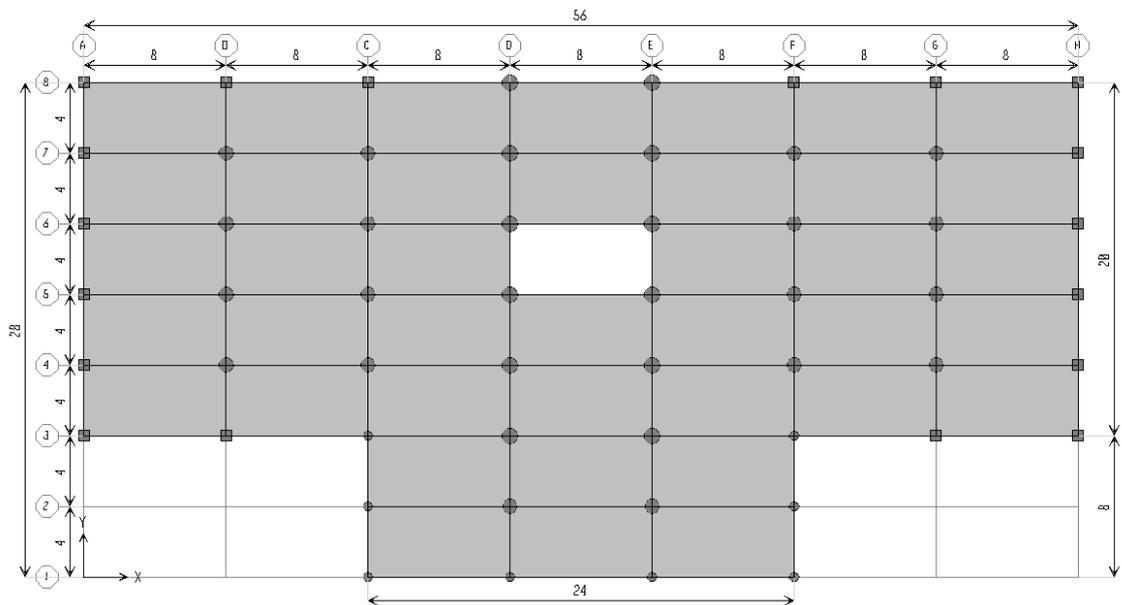
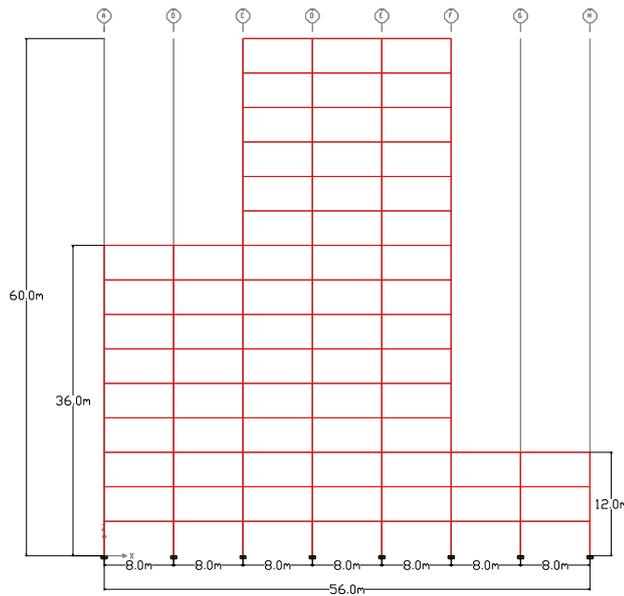


Figura 49: Dimensiones en planta.

PÓRTICOS 3-8



PÓRTICOS C-F

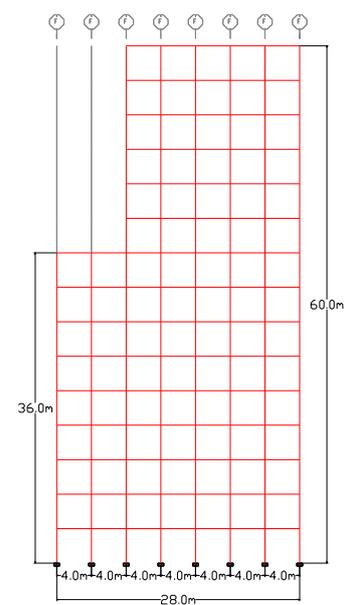
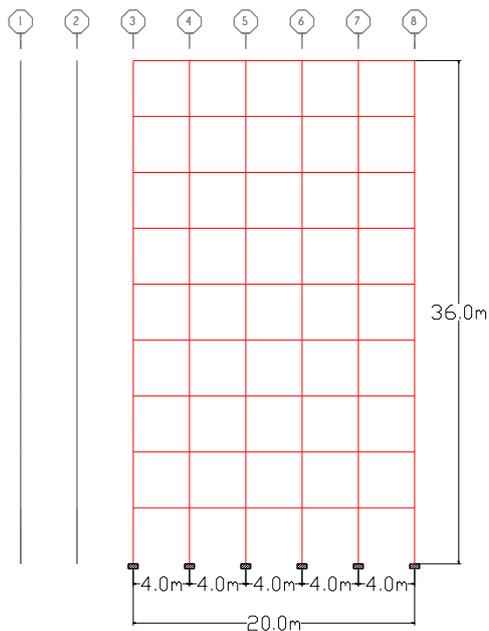


Figura 50: Dimensiones en Altura Pórticos 3-8 y Pórticos C-F.

PÓRTICOS A-B



PÓRTICOS G-H

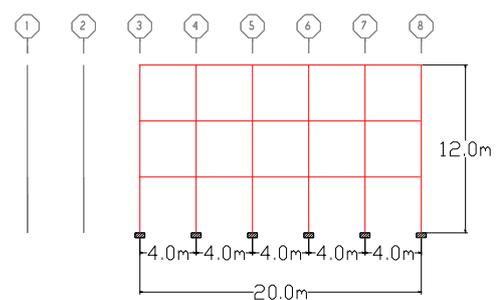


Figura 51: Dimensiones en Altura Pórticos A-B y Pórticos G-H.

PÓRTICOS 1-2

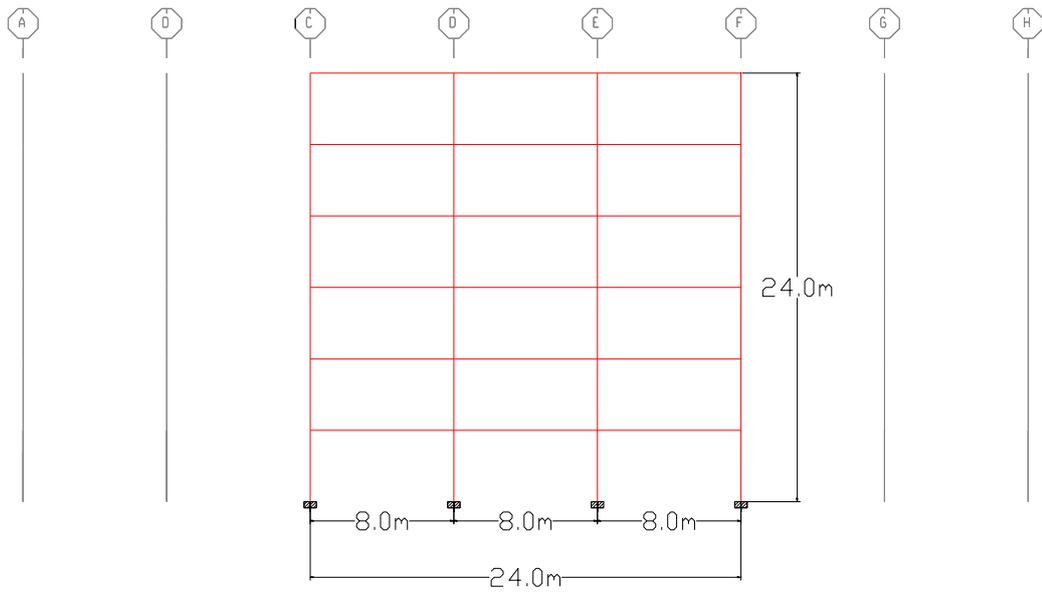


Figura 52: Dimensiones en Altura Pórticos 1-2.

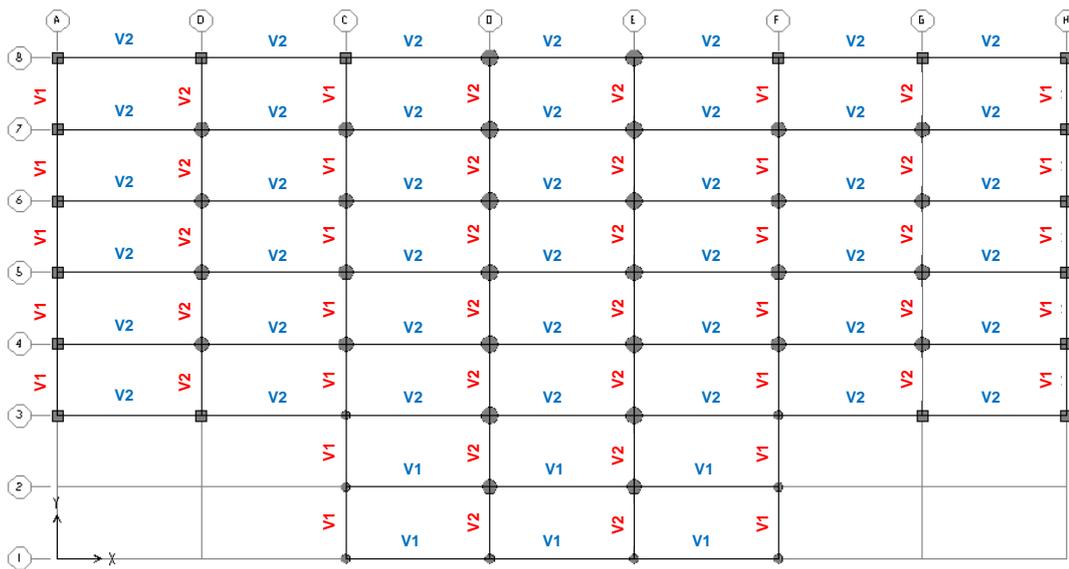


Figura 53: Ubicación de los elementos estructurales en el edificio

Vigas.

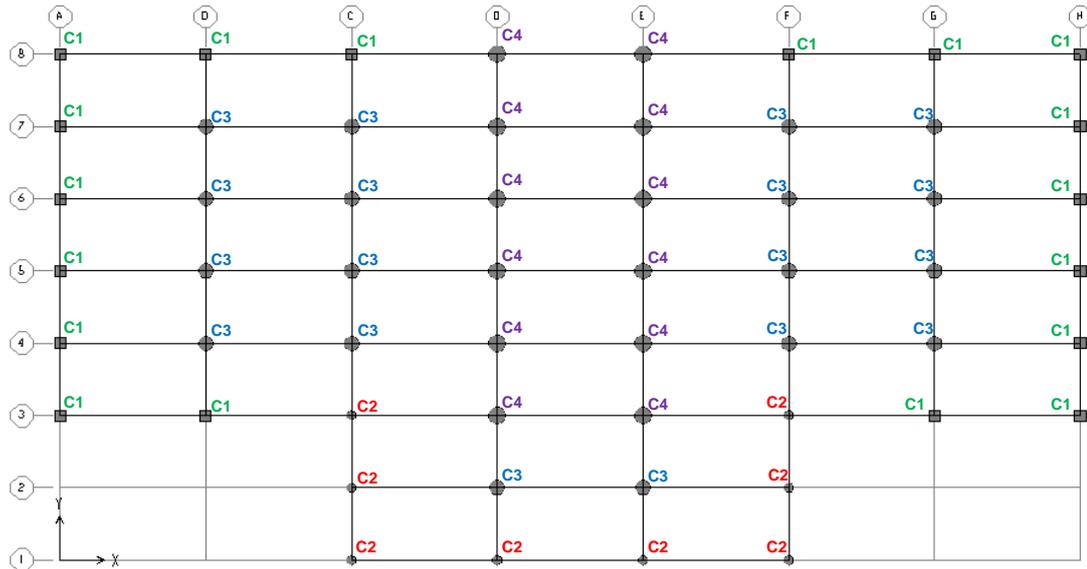


Figura 54: Ubicación de los elementos estructurales en el edificio
Columnas.

Solución.

Con las características del proyecto, se ingresa al programa ETABS (Figura 55).

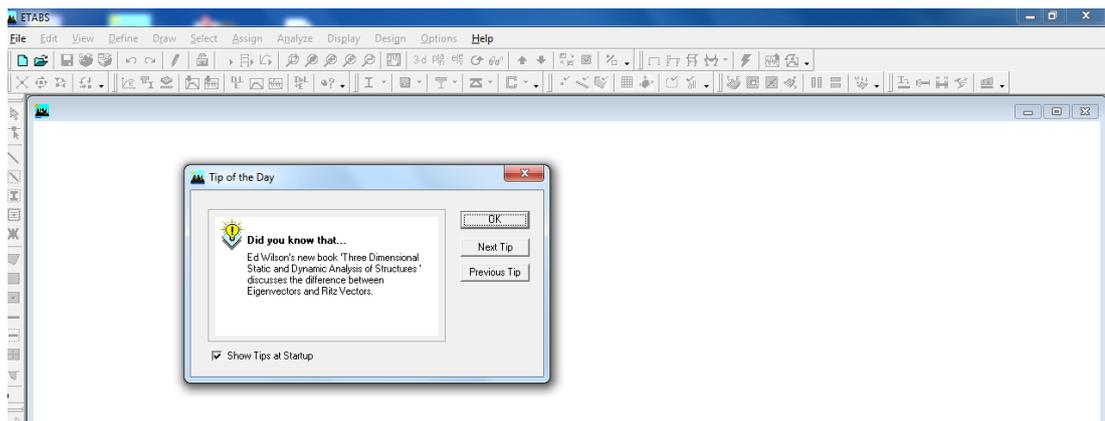


Figura 55: Ventana de Inicio del Programa

En la barra de menús se presiona el icono para crear un nuevo archivo, se desplegará una nueva ventana “New Model Initialization”, en la cual seleccionamos “No” (figura 56).

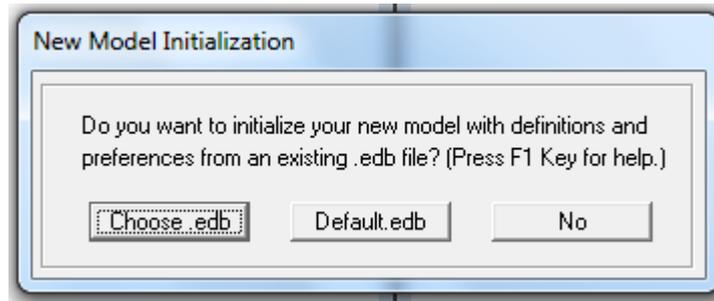


Figura 56: Ventana de Inicialización del nuevo modelo.

A continuación se define la grilla para crear el modelo (Figura 57), se ingresa los datos correspondientes a las líneas en sentido X, sentido Y, distancia entre ejes, número de pisos y las unidades en las que se va a trabajar, en este caso **T-m**, para agilizar el procedimiento se editan directamente las dimensiones en la ventana que se despliega utilizando las opciones **“Custom Grid Spacing”**, **“Edit Grid”** y **“Custom Story Data”**, **“Edit Story Data”**.

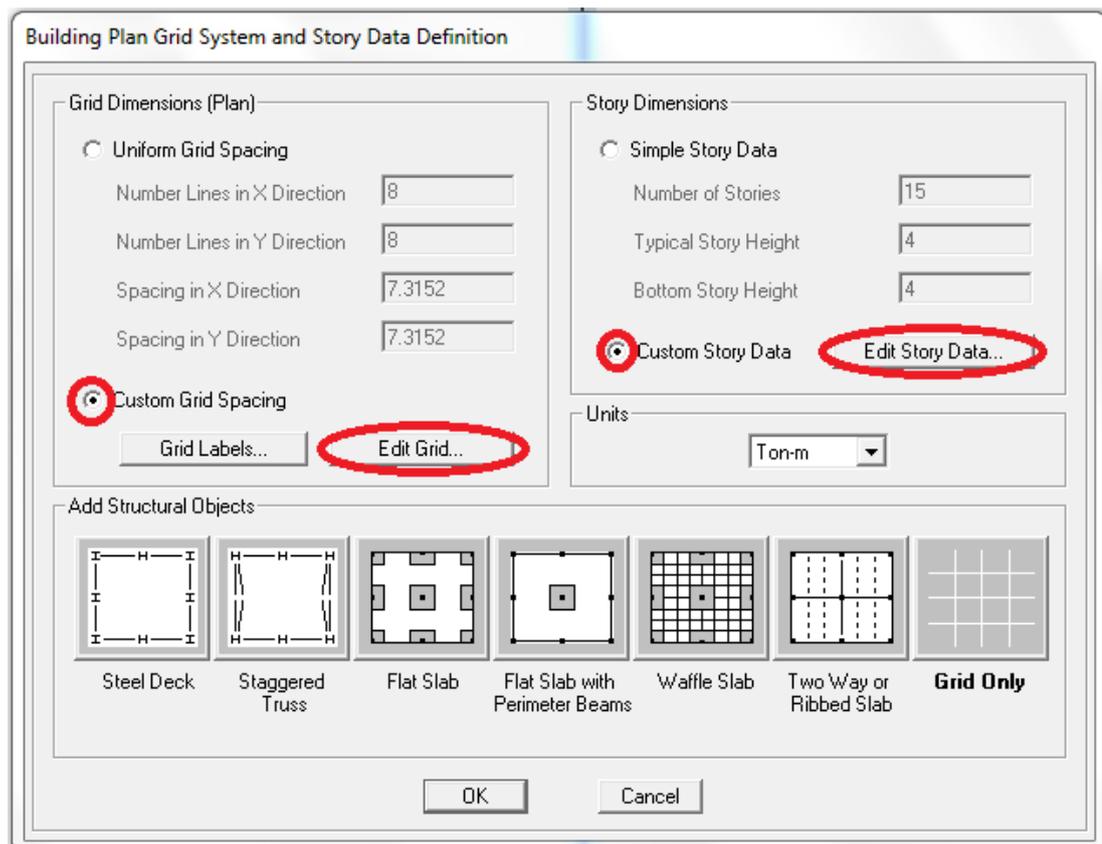


Figura 57: Ventana para definir y editar el sistema de grilla.

Editada la grilla se presiona “OK” y se genera una ventana en la cual se muestran los ejes para la construcción del modelo (Figura 58).

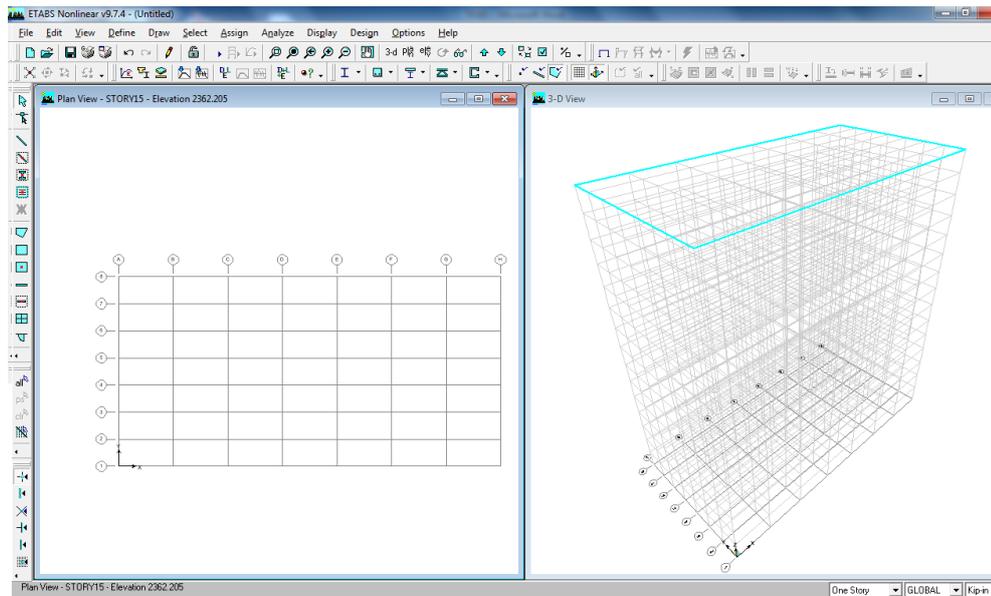


Figura 58: Grilla editada y generada.

Mediante el menú “Define” en la barra de menús se define el material a utilizar (Figura 59), las secciones de las columnas y vigas (Figura 60), y las losas (Figura 61).

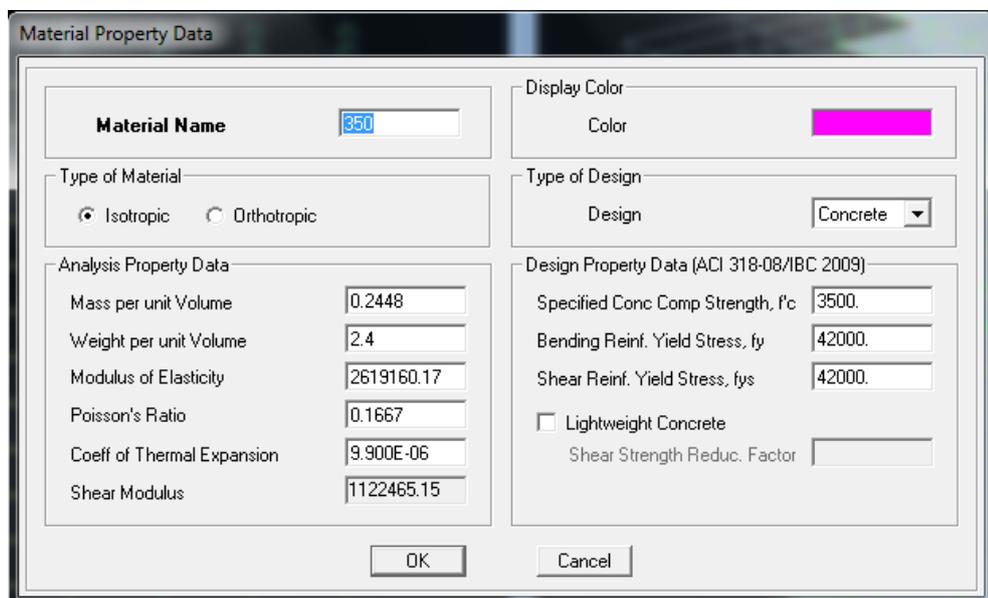


Figura 59: Ventana para editar el material.

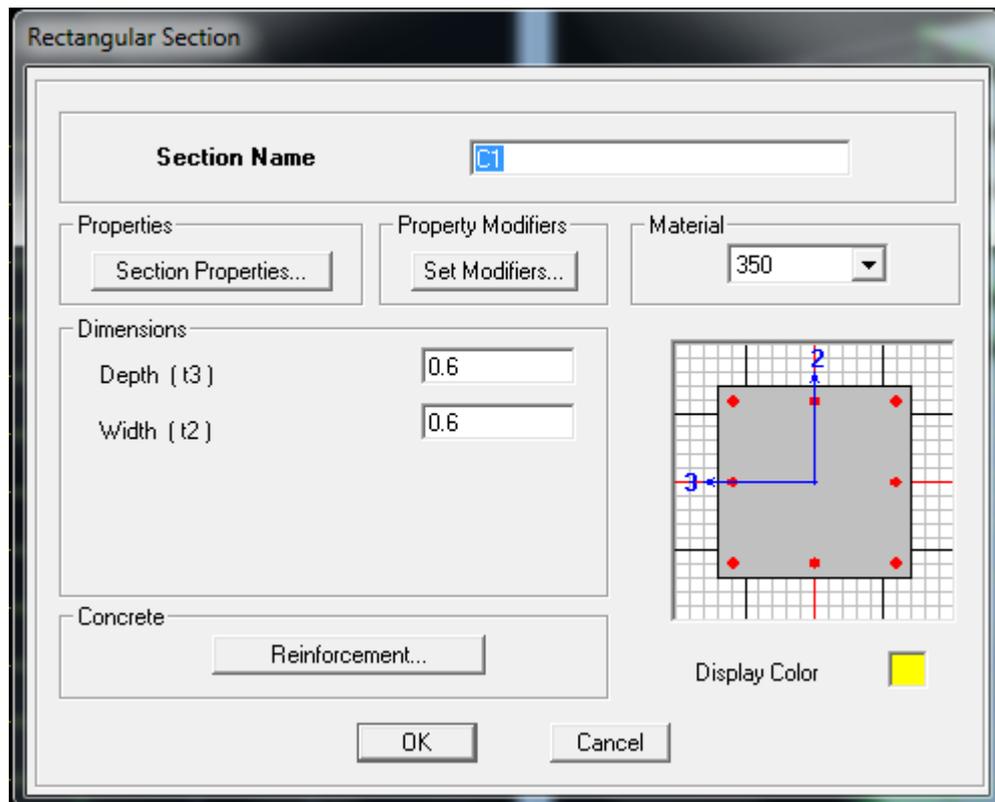


Figura 60: Ventana de edición y creación de las secciones.

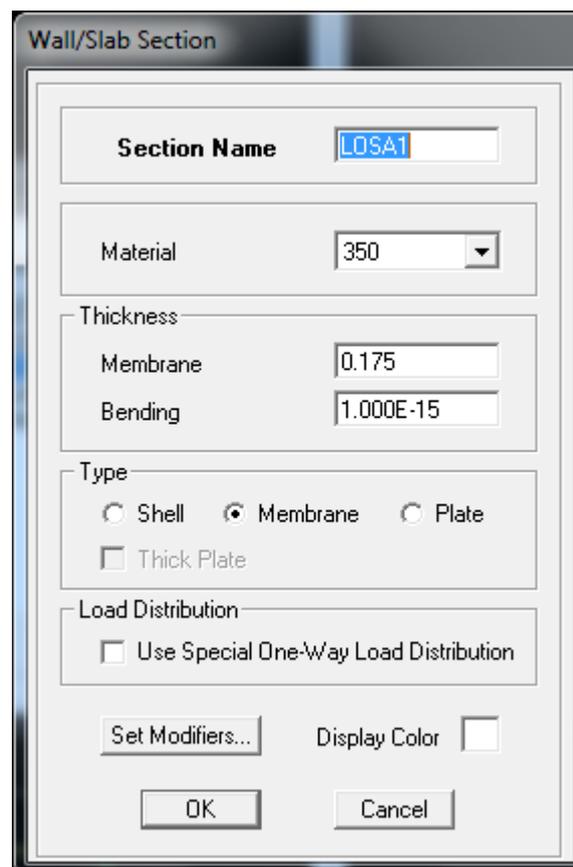


Figura 61: Ventana de edición y creación de losas.

El siguiente paso es definir los estados de carga, para lo que nuevamente se utiliza el menú “Define” - “Static Load Cases” (Figura 62), y se carga los espectros de aceleraciones igualmente desde el menú “Define” – “Response Spectrum Functions” (Figura 63).

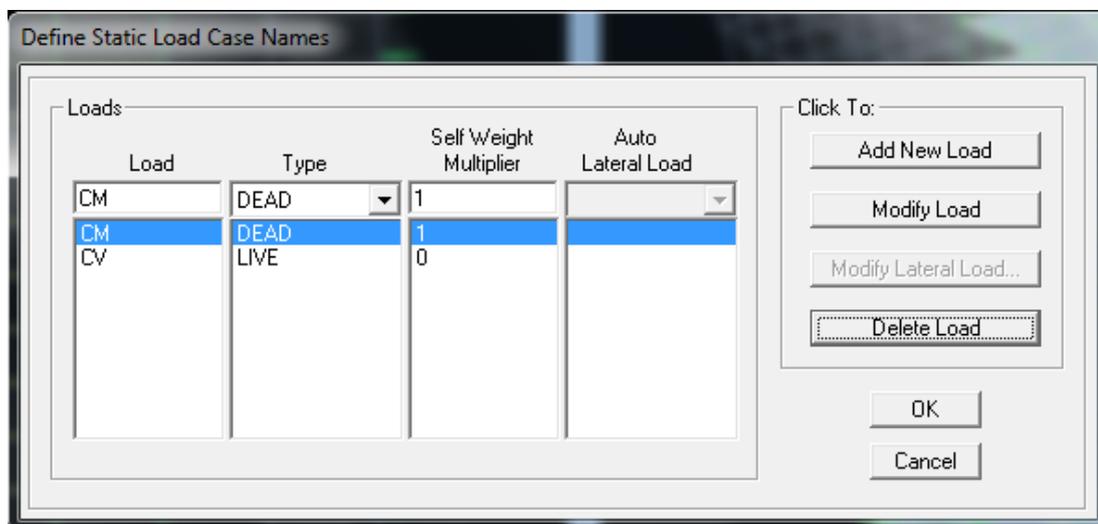


Figura 62: Ventana para definir los estados de carga.

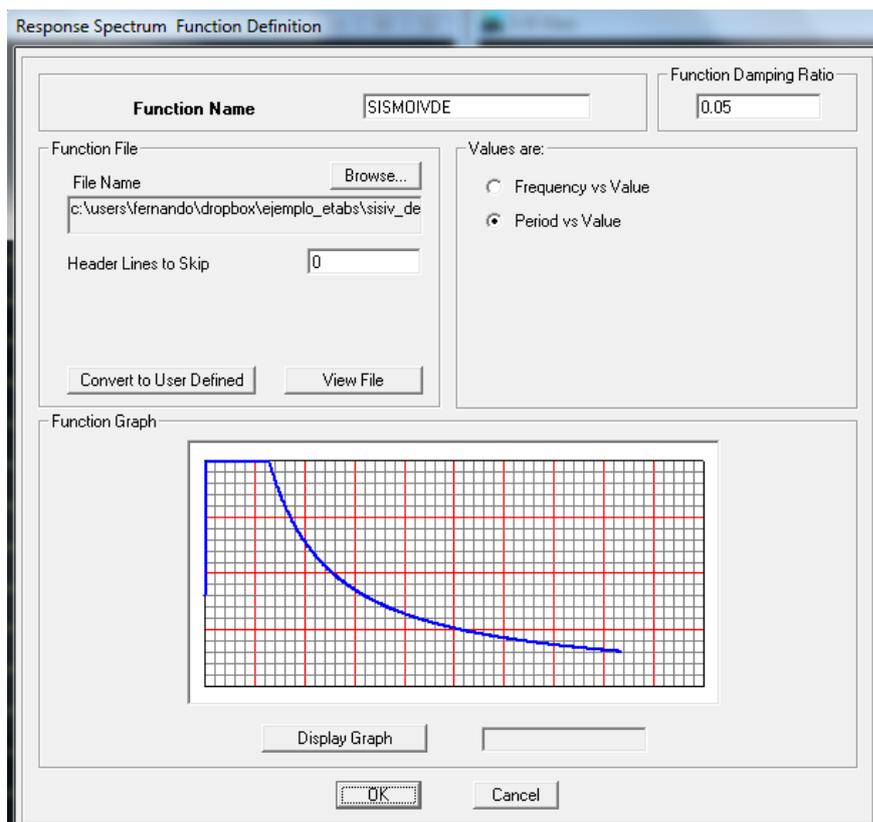


Figura 63: Ventana para cargar los espectros de aceleraciones.

Luego se define los casos de espectro de respuesta (Figura 64) y finalmente las combinaciones de cargas (Figura 65).

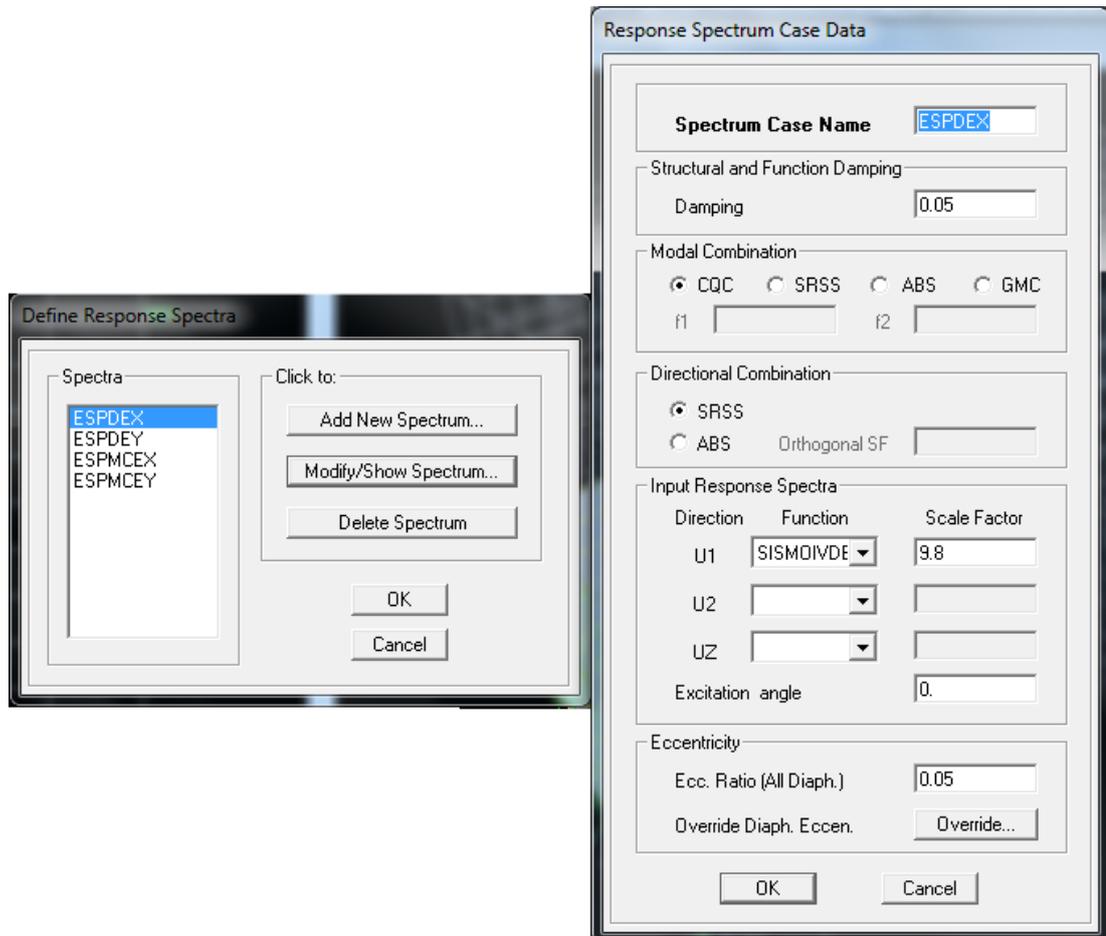


Figura 64: Casos de espectro de respuesta.

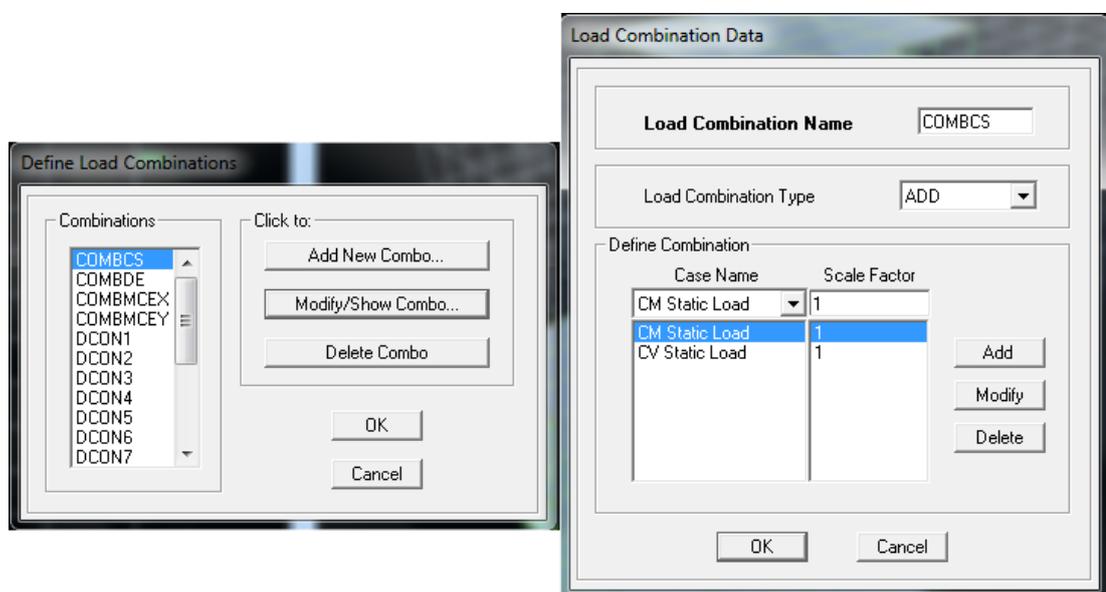


Figura 65: Combinaciones de carga.

Realizado el procedimiento anterior se procede a dibujar los elementos del edificio (Figura 66) y asignar las cargas (Figura 67), para este ejemplo se aplicara una carga muerta de 0.275 T/m^2 , procedente de las cargas permanentes y una carga viva de 0.3 T/m^2 por el uso que se le va a dar a la edificación.

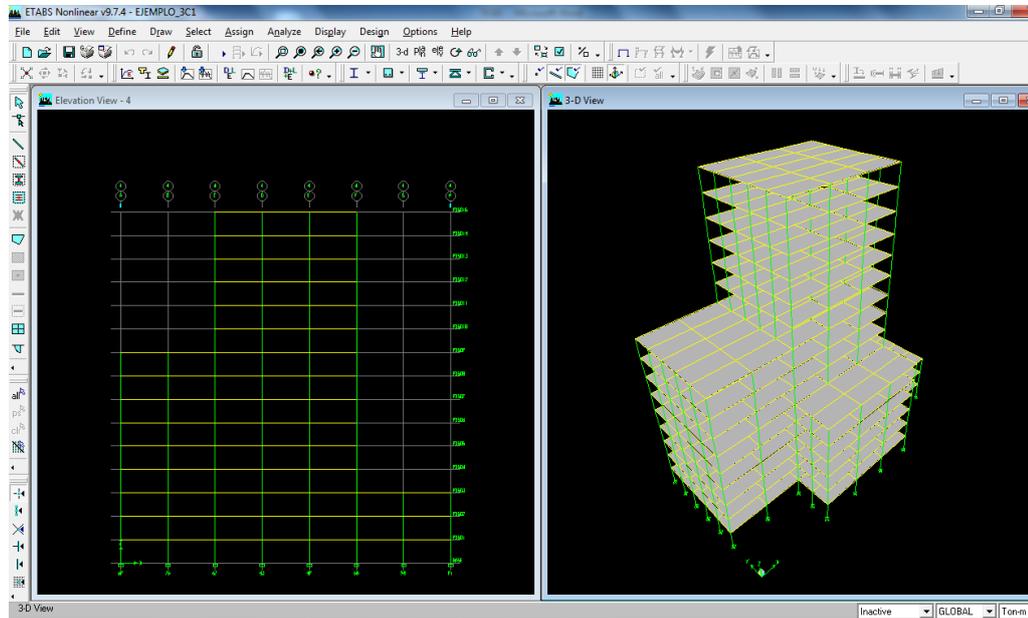


Figura 66: Dibujo del Proyecto.

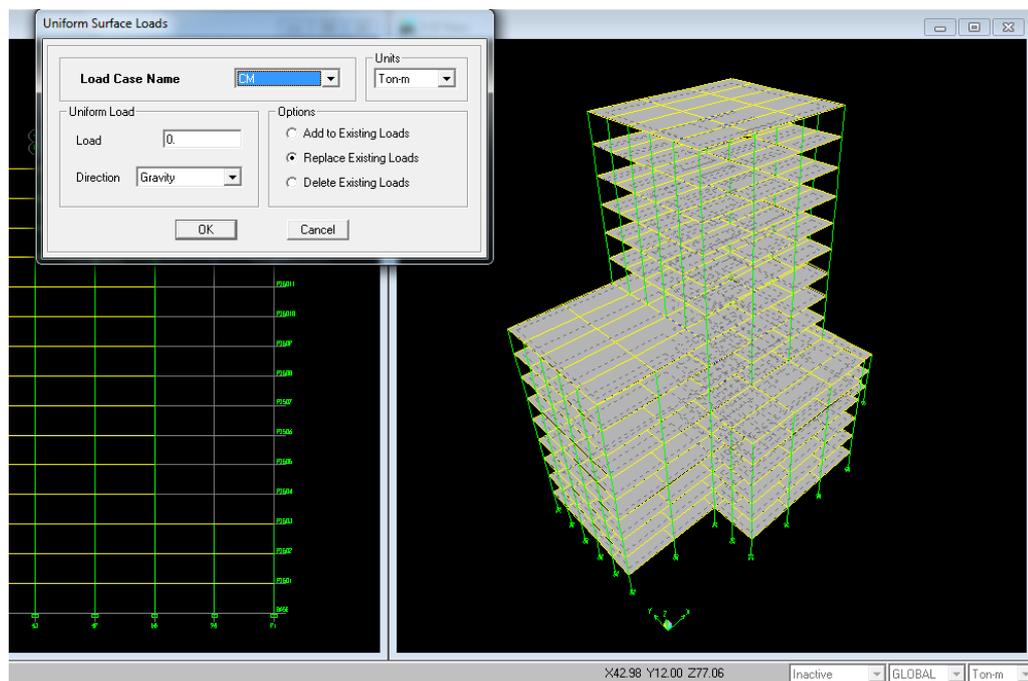


Figura 67: Asignación de Cargas a la Estructura.

Asignadas las cargas se procede a analizar (Figura 68), esto se lo realiza mediante el icono ubicado en la barra de herramientas, el menú “**Analyze**” en la barra de menús o presionando la tecla “**F5**”.

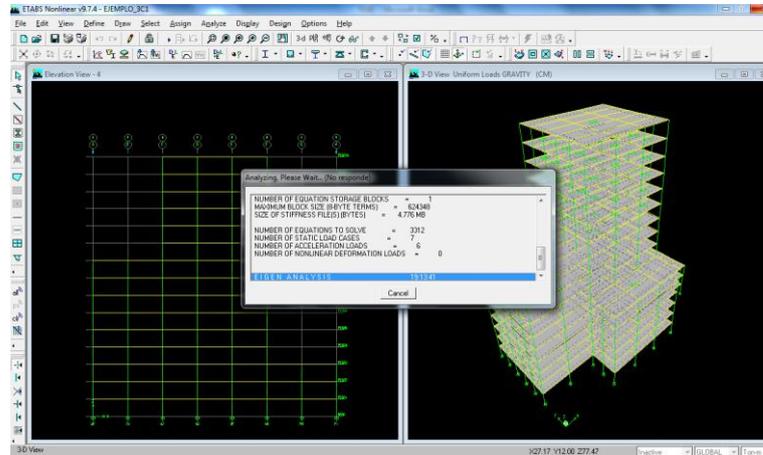


Figura 68: Análisis de la Estructura.

Los datos que se necesitan para el diseño de los aisladores se los obtiene una vez terminado el análisis, esto se lo hace ingresando al menú “**Display**” – “**Show Tables**” (Figura 69).

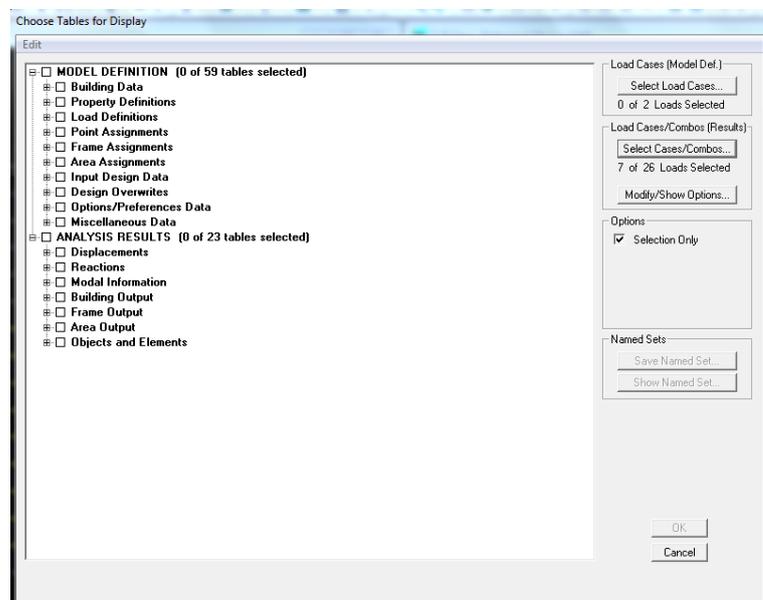


Figura 69: Ventana de visualización de resultados.

Los datos que se requiere para el diseño son los correspondientes a las reacciones en los apoyos, para esto se selecciona la opción “**Reactions**” y se escogen las cargas y los combos para los se desee ver los resultados, realizado esto se presiona “**OK**” e inmediatamente se despliega la tabla de resultados (Figura 70), estos datos se muestran en las tablas 24, 25 y 26 y su ubicación en la figura 71.

Story	Point	Load	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
BASE	42	COMBCS	-0.29	0.41	554.97	-0.564	-0.207	-0.001
BASE	42	COMBDE	-0.37	0.53	709.78	-0.727	-0.276	-0.002
BASE	42	COMBMCEX MAX	153.40	10.80	798.10	30.728	571.179	4.053
BASE	42	COMBMCEX MIN	-154.06	-9.84	490.00	-32.033	-571.649	-4.056
BASE	42	COMBMCEY MAX	30.71	178.12	1537.23	546.632	109.363	16.025
BASE	42	COMBMCEY MIN	-31.36	-177.16	-249.14	-547.936	-109.832	-16.028
BASE	43	COMBCS	0.00	0.06	615.99	-0.105	0.162	0.000
BASE	43	COMBDE	0.00	0.07	788.65	-0.142	0.207	0.000
BASE	43	COMBMCEX MAX	157.93	10.44	777.47	31.320	576.015	4.029
BASE	43	COMBMCEX MIN	-157.92	-10.31	651.44	-31.555	-575.637	-4.029
BASE	43	COMBMCEY MAX	18.90	177.31	982.92	546.299	66.131	15.943
BASE	43	COMBMCEY MIN	-18.90	-177.18	445.99	-546.534	-65.753	-15.943
BASE	44	COMBCS	-1.34	-0.27	573.31	0.316	-1.563	0.002
BASE	44	COMBDE	-1.78	-0.35	731.98	0.411	-2.073	0.002
BASE	44	COMBMCEX MAX	156.07	10.03	707.88	31.736	572.763	4.037
BASE	44	COMBMCEX MIN	-159.13	-10.64	624.05	-31.009	-576.317	-4.033
BASE	44	COMBMCEY MAX	6.76	177.14	715.80	546.728	27.956	15.986
BASE	44	COMBMCEY MIN	-9.82	-177.75	616.13	-546.000	-31.510	-15.992
BASE	45	COMBCS	-1.34	0.29	570.53	-0.385	-1.561	-0.002
BASE	45	COMBDE	-1.78	0.38	728.33	-0.517	-2.071	-0.003
BASE	45	COMBMCEX MAX	155.71	10.63	702.51	30.868	571.701	4.028
BASE	45	COMBMCEX MIN	-158.77	-9.98	623.05	-31.736	-575.251	-4.034
BASE	45	COMBMCEY MAX	10.69	177.00	729.68	544.323	41.097	16.009
BASE	45	COMBMCEY MIN	-13.75	-176.35	595.88	-545.192	-44.646	-16.014
BASE	46	COMBCS	0.02	-0.12	600.59	0.144	0.186	-0.002
BASE	46	COMBDE	0.02	-0.16	768.41	0.180	0.238	-0.003
BASE	46	COMBMCEX MAX	156.81	10.23	747.93	31.540	572.588	4.010
BASE	46	COMBMCEX MIN	-156.77	-10.51	645.78	-31.200	-572.155	-4.015
BASE	46	COMBMCEY MAX	24.52	176.07	1023.00	543.998	85.197	15.894
BASE	46	COMBMCEY MIN	-24.48	-176.35	370.71	-543.657	-84.764	-15.900
BASE	47	COMBCS	0.01	-0.79	470.00	0.998	0.186	-0.001
BASE	47	COMBDE	0.02	-1.02	597.39	1.291	0.238	-0.001
BASE	47	COMBMCEX MAX	155.26	7.29	648.93	29.715	570.079	4.056
BASE	47	COMBMCEX MIN	-155.23	-9.10	445.68	-27.413	-569.649	-4.058
BASE	47	COMBMCEY MAX	37.79	137.19	2198.78	465.832	130.620	16.090
BASE	47	COMBMCEY MIN	-37.75	-139.00	-1102.16	-493.530	-130.390	-16.093

Figura 70: Reacciones en los apoyos.

Tabla 24: Reacciones para Cargas de Servicio

Story	Point	Load	Fz (T)
BASE	1	Cargas de Servicio	139.35
BASE	2	Cargas de Servicio	201.20
BASE	3	Cargas de Servicio	207.94
BASE	4	Cargas de Servicio	207.94
BASE	5	Cargas de Servicio	201.21
BASE	6	Cargas de Servicio	139.63
BASE	7	Cargas de Servicio	238.54
BASE	8	Cargas de Servicio	391.50
BASE	9	Cargas de Servicio	398.92
BASE	10	Cargas de Servicio	399.30
BASE	11	Cargas de Servicio	393.72
BASE	12	Cargas de Servicio	243.06
BASE	13	Cargas de Servicio	314.06

Tabla 25: Reacciones para Cargas de Servicio

Story	Point	Load	Fz (T)
BASE	14	Cargas de Servicio	512.58
BASE	15	Cargas de Servicio	522.60
BASE	16	Cargas de Servicio	526.62
BASE	17	Cargas de Servicio	544.28
BASE	18	Cargas de Servicio	268.82
BASE	19	Cargas de Servicio	138.21
BASE	20	Cargas de Servicio	74.40
BASE	21	Cargas de Servicio	470.18
BASE	22	Cargas de Servicio	601.25
BASE	23	Cargas de Servicio	576.52
BASE	24	Cargas de Servicio	573.30
BASE	25	Cargas de Servicio	609.96
BASE	26	Cargas de Servicio	554.22
BASE	27	Cargas de Servicio	293.75
BASE	28	Cargas de Servicio	127.00
BASE	29	Cargas de Servicio	465.50
BASE	30	Cargas de Servicio	595.76
BASE	31	Cargas de Servicio	570.74
BASE	32	Cargas de Servicio	567.45
BASE	33	Cargas de Servicio	604.24
BASE	34	Cargas de Servicio	549.90
BASE	35	Cargas de Servicio	293.24
BASE	36	Cargas de Servicio	126.89
BASE	37	Cargas de Servicio	255.68
BASE	38	Cargas de Servicio	414.93
BASE	39	Cargas de Servicio	422.72
BASE	40	Cargas de Servicio	426.29
BASE	41	Cargas de Servicio	442.08
BASE	42	Cargas de Servicio	226.92
BASE	43	Cargas de Servicio	77.79
BASE	44	Cargas de Servicio	134.72
BASE	45	Cargas de Servicio	134.53
BASE	46	Cargas de Servicio	134.55
BASE	47	Cargas de Servicio	134.87
BASE	48	Cargas de Servicio	77.46
BASE	49	Cargas de Servicio	42.86
BASE	50	Cargas de Servicio	68.06
BASE	51	Cargas de Servicio	68.30
BASE	52	Cargas de Servicio	68.30
BASE	53	Cargas de Servicio	68.06
BASE	54	Cargas de Servicio	42.73
BASE	55	Cargas de Servicio	133.14
BASE	56	Cargas de Servicio	74.88

Tabla 26: Reacciones para Cargas con Sismo de Diseño

Story	Point	Load	FZ
BASE	1	Sismo de Diseño	176.75
BASE	2	Sismo de Diseño	257.71
BASE	3	Sismo de Diseño	266.56
BASE	4	Sismo de Diseño	266.56
BASE	5	Sismo de Diseño	257.74
BASE	6	Sismo de Diseño	177.18
BASE	7	Sismo de Diseño	304.94
BASE	8	Sismo de Diseño	503.75
BASE	9	Sismo de Diseño	513.71
BASE	10	Sismo de Diseño	514.21
BASE	11	Sismo de Diseño	506.63
BASE	12	Sismo de Diseño	310.86
BASE	13	Sismo de Diseño	400.38
BASE	14	Sismo de Diseño	657.63
BASE	15	Sismo de Diseño	670.93
BASE	16	Sismo de Diseño	676.14
BASE	17	Sismo de Diseño	698.75
BASE	18	Sismo de Diseño	345.19
BASE	19	Sismo de Diseño	177.94
BASE	20	Sismo de Diseño	95.12
BASE	21	Sismo de Diseño	597.62
BASE	22	Sismo de Diseño	769.27
BASE	23	Sismo de Diseño	736.24
BASE	24	Sismo de Diseño	731.97
BASE	25	Sismo de Diseño	780.7
BASE	26	Sismo de Diseño	708.79
BASE	27	Sismo de Diseño	378.41
BASE	28	Sismo de Diseño	163.37
BASE	29	Sismo de Diseño	591.52
BASE	30	Sismo de Diseño	762.11
BASE	31	Sismo de Diseño	728.69
BASE	32	Sismo de Diseño	724.32
BASE	33	Sismo de Diseño	773.22
BASE	34	Sismo de Diseño	703.17
BASE	35	Sismo de Diseño	377.74
BASE	36	Sismo de Diseño	163.24
BASE	37	Sismo de Diseño	324.54
BASE	38	Sismo de Diseño	530.09
BASE	39	Sismo de Diseño	540.38
BASE	40	Sismo de Diseño	545.02

Tabla 27: Reacciones para Cargas con Sismo de Diseño

Story	Point	Load	FZ
BASE	41	Sismo de Diseño	565.29
BASE	42	Sismo de Diseño	290.77
BASE	43	Sismo de Diseño	99.3
BASE	44	Sismo de Diseño	173.5
BASE	45	Sismo de Diseño	173.29
BASE	46	Sismo de Diseño	173.33
BASE	47	Sismo de Diseño	173.7
BASE	48	Sismo de Diseño	98.88
BASE	49	Sismo de Diseño	54.24
BASE	50	Sismo de Diseño	87.21
BASE	51	Sismo de Diseño	87.52
BASE	52	Sismo de Diseño	87.52
BASE	53	Sismo de Diseño	87.21
BASE	54	Sismo de Diseño	54.08
BASE	55	Sismo de Diseño	171.36
BASE	56	Sismo de Diseño	95.73

Tabla 28: Reacciones para cargas con Sismo Máximo Considerado

Story	Point	Load	FZ
BASE	1	Sismo Máximo Considerado	637.12
BASE	2	Sismo Máximo Considerado	291.73
BASE	3	Sismo Máximo Considerado	261.22
BASE	4	Sismo Máximo Considerado	265.9
BASE	5	Sismo Máximo Considerado	297.79
BASE	6	Sismo Máximo Considerado	644.94
BASE	7	Sismo Máximo Considerado	1143.95
BASE	8	Sismo Máximo Considerado	608.95
BASE	9	Sismo Máximo Considerado	476.53
BASE	10	Sismo Máximo Considerado	478.27
BASE	11	Sismo Máximo Considerado	614.66
BASE	12	Sismo Máximo Considerado	1144.13
BASE	13	Sismo Máximo Considerado	1086.89
BASE	14	Sismo Máximo Considerado	769.34
BASE	15	Sismo Máximo Considerado	644.93
BASE	16	Sismo Máximo Considerado	654.09
BASE	17	Sismo Máximo Considerado	907.88
BASE	18	Sismo Máximo Considerado	628.81
BASE	19	Sismo Máximo Considerado	215.88
BASE	20	Sismo Máximo Considerado	342.3

Tabla 29: Reacciones para Cargas con Sismo Máximo Considerado

Story	Point	Load	FZ
BASE	21	Sismo Máximo Considerado	2196.97
BASE	22	Sismo Máximo Considerado	1023.75
BASE	23	Sismo Máximo Considerado	736.52
BASE	24	Sismo Máximo Considerado	715.79
BASE	25	Sismo Máximo Considerado	976.05
BASE	26	Sismo Máximo Considerado	1536.37
BASE	27	Sismo Máximo Considerado	756.59
BASE	28	Sismo Máximo Considerado	698.71
BASE	29	Sismo Máximo Considerado	2365.16
BASE	30	Sismo Máximo Considerado	1054.1
BASE	31	Sismo Máximo Considerado	736.7
BASE	32	Sismo Máximo Considerado	711.58
BASE	33	Sismo Máximo Considerado	991.93
BASE	34	Sismo Máximo Considerado	1623.92
BASE	35	Sismo Máximo Considerado	792.93
BASE	36	Sismo Máximo Considerado	743.84
BASE	37	Sismo Máximo Considerado	1173.63
BASE	38	Sismo Máximo Considerado	663.09
BASE	39	Sismo Máximo Considerado	531.76
BASE	40	Sismo Máximo Considerado	528.71
BASE	41	Sismo Máximo Considerado	808.22
BASE	42	Sismo Máximo Considerado	635.63
BASE	43	Sismo Máximo Considerado	442.26
BASE	44	Sismo Máximo Considerado	163.76
BASE	45	Sismo Máximo Considerado	156.98
BASE	46	Sismo Máximo Considerado	156.97
BASE	47	Sismo Máximo Considerado	166.2
BASE	48	Sismo Máximo Considerado	441.53
BASE	49	Sismo Máximo Considerado	230.33
BASE	50	Sismo Máximo Considerado	102
BASE	51	Sismo Máximo Considerado	88.66
BASE	52	Sismo Máximo Considerado	85.83
BASE	53	Sismo Máximo Considerado	100.19
BASE	54	Sismo Máximo Considerado	227.49
BASE	55	Sismo Máximo Considerado	208.01
BASE	56	Sismo Máximo Considerado	367.42

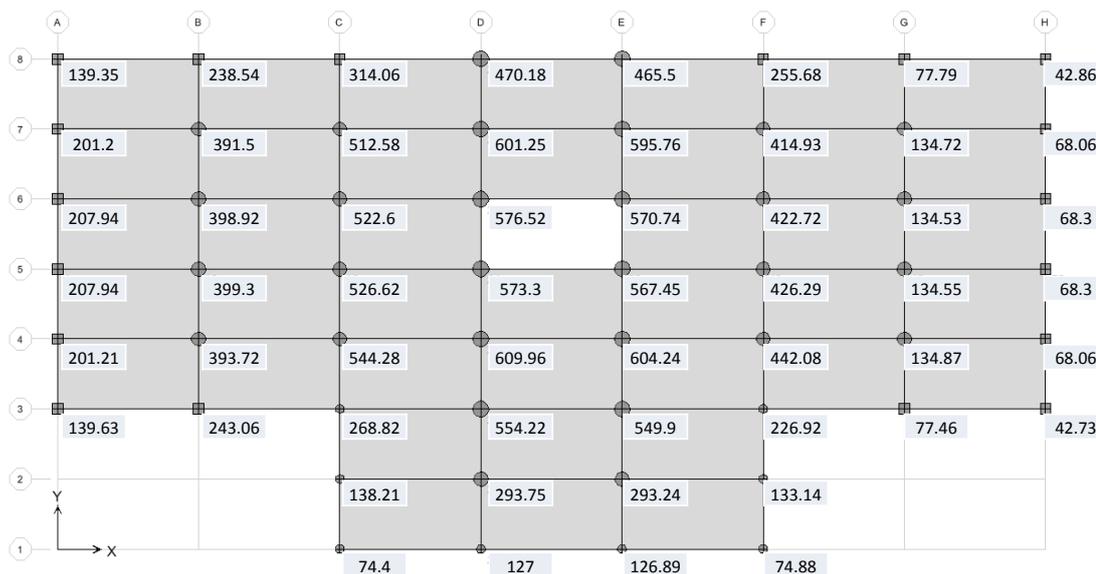


Figura 71: Ubicación de las reacciones por cargas de servicio.

De las tablas 24 a 26 se selecciona las cargas máximas (tabla 27) con las que se procede a realizar el diseño.

Tabla 30: Reacciones Máximas

TIPO	P (T)
CARGA DE SERVICIO	609.96
CARGAS DE SISMO DE DISEÑO	780.7
CARGAS DE SISMO MÁXIMO CONSIDERADO	1623.92
CARGAS DE DISEÑO	650

Obtenidas las cargas máximas se procede con el procedimiento utilizado en los ejercicios anteriores.

▪ **Tipo de Aislador a utilizar:**

Aislador Elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB).

▪ **Propiedades de los Materiales del Aislador:**

$$K = 40800 \text{ Kg/cm}^2$$

$$G = 6.171 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$$

- **Geometría del Aislador:**

Rectangular.

- **Dimensionamiento Previo:**

Área transversal del Aislador.

$$A \geq \frac{P}{f'_c} \quad (5.17)$$

$P = 650 \text{ T.}$

$f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2.$

$$A \geq \frac{(650 * 1000)}{350}$$

$$A \geq \mathbf{1857 \text{ cm}^2}$$

Se asume un $A = \mathbf{2000 \text{ cm}^2}.$

Cálculo del Lado del Aislador.

$$L = \sqrt{A} \quad (5.18)$$

$$L = \mathbf{44.72 \text{ cm}}$$

Se asume $L = 100 \text{ cm.}$

$$A = L * L$$

$$A = \mathbf{10000 \text{ cm}^2}$$

Se asume $T_r = 30\text{cm.}$

Número de láminas de goma.

$t = \mathbf{12\text{mm}}$

$$\text{No. de capas de goma} = \frac{T_r}{t}$$

$$\text{No. de capas de goma} = \frac{30}{1.2}$$

$$\text{No. de capas de goma} = \mathbf{25}$$

Número de láminas de Acero de refuerzo.

$$\text{No. de capas de Acero} = \text{No. de capas de goma} - 1$$

$$\text{No. de capas de Acero} = 25 - 1$$

$$\text{No. de capas de Acero} = 24$$

- **Curva de Histéresis :**

Al igual que en los ejemplos anteriores se impone un desplazamiento $D=10\text{cm}$ y se realiza el proceso descrito en el ejemplo 1, por iteraciones se calcula el periodo efectivo T_{eff} y con este se obtiene el desplazamiento de diseño igual a 43.84 cm y el desplazamiento máximo 65.76 cm .

A continuación se muestran los puntos calculados para la elaboración de la curva de histéresis (figura 72).

Punto 1 (P1) = origen de coordenadas (0 ; 0)

Punto 2 (P2) = (D_y ; F_y)

$$D_y = 2.5\text{cm}$$

$$\beta_{eff} = 15\%$$

$$k_p = 2757.00\text{ Kg/cm}$$

$$Q = 30038.71\text{Kg}$$

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (5.25)$$

$$F_y = 35181.20\text{ Kg}$$

Punto 3 (P3) = (D ; F_{max})

$$D = 10\text{cm}$$

$$F_{max} = Q + k_p D \quad (5.26)$$

$$F_{max} = 120218.20\text{ Kg}$$

Punto 4 (P4) = (x₁ ; y₁)

$$x_1 = \frac{F_{max} + Q - k_e D}{k_p - k_e} \quad (5.29)$$

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

$$k_e = 14072.48 \text{ Kg/cm}$$

$$x_1 = 38.8403 \text{ cm}$$

$$y_1 = k_p x - Q$$

$$y_1 = 49855.79 \text{ Kg}$$

Punto 5 (P5) = (- D ; - F_{max})

$$P5 = (-43.84, -120218.20)$$

Punto 6 (P6) = (x₂ ; y₂)

$$P6 = (-38.8403, -49855.79)$$

Punto 7 (P7) = (0 ; Q)

$$P7 = (0, 30038.71)$$

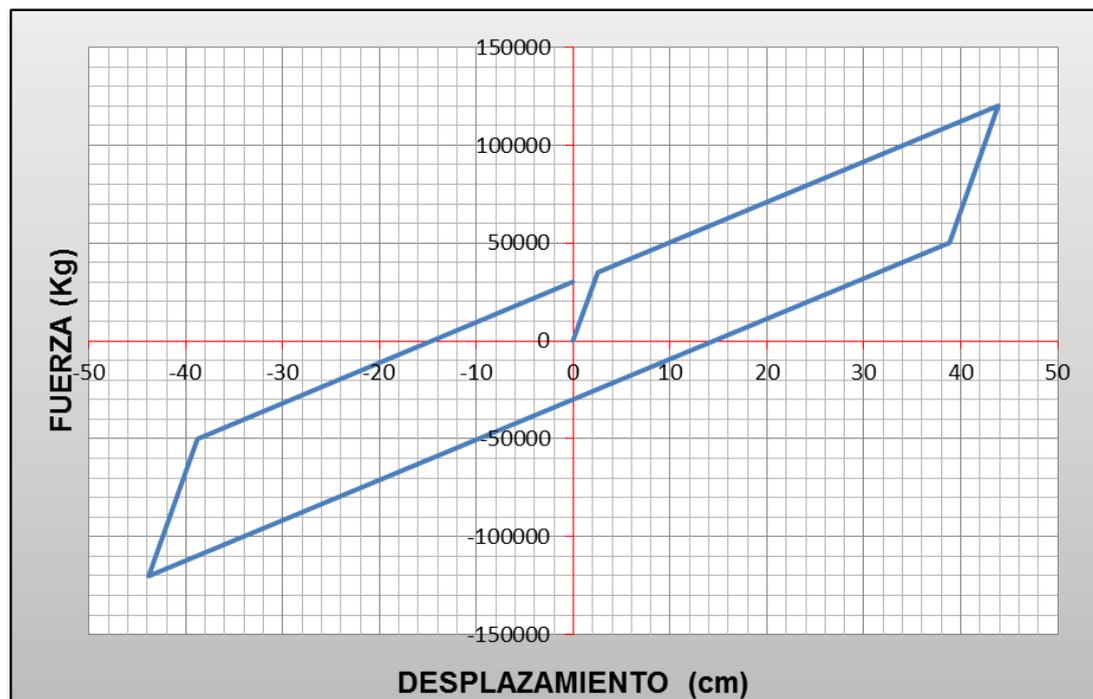


Figura 72: Diagrama de histéresis.

- **Propiedades Dinámicas del Aislador.**

Rigidez efectiva.

$$K_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (5.32)$$

$$K_{eff} = 2742.18 \text{ Kg/cm}$$

Periodo efectivo.

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{K_{eff} * g}} \quad (5.33)$$

$$T_{eff} = 3.090 \text{ seg.}$$

Amortiguamiento efectivo.

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5.34)$$

$$\beta_{eff} = 0.15$$

Carga Crítica.

$$P_{cr} = 0.340 \frac{GL^4}{tT_r} \quad (5.39)$$

$$P_{cr} = 5828166.67 \text{ Kg}$$

Calculo del factor de forma S.

$$S = \frac{\text{Area cargada}}{\text{Area libre de fuerzas}} \quad (5.10)$$

$$S = 20.83$$

Calculo del módulo de compresión Ec.

$$E_c = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

$$E_c = 10536.71 \text{ Kg/cm}^2$$

Calculo de la rigidez vertical K_v .

$$k_v = \frac{E_c A}{T_r} \quad (5.9)$$

$$k_v = 3512236.76 \text{ Kg/cm}$$

▪ **Comprobación.**

Con los datos obtenidos, se regresa al ETABS y se define el aislador prediseñado. Los valores que se necesitan para esto son:

- Rigidez Vertical k_v .
- Relación k_p/k_e .
- Rigidez postfluencia k_p .
- Amortiguamiento efectivo β_{eff} .
- Rigidez elástica k_e .
- Fuerza de Fluencia F_y .

En el menú “**Define**” del ETABS se escoge la opción “**Link Properties**” e inmediatamente se despliega una ventana (Figura 73), en la cual se da clic sobre el botón “**Add New Property**”.

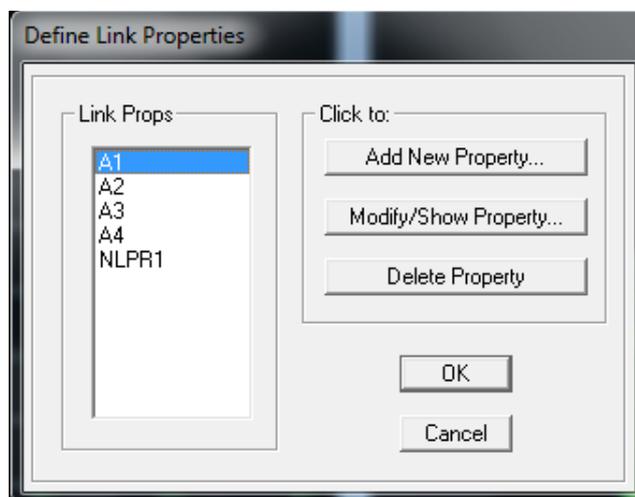


Figura 73: Ventana para agregar elementos tipo LINK.

En la figura 74 se muestra la ventana que se despliega después de escoger la opción “**Add New Property**”, en la ventana mostrada en la figura anterior.

En esta ventana se le da el nombre al Aislador en “**Property Name**”, en “**Type**” se escoge “**Isolator1**” y en la parte de “**Directional Properties**”, se definen las características del Aislador, para esto en la opción “**Direction**” se marcan **U1**, **U2** y **U3** y en la opción “**NonLinear**” se marca **U2** y **U3**.

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

Figura 74: Datos para crear un elemento tipo LINK.

Para modelar el aislador se le asignan las propiedades dando clic en los botones “**Modify/Show for U1**”, “**Modify/Show for U2**” y “**Modify/Show for U3**” las propiedades que se asignan en cada ventana se muestran en las figuras 75 y 76.

La ventana mostrada en la figura 74 corresponde a la dirección **U1** que en este caso representa a la dirección **Z**, por lo tanto los valores que se ingresan son los

correspondientes a la rigidez vertical y la relación k_p/k_e . En el campo “**Effective Stiffness**” se coloca la rigidez k_v y en el campo “**Effective Damping**”, se pone el valor de la relación k_p/k_e .



NLLink Directional Properties	
Identification	
Property Name	A1
Direction	U1
Type	Isolator1
NonLinear	No
Linear Properties	
Effective Stiffness	351224.
Effective Damping	0.146

Figura 75: Datos del aislador correspondientes a la dirección U1.

Las direcciones **U2** y **U3** representan a los ejes **X** y **Y**, respectivamente, por lo tanto los datos que se ingresan en la ventana de la figura 76 son los mismos para las 2 direcciones.

La rigidez postfluencia k_p se coloca en la casilla correspondiente a “**Effective Stiffness**”, en el campo “**Effective Damping**” se ingresa el valor del amortiguamiento efectivo en porcentaje, la rigidez elástica k_e se coloca en la casilla “**Stiffness**”, la fuerza de fluencia F_y se ingresa en “**Yield Strength**” por último la relación k_p/k_e se ubica en la casilla “**Post Yield Stiffness Ratio**”. Ingresados todos los valores se da clic en “**OK**” y se regresa a la ventana principal.

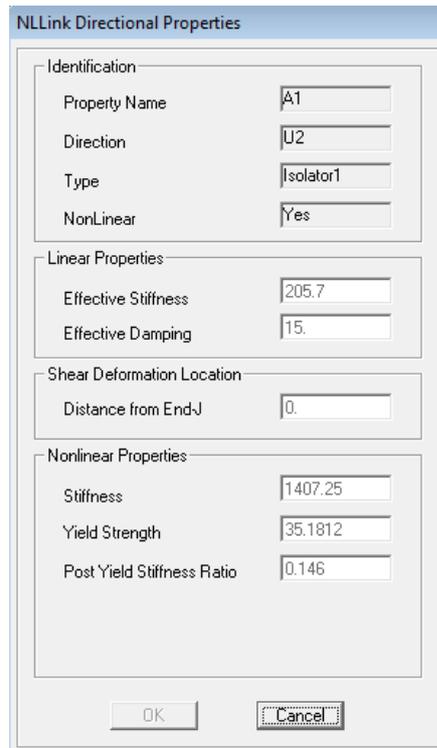


Figura 76: Propiedades del aislador correspondientes a las direcciones U2 y U3.

Para asignar los aisladores en la estructura se marcan las restricciones en la base y se las retira, luego de esto se marcan nuevamente todos los nudos en donde se vayan a colocar los aisladores y mediante el menú “Assign” se escoge la opción “Joint/Point” y posteriormente “Link Properties” (Figura 77); en la ventana que se muestra en la figura 78 se escoge el aislador definido y se presiona “OK” y los aisladores aparecen en la estructura (Figura 79).

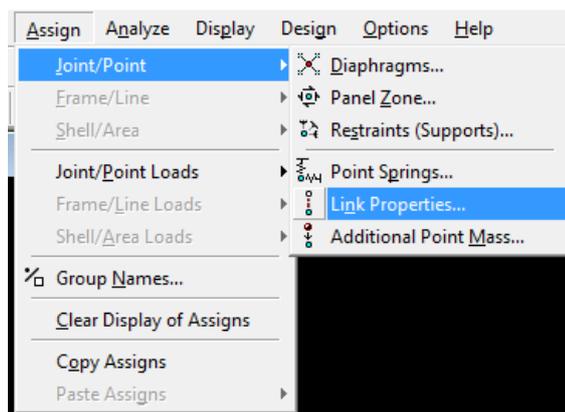


Figura 77: Procedimiento para asignar los aisladores.

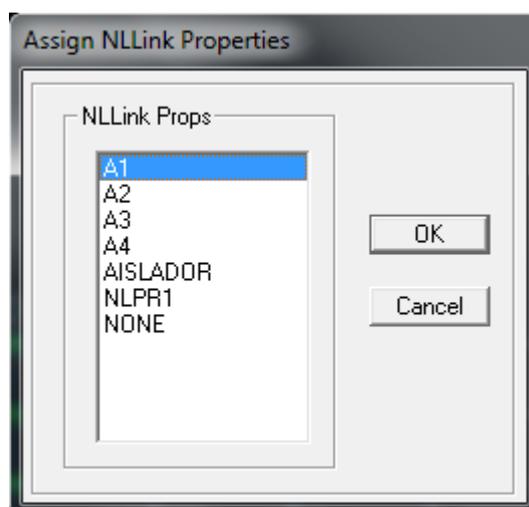


Figura 78: Ventana para escoger y asignar el aislador modelado.

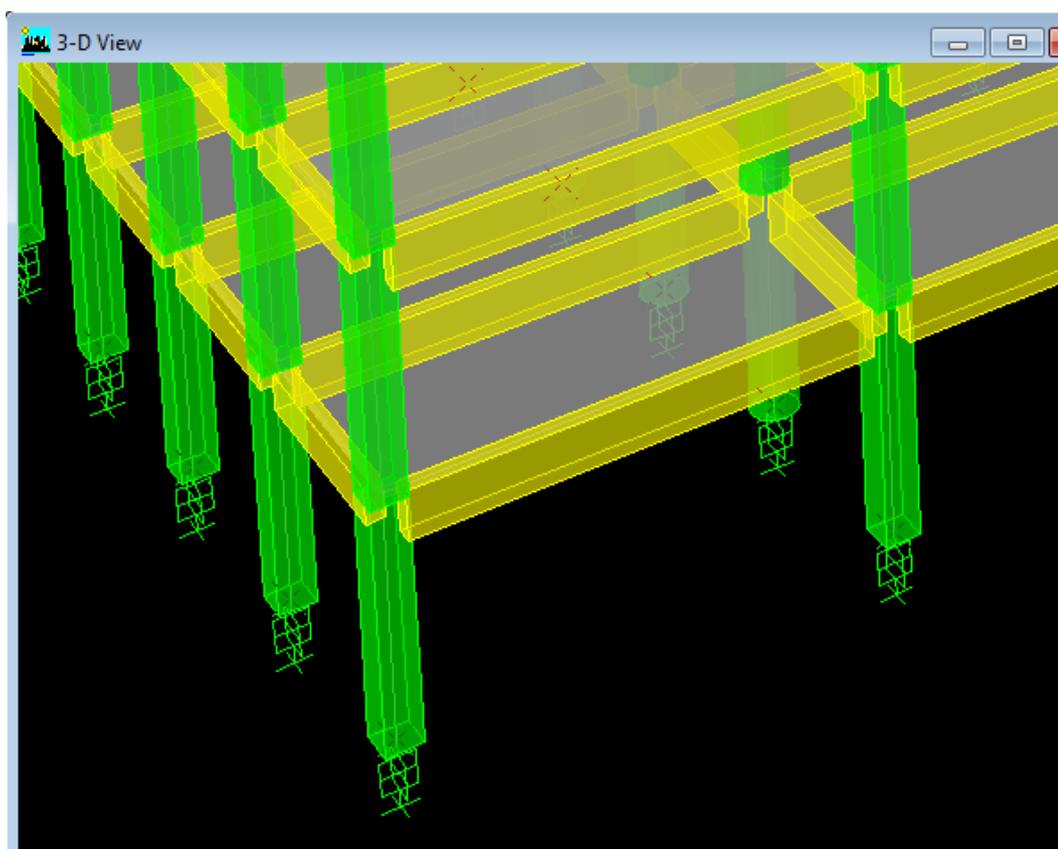


Figura 79: Aisladores colocados en la Estructura.

Una vez asignados los aisladores, se procede a analizar la estructura; terminado el análisis se obtiene los desplazamientos y giros utilizando el menú **“Display”**, **“Show Tables”**, **“Displacements”**, **“Displacement Data”**, **“Point Displacements”** (Figura 80). Los desplazamientos y giros se muestran en la Tabla 32.

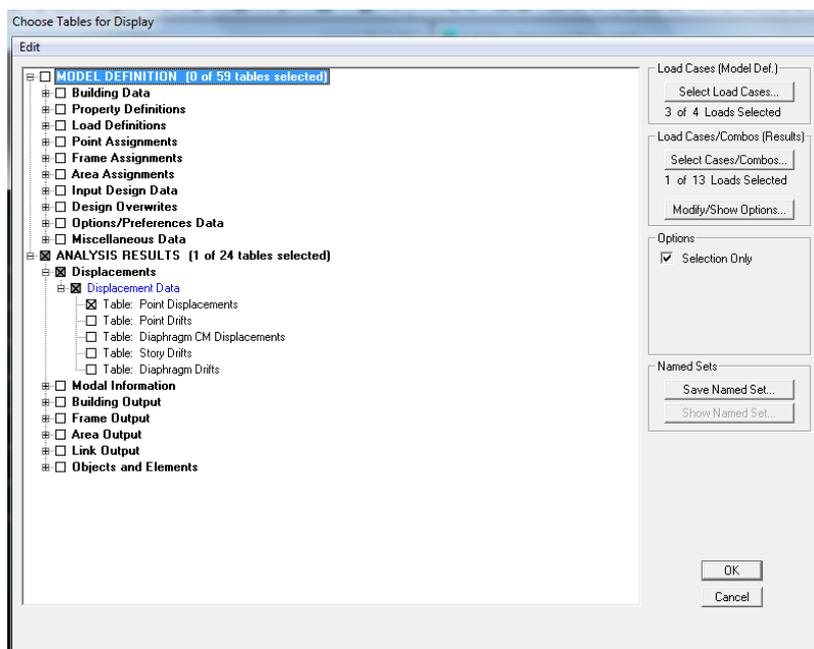


Figura 80: Obtención de desplazamientos de la estructura con Aisladores.

Tabla 31: Desplazamientos y Rotaciones obtenidos del análisis de la estructura con aisladores sísmicos.

Story	Point	UX	UY	RX	RY
BASE	1	-0.0013	0.0003	0.00006	0.00027
BASE	2	-0.0021	0.0001	0	0.00042
BASE	3	-0.0021	0	0	0.00043
BASE	4	-0.0021	0	-0.00001	0.00043
BASE	5	-0.002	0	-0.00001	0.00042
BASE	6	-0.0013	-0.0003	-0.00007	0.00027
BASE	7	0	0.0004	0.00008	-0.00002
BASE	8	0	0.0001	0	-0.00002
BASE	9	0	0	0	-0.00003
BASE	10	0	0	0	-0.00002
BASE	11	0	0	-0.00001	-0.00002
BASE	12	0	-0.0004	-0.00009	-0.00003
BASE	13	-0.0001	0.0004	0.00009	0
BASE	14	-0.0001	0.0001	0	0
BASE	15	-0.0001	0	0	0
BASE	16	-0.0001	0	0	0
BASE	17	-0.0001	0.0001	0.00001	0.00001

Tabla 32: Desplazamientos y Rotaciones obtenidos del análisis de la estructura con aisladores sísmicos.

Story	Point	UX	UY	RX	RY
BASE	18	-0.0009	-0.0003	-0.00005	0.00012
BASE	19	-0.0035	-0.0003	-0.00006	0.00056
BASE	20	-0.0023	-0.0005	-0.00008	0.00036
BASE	21	0	0.0003	0.00005	-0.00001
BASE	22	0	0.0001	0.00001	-0.00001
BASE	23	0.0003	0	-0.00002	-0.0001
BASE	24	0.0004	0.0001	0.00001	-0.0001
BASE	25	0	0	0	-0.00002
BASE	26	0.0001	-0.0001	-0.00004	-0.00004
BASE	27	0.0002	-0.0001	-0.00003	-0.00005
BASE	28	0.0002	-0.0004	-0.00008	-0.00005
BASE	29	0	0.0003	0.00005	-0.00002
BASE	30	0	0.0001	0.00001	-0.00002
BASE	31	-0.0003	0	-0.00002	0.00007
BASE	32	-0.0004	0.0001	0.00001	0.00007
BASE	33	0	0	0	-0.00001
BASE	34	-0.0001	-0.0001	-0.00003	0.00001
BASE	35	-0.0002	-0.0001	-0.00003	0.00003
BASE	36	-0.0002	-0.0004	-0.00008	0.00002
BASE	37	0.0001	0.0004	0.00008	-0.00004
BASE	38	0.0001	0	0	-0.00004
BASE	39	0.0001	0	0	-0.00004
BASE	40	0.0001	0	0	-0.00004
BASE	41	0.0002	0.0001	0.00001	-0.00005
BASE	42	0.001	-0.0002	-0.00004	-0.00016
BASE	43	0	0.0004	0.00007	-0.00001
BASE	44	0	0	-0.00001	0
BASE	45	0	0	0	0
BASE	46	0	0	0	0
BASE	47	0	0	0	0
BASE	48	0	-0.0003	-0.00008	0
BASE	49	0.0013	0.0003	0.00005	-0.0003
BASE	50	0.002	0	-0.00001	-0.00045
BASE	51	0.0021	0	-0.00001	-0.00046
BASE	52	0.0021	0	-0.00001	-0.00046
BASE	53	0.002	0	-0.00001	-0.00045
BASE	54	0.0013	-0.0002	-0.00006	-0.0003
BASE	55	0.0035	-0.0002	-0.00004	-0.00059
BASE	56	0.0023	-0.0005	-0.00008	-0.00039

De la Tabla 28 se obtienen el desplazamiento y la rotación máxima, y con estos valores se continua con la comprobación de las medidas del aislador, el desplazamiento obtenido es **0.35cm** y la rotación **0.00059 rad**.

Comprobación para Cargas de Servicio.

$$\Delta = 0.35 \text{ cm.}$$

$$\theta = 0.00059 \text{ rad.}$$

$$P = 609.96T.$$

$t_s = 5\text{mm}$ (espesor de las placas de refuerzo).

$h = 42.00 \text{ cm}$ (Altura del núcleo del Aislador).

$$f_1 = 1.639$$

$$f_2 = 0.453$$

- *Calculo del área reducida.*

$$A_r = B(L - \Delta) \quad (5.43)$$

$$A_r = 9965 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{ccs} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.67)$$

$$\gamma_{ccs} = 0.78$$

- *Deformación por rotación:*

$$\gamma_{rcs} = \frac{L^2(\theta_{st} + \theta)}{t T_r} \cdot f_2 \quad (5.68)$$

$$\gamma_{rcs} = 0.70$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{T_r} \quad (5.69)$$

$$\gamma_{scs} = 0.0117$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\frac{P_u}{A_r G S} * f_1 \leq 3.5 \quad (5.70)$$

$$0.7808 < 3.5 \quad \mathbf{OK}$$

$$\gamma_{ccs} + \gamma_{scs} + \gamma_{rcs} \leq 6 \quad (5.71)$$

$$1.4964 < 6 \quad \mathbf{OK}$$

$$t_s \geq 1.9 \text{ mm} \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

$$t_s = 0.275 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 5 \text{ mm}$ está correcto.

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (5.42)$$

$$P'_{cr} = 5807768.08 \text{ Kg}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0 \quad (5.73)$$

$$9.52 \geq 2.0 \quad \mathbf{OK}$$

Comprobación para Sismo de Diseño.

$$\Delta = 0.35 \text{ cm.}$$

$$\theta = 0.00059 \text{ rad.}$$

$$D_{DE} = 43.84 \text{ cm.}$$

$$P = 780.7 \text{ T.}$$

$t_s = 5 \text{ mm}$ (espesor de las placas de refuerzo).

- *Cálculo del área reducida.*

$$A_r = B(L - \Delta) \quad (5.43)$$

$$\Delta = 0.35 + 43.84$$

$$\Delta = 44.19$$

$$A_r = 5580.97 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{cDE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.74)$$

$$\gamma_{cDE} = 1.82$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{sDE} = \frac{\Delta + \Delta_{DE}}{T_r} \quad (5.75)$$

$$\gamma_{sDE} = 1.473$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{cDE} + \gamma_{sDE} + 0.5\gamma_{rcs} \leq 7 \quad (5.76)$$

$$3.64 \leq 7 \quad \mathbf{OK}$$

$$t_s \geq 1.9 \text{ mm} \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

$$t_s = 0.6508 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 5 \text{ mm}$ está correcto.

Comprobación para Sismo Máximo Considerado.

$$\Delta = 0.35 \text{ cm.}$$

$$\theta = 0.00059 \text{ rad.}$$

$$D_{MCE} = 65.76 \text{ cm.}$$

$$P = 1623.92 \text{ T.}$$

ts = 5mm (espesor de las placas de refuerzo).

- *Calculo del área reducida.*

$$A_r = B(L - \Delta) \quad (5.43)$$

$$\Delta = 0.35 + D_{MCE}$$

$$\Delta = 0.35 + 65.76$$

$$\Delta = 66.11$$

$$A_r = 3388.96 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{CMCE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.77)$$

$$\gamma_{CMCE} = 6.23$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.5\Delta + \Delta_{MCE}}{T_r} \quad (5.78)$$

$$\gamma_{SMCE} = 2.19$$

- *Comprobación por Pandeo:*

$$P'_{crMCE} \geq 0.15P_{cr} \quad (5.79)$$

$$P'_{crMCE} = 1975142.37 \text{ Kg}$$

$$0.15P_{cr} = 874225 \text{ Kg}$$

$$1975142.37 \text{ Kg} > 874225 \text{ Kg} \quad \mathbf{OK}$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{CMCE} + \gamma_{SMCE} + \gamma_{rcs} \leq 9 \quad (5.80)$$

$$8.98 < 9 \text{ OK}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1 \quad (5.81)$$

$$1.21 \geq 1.1 \text{ OK}$$

$$D_{cr} = \frac{PB}{K_{eff}h + P} \quad (5.49)$$

$$D_{cr} = 93.3775 \text{ cm}$$

$$\frac{D_{cr}}{0.5\Delta + \Delta_{MCE}} \geq 1.1 \quad (5.82)$$

$$1.967 > 1.1 \text{ OK}$$

El aislador cumple con todas las condiciones impuestas por lo tanto el diseño es correcto.

5.5 PROGRAMA ELASTOESPE.

ELASTOESPE es un programa computacional desarrollado en la plataforma de Matlab para el diseño de aisladores sísmicos elastoméricos, tiene una interfaz gráfica muy amigable y su uso es muy sencillo, el programa puede ser iniciado de dos formas, la primera es mediante el ejecutable, sirve para abrir el programa en cualquier computador sin la necesidad que esté instalado el Matlab, para esto se ubica en la carpeta que contiene el archivo “**ELASTOESPE_pkg**” (Figura 81) y se le da doble clic, inmediatamente se despliega la ventana que se muestra en la figura 82, y se sigue las instrucciones que aparecen; esta ventana se cierra automáticamente una vez que se haya terminado el proceso.

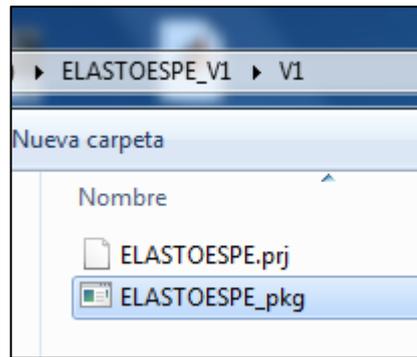


Figura 81: Archivo con el ejecutable del programa.

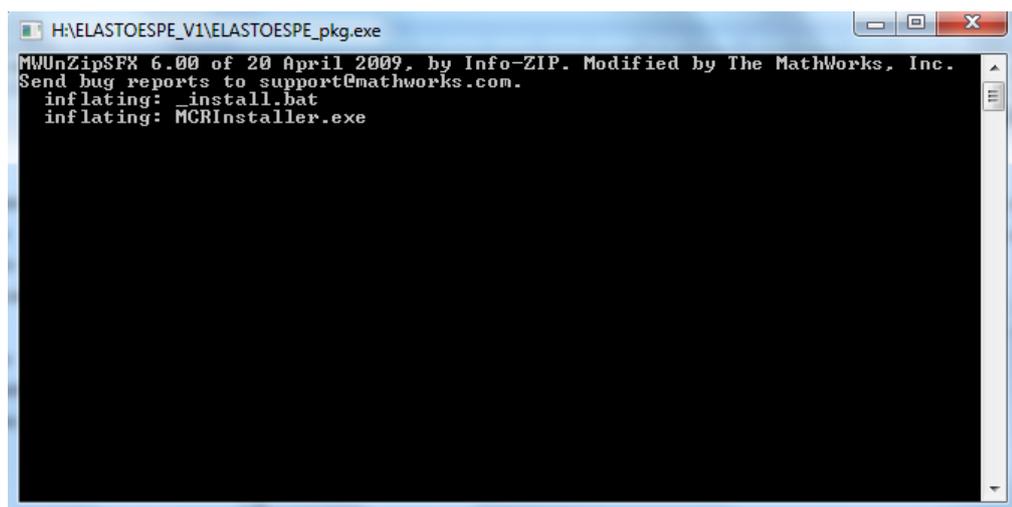


Figura 82: Ventana de Instalación el Programa ELASTOESPE.

Una vez terminado el proceso en la carpeta original aparecen 3 archivos adicionales como se muestra en la figura 83.

ELASTOESPE_V1 ▶				
Nueva carpeta				
Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño	
readme	11/12/2013 16:23	Documento de tex...	2 KB	
MCRInstaller	23/08/2012 4:19	Aplicación	351 078 KB	
ELASTOESPE_pkg	11/12/2013 16:52	Aplicación	352 848 KB	
ELASTOESPE.prj	11/12/2013 16:31	Archivo PRJ	60 KB	
ELASTOESPE	11/12/2013 16:23	Aplicación	2 183 KB	

Figura 83: Ventana con archivos de Ejecución.

El programa se ejecuta al dar doble clic sobre el archivo “ELASTOESPE” marcado en la ventana anterior, como referencia este archivo está identificado con el icono de MATLAB.

La segunda forma de acceder al programa es mediante la plataforma de MATLAB, para esto se abre el programa se ubica la carpeta en la que se encuentra alojado el archivo y en la consola se digita el nombre del archivo y se presiona “enter” como se muestra en la Figura 84.

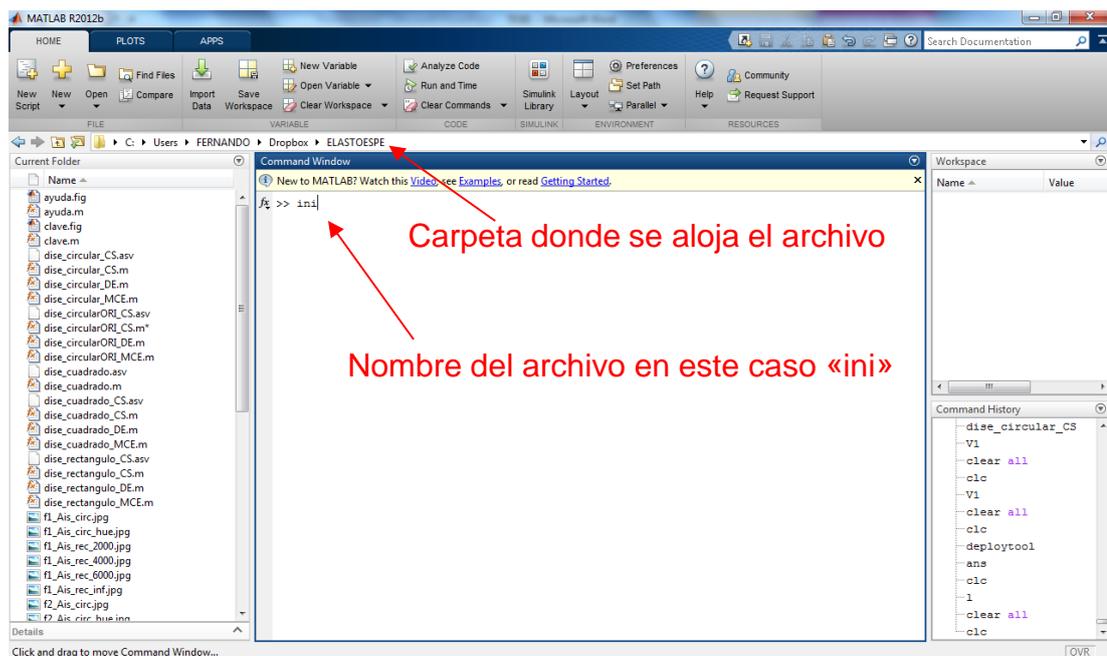


Figura 84: Acceso al programa mediante la plataforma de MATLAB.

Al ingresar por cualquier método de los descritos anteriormente se despliega la ventana de inicio que se muestra en la figura 85, en esta ventana se presiona el botón continuar el cual abrirá la ventana de código (Figura 86), en esta ventana se ingresa el código en este caso “0000” y se da clic en ingresar.



Figura 85: Ventana de inicio del programa.



Figura 86: Ventana de ingreso del código y acceso a la plataforma de cálculo.

La ventana de la plataforma de cálculo se muestra en la figura 87, esta ventana está compuesta por cuatro paneles los cuales se describen a continuación:



Figura 87: Ventana de la plataforma de cálculo.

Cabe mencionar que es muy importante llenar los datos que se piden siguiendo la secuencia de los paneles y los botones de cálculo de lo contrario no se obtendrá ningún resultado.

En el panel que se muestra en la figura 88, se ingresan los datos del proyecto correspondientes a la zona sísmica, tipo de suelo y la región, este último parámetro corresponde a la región donde se va a construir es decir Sierra, Costa u Oriente, también se presenta dos opciones adicionales, las provincias de Esmeraldas y Galápagos, debido a que en la NEC-11 se hace consideraciones especiales para estas dos provincias en el cálculo de los espectros de aceleraciones.

Se escoge igualmente el tipo de aislador a diseñar y las propiedades de los materiales. Por último se realiza aun pre-dimensionamiento, para ello se debe escoger la forma del aislador, luego se presiona el botón de área, se ingresa un área y se presiona calcular, el programa genera una dimensión, si se está de acuerdo con esa

dimensión se la mantiene de lo contrario se ingresa otra dimensión y se presiona calcular.

DATOS DEL PROYECTO	
Zona Sísmica :	V
Tipo de Suelo :	C
Región :	Sierra
P (Carga sobre el Aislador)	650 T
f'c (Cimentación) :	350 Kg/cm ²
Tipo de Columna :	Circular
De =	90 cm
TIPO DE AISLADOR	
	SIN NUCLEO DE PLOMO
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	
K Módulo volumétrico Goma	40800 Kg/cm ²
G Módulo de corte de la Goma	6.171 Kg/cm ²
Fy Esfuerzo de fluencia Acero	4200 Kg/cm ²
PREDIMENSIONAMIENTO	
FORMA :	CUADRADO
A >	1857.14 cm ²
A :	4000 cm ² (Área adoptada)
DIMENSIONES PROPUESTAS	CALCULAR
L:	63.2456 cm
DIMENSIONES ADOPTADAS	
L:	100 cm
	CALCULAR

Figura 88: Panel de datos iniciales.

El segundo panel (Figura 89) se realizan los cálculos correspondientes a la curva de histéresis y las propiedades dinámicas para ellos se debe ingresar la altura total de la gomas Tr en cm., el espesor de las láminas de goma y de las láminas de refuerzo

en mm., con estos datos se calcula el número de láminas de goma que se va a emplear y la altura total del núcleo del aislador, luego de esto se ingresa el desplazamiento esperado por el aislador y el amortiguamiento, ingresados esto datos se presiona el botón “Calcular”, inmediatamente el programa reporta el desplazamiento de diseño o desplazamiento real del aislador, el desplazamiento máximo, los puntos para la curva de histéresis, las propiedades dinámicas del aislador y los gráficos correspondientes a los espectros de desplazamientos y la curva de histéresis.

A:	10000	cm ²	(Área final)
Tr:	30	cm	(Altura Total Propuesta)
t:	12	mm	(Espesor de la goma)
ts:	5	mm	(Espesor laminas acero)
No. Gomas =	25	Ht:	42 cm
D:	10	cm	(Desplazamiento Esperado)
β :	15	%	(Amortiguamiento efectivo)
<input type="button" value="CALCULAR"/>			
DD:	43.8403	cm	
DM:	65.7604	cm	
Qd:	30038.7	Kg	
kp:	2057	Kg/cm	
Fy:	35181.2	Kg	
ED:	4.96723	Kg-cm	
ke:	14072.5	Kg/cm	
S:	20.8333		
Ec:	10536.7	Kg/cm ²	
B:	1.39039		
Keff:	2742.18	Kg/cm	
Teff:	3.09012	seg.	
Beff:	0.15	%	
Fmax:	120218	Kg	
kv:	3.51224e+06	Kg/cm	
DISEÑO Y COMPROBACIÓN			
P	Cargas de Servicio	609.96	T
P	Sismo de Diseño	780.7	T
P	Sismo Máximo Considerado	1623.92	T
θ		0.00059	rad.
Δ		0.35	cm
	1 laminas sin agujeros/2 con agujeros	1	
<input type="button" value="COEFICIENTES f1 Y f2"/>			
f1:	1.63996	f2:	0.45332
Pcr:	5.82817e+0	<input type="button" value="DISEÑAR"/>	

Figura 89: Panel de Pre-dimensionamiento del Aislador.

En la Parte inferior del segundo panel se ingresan los datos para realizar el diseño y comprobación de las medidas del aislador, por lo tanto se proporcionan las cargas que llegan al aislador correspondiente al análisis de cargas de servicio, cargas últimas y cargas dinámicas, también se ingresa la rotación, el desplazamiento lateral y se indica si las láminas de refuerzo son con agujeros o sin agujeros, por último se ingresan los coeficientes f_1 y f_2 , estos coeficientes se obtienen al presionar el botón “COEFICIENTES f_1 Y f_2 ”, luego se presiona el botón “DISEÑAR” y los resultados se los puede ver en el tercer panel que se muestra en la figura 90.

COMPROBACIÓN CARGAS DE SERVICIO (CS)						
δ	Ar	γ_{ccs}	γ_{scs}	γ_{rcs}	$\Sigma\gamma \leq 6$	ts ≥ 1.9
0	9965	0.780931	0.0116667	0.703905	1.4965	0.0274599
P'cr	P'cr/Pu>2	fb	Mu	tes >	Pu/ArGS*f1<=3.5	
5.80777e+	9.52156	386.75	604672	25.2955	0.0007809	
COMPROBACIÓN SISMO DE DISEÑO (DE)						
δ	Ar	γ_{cDE}	γ_{sDE}	γ_{rDE}	$\Sigma\gamma \leq 7$	ts ≥ 1.9
0	5580.97	1.78469	1.47301	0.703905	3.60965	0.065075
P'cr	P'cr/Pu>1.1	fb	Mu	tes >		
3.25269e+	4.16637	386.75	109067	10.7431		
COMPROBACIÓN SISMO MÁXIMO CONSIDERADO (MCE)						
δ	Ar	γ_{cMCE}	γ_{sMCE}	γ_{rMCE}	$\Sigma\gamma \leq 9$	ts ≥ 1.9
0	3406.46	6.08204	2.19785	0.703905	3.43367	0.263471
P'cr	P'cr/Pu>1.1	fb	Mu	tes >	P'cr $\geq 0.15P_{cr}$	
1.98534e+	1.22256	595	6063.43	2.40306	874225	
Dcr						
----- ≥ 1.1						
0.5 Δ + Δ_{MCE} 1.41245						
VER COMPORTAMIENTO				NUEVO DISEÑO		

Figura 90: Panel de Resultados de la Comprobación del Diseño del Aislador.

Adicionalmente en el tercer panel se encuentran dos botones “VER COMPORTAMIENTO” y “NUEVO DISEÑO”, el primer botón muestra un video

del comportamiento de un aislador elastomérico y el segundo limpia todos los campos para realizar un nuevo cálculo.

El programa presenta un cuarto panel, que corresponde a resultados gráficos, en él se puede apreciar los diagramas de desplazamientos, la curva de histéresis generada por el aislador y el comportamiento del mismo, este panel se lo muestra en la figura 91.

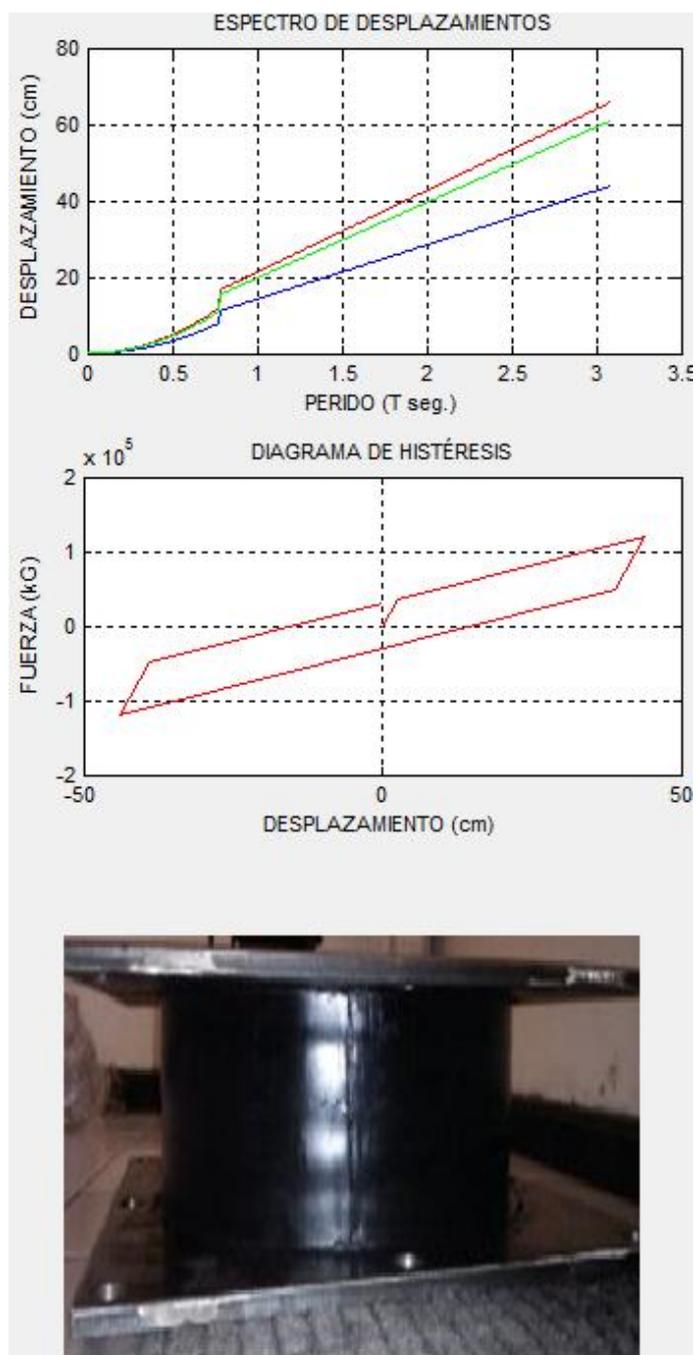


Figura 91: Panel de resultados gráficos.

CAPÍTULO 6

EXPERIENCIAS CON AISLADORES SÍSMICOS ELASTOMÉRICOS FABRICADOS EN LA ESPE

CAPITULO 6

EXPERIENCIAS CON AISLADORES ELASTOMÉRICOS

FABRICADOS EN LA ESPE

6.1 INTRODUCCIÓN

La fabricación de aisladores elastoméricos en la ESPE comienza a partir del año 2010, en el cual se fabrican tres prototipos los mismos que fueron analizados con éxito arrojando resultados muy interesantes. Posteriormente en el 2012 ANDEC construye un Aislador de dimensiones considerables, el mismo que fue ensayado en el 2013, y a diferencia de los prototipos este fracasó y no se comportó de la manera esperada. Con la experiencia de este último en el mismo año se decide construir un nuevo aislador, para continuar con las investigaciones. A continuación se detallan los estudios realizados y los resultados obtenidos en cada una de las experiencias.

6.2 PROTOTIPOS AGUIAR – AUQUI 2010

En el 2010 el Ingeniero Marco Auqui, realiza el estudio de tres prototipos de Aisladores Elastoméricos, contruidos con neopreno de buenas características y con una dureza shore 65 ± 5 , los mismos que fueron elaborados mediante vulcanizado y acoplado a las placas de acero dúctil con una goma especial que trabaja de forma eficiente al momento de sufrir fatiga.

Se analizó el aporte que presentan estos, cuando se incorpora en su núcleo un perno pasante (Figura 92), perno macizo vulcanizado (Figura 95) y resorte (Figura 98), con esto se pretendió simular un amortiguamiento semejante o mejor que los aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo.

6.2.1 PRIMER PROTOTIPO: AISLADOR CON PERNO PASANTE

El prototipo tenía las siguientes dimensiones: altura = 135mm, base = 140mm, espesor del neopreno exterior = 11mm, espesor del neopreno interior = 9mm, espesor de las láminas de acero interiores = 3mm, espesor de las capas de anclaje = 15mm, total láminas de neopreno = 8, total láminas de acero = 7.

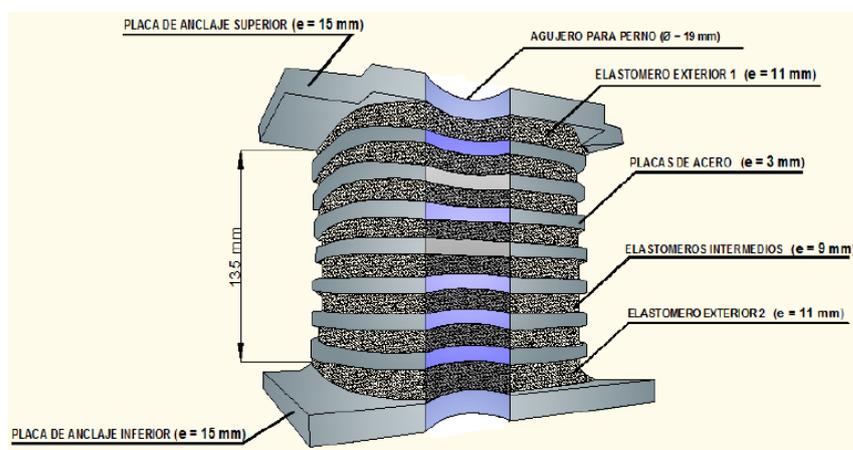


Figura 92: Esquema del Prototipo con perno pasante (Auqui M. , 2010)

El perno que se colocó en el núcleo del aislador, tenía un diámetro de 19mm y una altura de 137mm (Figura 93), el juego que este tenía era de 2mm; al momento de realizar el ensayo se presentó una resistencia a la deformación, esta resistencia generada por el perno no produjo daño alguno al Neopreno motivo por el cual se retiró el perno y se lo ensayo dejando un orificio de 21mm.

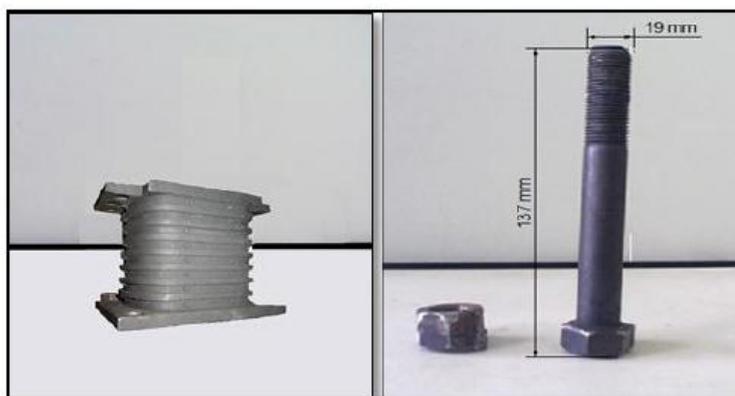


Figura 93: Esquema del perno pasante (Auqui M. , 2010)

Los ensayos efectuados para este prototipo y para los demás fueron a corte directo, simulando sismos, mediante la aplicación de cargas variables con frecuencias desde los 0.05 Hz y desplazamientos desde el 10% hasta el 100%, estos ensayos se los realizo en la máquina de ensayos universales y la restricción del pistón es de 76mm tomando a este valor como el 100%.

De los datos que se obtuvieron en los ensayos se registraron:

- La relación fuerza – Desplazamiento mediante la curva de histéresis.
- Los bucles histeréticos o comportamiento no lineal obtenidos de la gráfica fuerza – desplazamiento para determinar el área promedio y la energía disipada por el aislador.
- Las fuerzas y desplazamientos máximos, relacionados con el voltaje tanto programado, como el observado en el lector digital de la máquina. (Aiqui M. , 2010)

Los ensayos que se dieron como válidos fueron aquellos en que los desplazamientos fueron mayores al 50% cuando se programaron frecuencias mayores de $\Omega = 0.30$ Hz.

En la figura 94 se muestran las curvas de histéresis a frecuencias de 0.10Hz y 0.30Hz con sus respectivas deformaciones del 40% y 60%, en donde se puede apreciar la equidad de desplazamientos a frecuencias bajas y la inequidad de los mismos a frecuencias mayores.

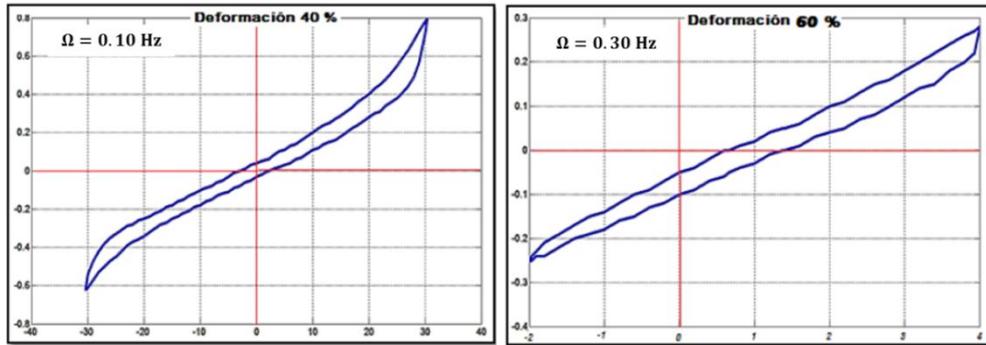


Figura 94: Curvas de Histéresis a frecuencias de 0,10 Hz y 0.30 Hz

(Auqui M. , 2010)

6.2.2 SEGUNDO PROTOTIPO: AISLADOR CON PERNO VULCANIZADO

En este prototipo se incluyó un perno macizo el cual se vulcanizó conjuntamente con las placas internas. Este planteamiento de vulcanizar el perno se lo tomo para analizar cuanta rigidez absorbe al rigidizar el núcleo mediante un perno macizo de acero dúctil pues paralelamente se realizó las mejoras correspondientes a las características del neopreno, la adhesión caucho-metal, la rigidez tanto horizontal y vertical del mismo, y el amortiguamiento. El esquema del prototipo se detalla en la figura 95. Las dimensiones del este prototipo se mantuvieron igual que en el prototipo anterior.

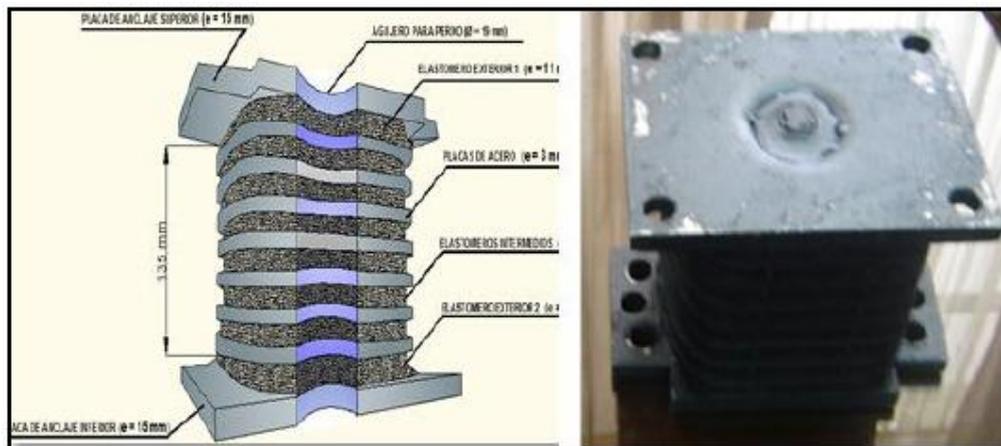


Figura 95: Prototipo con perno macizo vulcanizado (Auqui M. , 2010)

Los ensayos que se realizaron a este prototipo son los mismos que se detallaron el prototipo anterior; las curvas de histéresis que se obtuvieron a frecuencias bajas y altas se las muestra en la figura 96 y figura 97 respectivamente.

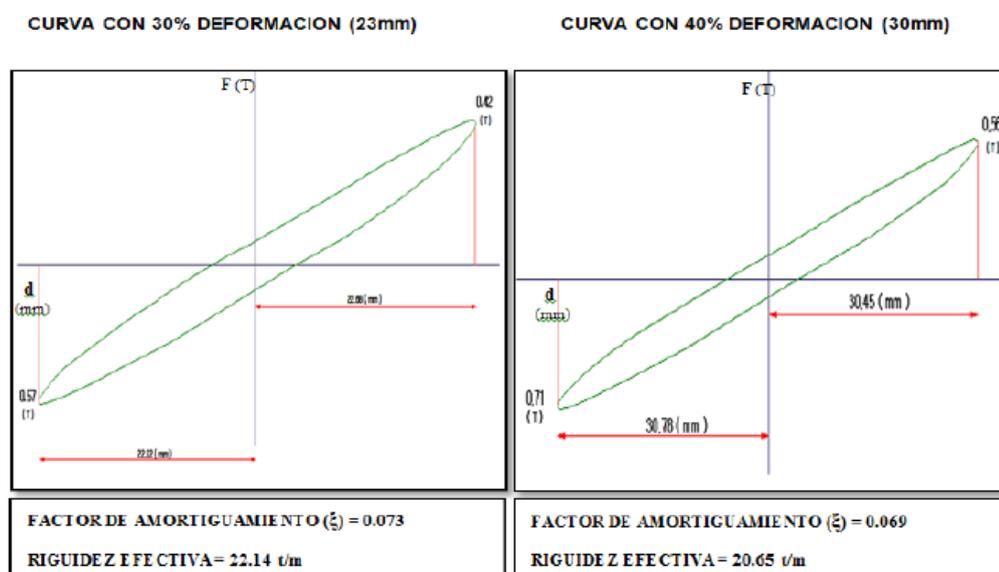


Figura 96: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.10$ Hz. (Auqui M. , 2010)

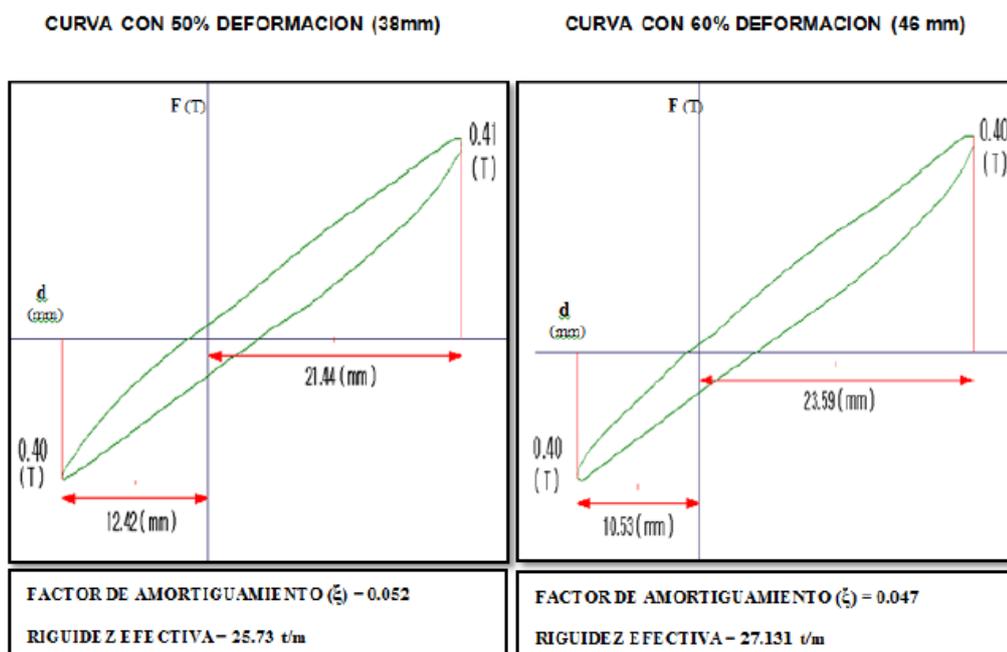


Figura 97: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.30$ Hz. (Auqui M. , 2010)

6.2.3 TERCER PROTOTIPO: AISLADOR CON RESORTE EN EL NÚCLEO

El tercer Prototipo de Aislador se construyó con un resorte en el núcleo, con el fin de aprovechar la rigidez vertical que brinda ante un análisis, según lo explica el Ing. Marco Auqui.

Este resorte se vulcanizó conjuntamente con las placas de acero internas, para que en los pasos del resorte al momento de generar fuerzas laterales este se rigidice más sin crear superficies vacías, también en los extremos del resorte se realizó unas guías para evitar un desplazamiento del mismo al momento de ensayarlo y vulcanizarlo. (Auqui M. , 2010)

El resorte que se incorporó en el núcleo, tenía un diámetro de 5cm, y el paso 1cm, la función de este, era generar un núcleo macizo que rigidice y aísle mayor energía al momento de aplicar una carga lateral, el resto de las dimensiones se mantienen igual que las dimensiones de los 2 prototipos anteriores. En la figura 98 se puede apreciar el prototipo listo para ser ensayado y el resorte colocado en su núcleo.



Figura 98: Prototipo con resorte en el Núcleo. (Auqui M. , 2010)

Al igual que en el prototipo anterior en la figura 99 y 100 se muestran los diagramas de histéresis que se obtuvieron en los ensayos a una frecuencia de $\Omega = 0.10$ Hz y $\Omega = 0.30$ Hz, con sus respectivos desplazamientos tomados a 30 % y 40%

de deformación para la primera frecuencia y al 50% y 60% de deformación para la segunda frecuencia.

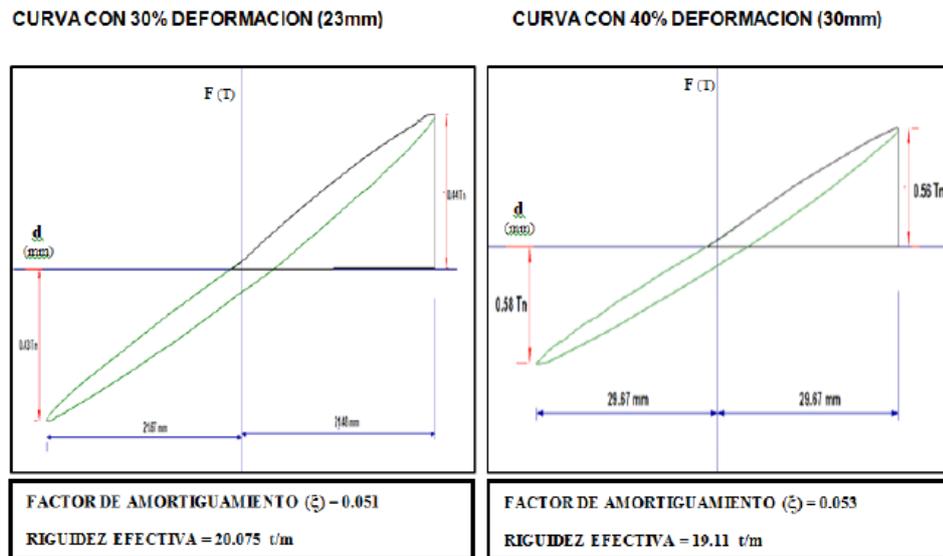


Figura 99: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.10$ Hz. (Auqui M. , 2010)

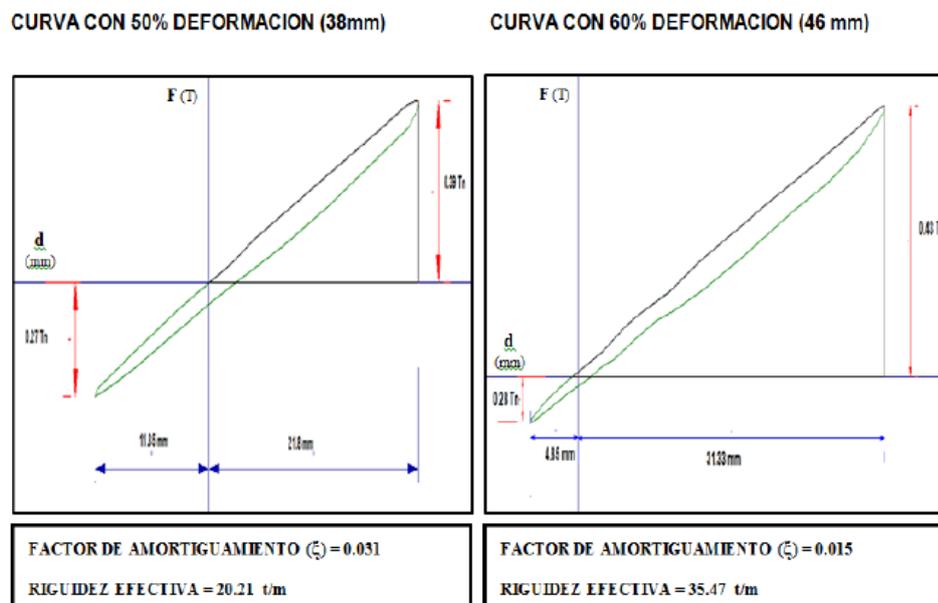


Figura 100: Curvas de histéresis con Frecuencia de $\Omega = 0.30$ Hz. (Auqui M. , 2010)

De los 3 prototipos analizados el que mejor comportamiento presentó fue el prototipo que se construyó con perno macizo vulcanizado en el núcleo, que en este caso mostró una rigidez horizontal (K_h) de 22.38 t/m y un factor de amortiguamiento (ξ) de 6%. (Auqui M. , 2010)

6.3 AISLADOR ELASTOMÉRICO ANDEC – 2012

En el 2012 la empresa ANDEC construyó un aislador Elastomérico (Figura 101), el cual se lo entregó a la ESPE con fines académicos, para ser estudiado.



Figura 101: Aislador elastomérico proporcionado por ANDEC antes de ser Ensayado

Este aislador se construyó con placas de acero grado A36 con un $F_y=4200$ Kg/cm² y con láminas de caucho Natural de dureza Shore A60, exteriormente las dimensiones del Aislador son: placas de anclaje superior e inferior = 50cm x 50cm x 1cm, altura total del aislador = 13cm, diámetro = 39cm.

Al igual que los Prototipos este Aislador se intentó ensayar con la máquina de ensayos universales del laboratorio de Ensayos de Materiales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, para este fin se tuvo que diseñar un acople (figura 102), para poder montar el Aislador en la máquina.



Figura 102: Acople y Aislador elastomérico montados en la Máquina de Ensayos Universales

Al contrario de los prototipos, con este Aislador no se pudo obtener ningún resultado, debido a que antes de empezar el ensayo, este se desprendió de las bases a causa de su propio peso como se ve en la figura 103.



Figura 103: Falla presentada en el Aislador antes de ser ensayado.

Al desmontar el aislador y examinarlo se pudo determinar su composición interna, en la cual se encontró que en las placas de los extremos se encontraban soldados tres pernos de 2 pulgadas de longitud (figura 104), los cuales se asume se colocaron para mejorar la adherencia entre las placas de anclaje y el núcleo del aislador.



Figura 104: Placa de Anclaje con pernos para mejorar la adherencia con el caucho.

Al hacer algunas incisiones en el núcleo del aislador se encontró tres láminas metálicas de refuerzo de espesor igual a 3mm y por cuatro capas de caucho cuyos espesores variaban desde los 0.6 cm a los 4.4cm, en la figura 105 se puede apreciar las capas de acero y caucho en el núcleo.

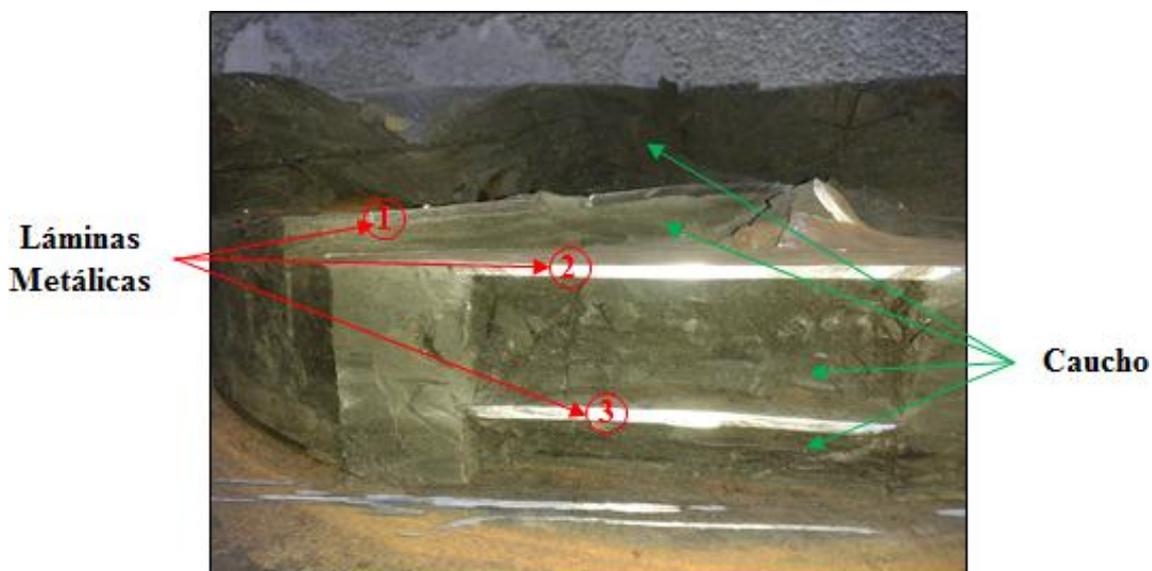


Figura 105: Distribución de caucho y acero en el Aislador.

Como se puede ver en la figura 105, la distribución de las láminas de refuerzo no es simétrica y como ya se indicó el espesor de las capas de caucho es variable, se presenta un esquema interno del aislador en la figura 106; en las láminas metálicas también se encontró perforaciones circulares en el centro y a los bordes de estas (figura 107), cuyo diámetro es de 6cm, estos agujeros se hicieron presuntamente para lograr una mejor adherencia del caucho con las láminas metálicas; además entre las láminas 1 y 2 se encontró una varilla lisa $\Phi 25\text{mm}$, y longitud 18mm (figura 108), la cual se encontraba soldada por lo que se presume que servía de separación entre las 2 placas.

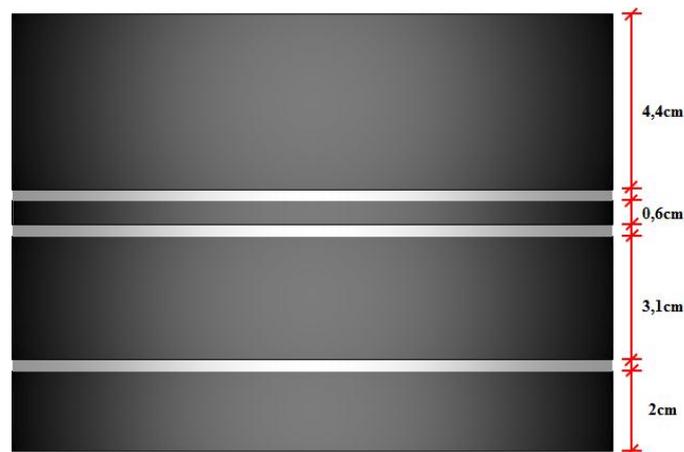


Figura 106: Esquema de la parte interna del aislador.



Figura 107: Orificios en las placas de acero internas del Aislador.



Figura 108: Varilla utilizada como separador entre las láminas de refuerzo 1 y 2.

Otra anomalía que se pudo observar es la rotura de la placa 2 como se puede ver en la figura 109, esta rotura se pudo haber dado en la vulcanización, al momento de aplicar presión sobre el aislador. La rotura se presenta en el sitio donde se encuentra el perno utilizado como anclaje.



Figura 109: Rotura presente en la lámina 2 de refuerzo.

El recubrimiento exterior de las láminas varía, para la placa de refuerzo **1** el recubrimiento es de 2 cm., y para las dos laminas restantes es de 1cm (figura 110).

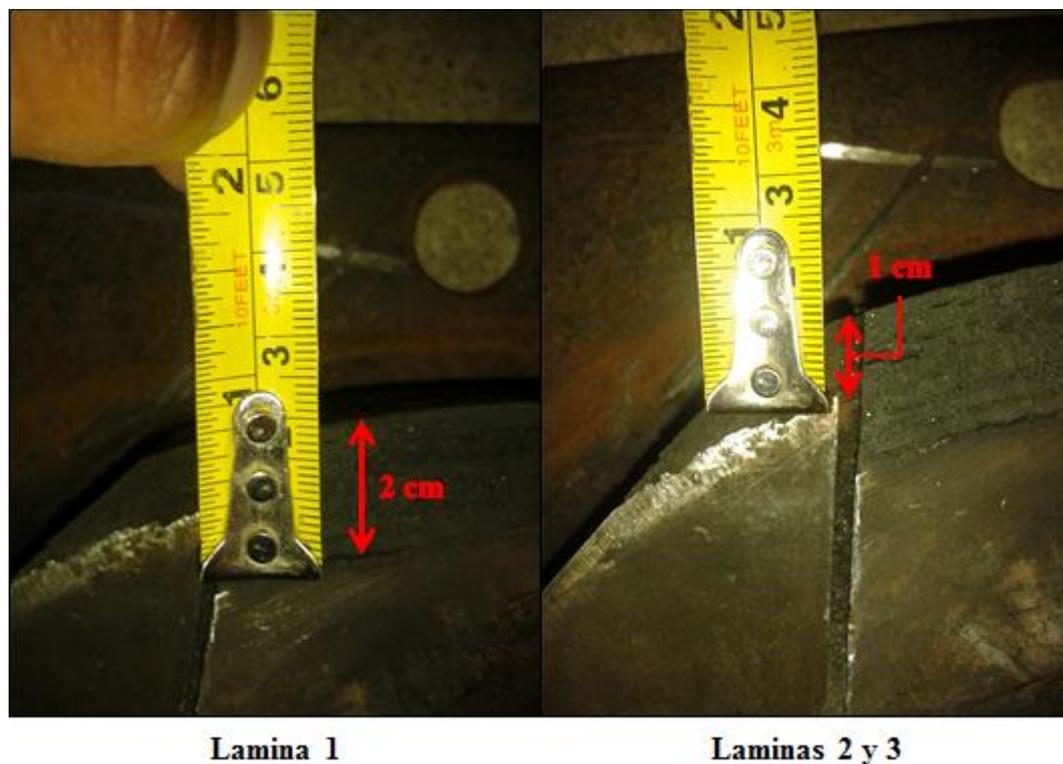


Figura 110: Recubrimiento de las láminas de refuerzo.

A pesar de no obtener datos de su comportamiento dinámico, este Aislador proporcionó información muy valiosa que sirvió para determinar la falla producida antes del ensayo.

La principal causa que produjo la falla del aislador se debe a la mala vulcanización, producto de la corrosión en las placas metálicas, como se lo ve en la figura 104, al tener la presencia de óxido se dificulta la adherencia del caucho con el acero, lo que provocó que solo quede unido en ciertas partes, esto ocasionó el desprendimiento de las placas de apoyo al momento de montar el aislador en la máquina de ensayos universales.

En conclusión y después de analizar y documentar gráficamente las anomalías en el aislador, es muy importante llevar un control estricto al momento de fabricar un sistema de aislación, de lo contrario se pueden presentar fallas como las presentadas en este aislador.

6.4 AISLADOR ELASTOMÉRICO AGUIAR – CACHIPUENDO 2013

El tercer Aislador se decidió construir a raíz del fracaso que se tuvo con el Aislador de ANDEC. Para la construcción de este, se tomó en cuenta los errores encontrados en el anterior y se los corrigió.

La estructura interna se compone por 15 láminas de caucho, 14 de 5mm y una de 2mm de espesor, 14 placas metálicas perforadas con 6 agujeros de diámetro igual a 10mm y una varilla lisa en el centro de $\Phi 10\text{mm}$ (figura 111), el recubrimiento exterior es de 5mm, las placas de anclaje o extremas son de 10mm de espesor.



Figura 111: Composición de la estructura interna del aislador.

La goma utilizada en este aislador es un elastómero o caucho sintético que se conoce como polibutadieno, cuyas características importantes son una alta

elasticidad y gran unión con los metales, razones por las cuales resultaba perfecto para utilizarlo en el aislador, la dureza que presenta es una dureza Shore A60, el módulo volumétrico (K) es igual a 20400 Kg/cm^2 , su módulo de corte (G) = 7.14 Kg/cm^2 , las láminas metálicas de refuerzo son de grado A36 cuyo $F_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$.

6.4.1 PROCESO DE DISEÑO DEL AISLADOR.

Las dimensiones de este aislador fueron establecidas en base al análisis que se realizó para el ejemplo 1 del capítulo 5, cuyos parámetros empleados se los muestra a continuación:

$$P_u = 18.32 \text{ T (carga axial que actúa sobre el aislador)}$$

$$D = 10 \text{ cm (desplazamiento Esperado).}$$

$$\beta_{\text{eff}} = 15 \% \text{ (amortiguamiento efectivo)}$$

$$\theta = 0.005 \text{ rad (capacidad de rotación del aislador)}$$

$$D = 39 \text{ cm (diámetro del núcleo del Aislador)}$$

$$T_r = 7.2 \text{ cm (altura Total de las Gomas)}$$

La carga axial a utilizar se cambia de 18.32T a 25T con el fin de ampliar el rango de cargas, el espesor de las láminas de caucho y de las láminas de refuerzo se establecieron en función del aislador anterior con el fin de mantener las dimensiones, para aprovechar el acople diseñado y realizar el ensayo en la máquina de ensayos universales. Estos espesores fueron comprobados de acuerdo al procedimiento establecido en el capítulo 5.

Cálculo de los Puntos para la construcción de la curva de histéresis.

Punto 1 (P1) = origen de coordenadas (0 ; 0)

Punto 2 (P2) = (D_y ; F_y)

$$Q = \frac{\pi \beta_{eff} k_p D^2}{(2 - \pi \beta_{eff}) D - 2 D_y} \quad (5.24)$$

$D_y = 2.5 \text{ cm}$

$\beta_{eff} = 15 \%$

$$A = \pi \frac{D_e^2}{4} = 1194.59 \text{ cm}^2$$

$$k_p = \frac{G * A}{Tr}$$

$$k_p = \frac{7.14 * 1194.59}{7.2}$$

$$k_p = 1184.64 \text{ Kg/cm}$$

$$Q = \frac{\pi * 0.15 * 1184.64 * (7.34731)^2}{(2 - \pi * 0.15) * 7.34731 - 2 * 2.5}$$

$$Q = 4835.44 \text{ Kg}$$

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (5.25)$$

$$F_y = 4835.44 + 1184.64 * 2.5$$

$$F_y = 7797.02 \text{ Kg}$$

Punto 3 (P3) = (D ; F_{max})

$$F_{max} = Q + k_p D \quad (5.26)$$

$$F_{max} = 4835.44 + 1184.64 * 7.34731$$

$$F_{max} = 13539.321 \text{ Kg}$$

Punto 4 (P4) = (x₁ ; y₁)

$$x_1 = \frac{F_{max} + Q - k_e D}{k_p - k_e} \quad (5.29)$$

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

$$k_e = \frac{7797.0247}{2.5}$$

$$k_e = 3118.81 \text{ Kg/cm}$$

$$x_1 = \frac{13539.321 + 4835.44 - 3118.81 * 7.35}{1184.64 - 3118.81}$$

$$x_1 = 2.35 \text{ cm}$$

$$y_1 = k_p x - Q$$

$$y_1 = 1184.64 * 2.35 - 4835.44$$

$$y_1 = -2054.73 \text{ Kg}$$

Punto 5 (P5) = (- D ; - F_{max})

$$P5 = (-7.35 , - 13539.32)$$

Punto 6 (P6) = (x₂ ; y₂)

$$P6 = (-2.35 , 2054.73)$$

Punto 7 (P7) = (0 ; Q)

$$P7 = (0 , 4835.44)$$

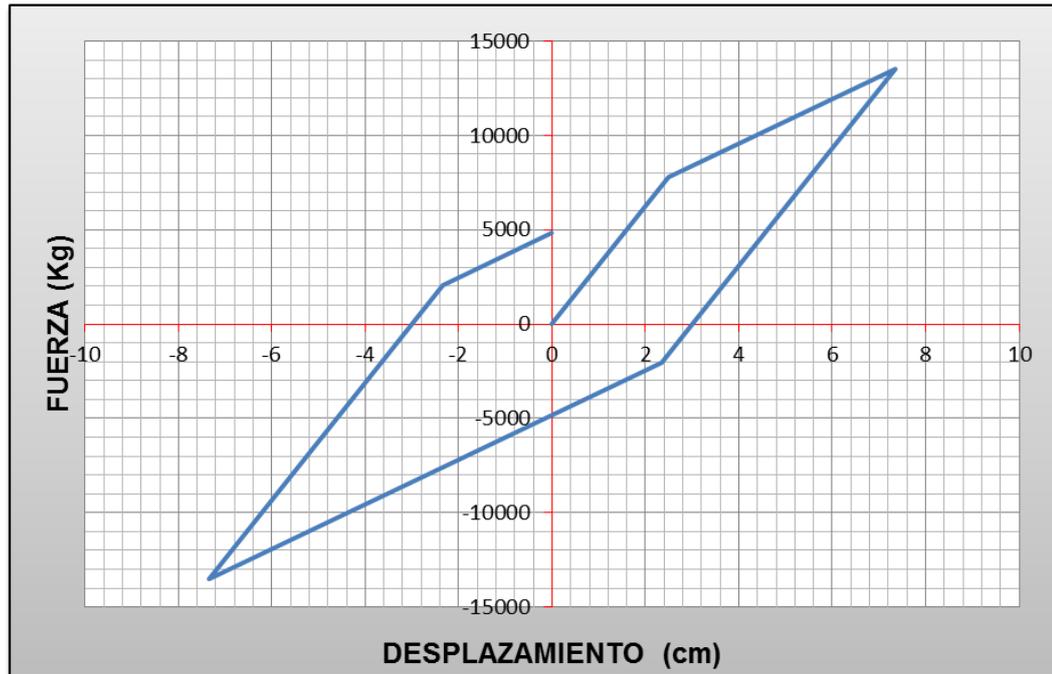


Figura 112: Diagrama de histéresis del tercer Aislador.

- **Propiedades Dinámicas del Aislador.**

Rigidez efectiva.

$$K_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (5.32)$$

$$K_{eff} = 1184.64 + \frac{4835.44}{7.35}$$

$$K_{eff} = 1842.76 \text{ Kg/cm}$$

Periodo efectivo.

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{W}{K_{eff} * g}} \quad (5.33)$$

$$T_{eff} = 2\pi * \sqrt{\frac{25000}{1842.76 * 980}}$$

$$T_{eff} = 0.739 \text{ seg.}$$

Amortiguamiento efectivo.

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5.34)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2 * 4835.44 * (7.35 - 2.5)}{\pi * 1842.758 * 7.35^2}$$

$$\beta_{eff} = 0.15$$

Carga Crítica.

$$P_{cr} = 0.218 \frac{GD_e^4}{tT_r} \quad (5.40)$$

$$P_{cr} = 0.218 \frac{7.14 * 39^4}{0.5 * 7.2}$$

$$P_{cr} = 1000254.77 \text{ Kg}$$

Calculo del factor de forma S.

$$S = \frac{D_e}{4t} \quad (5.13)$$

$$S = \frac{D}{4t} = \frac{39}{4 * 0.5} = 19.5$$

Calculo del módulo de compresión Ec.

$$E_C = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

$$E_C = \left(\frac{1}{6 * 7.14 * (19.5)^2} + \frac{4}{3 * 20400} \right)^{-1}$$

$$E_C = 7889.72 \text{ Kg/cm}^2$$

Calculo de la rigidez vertical Kv.

$$k_V = \frac{E_C A}{T_r} \quad (5.9)$$

$$k_V = \frac{7889.72 * 1194.59}{7.2}$$

$$k_V = 1309026.2 \text{ Kg/cm}$$

Comprobación para Cargas de Servicio.

$\Delta = 0.05$ cm (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002$ rad (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$P = 25.0T$.

$t_s = 2$ mm (espesor de las placas de refuerzo).

$h = 10$ cm (Altura del núcleo del Aislador).

- *Calculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \quad (5.45)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{0.05}{39} \right)$$

$$\delta = 3.14$$

$$A_r = \frac{D_e^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$A_r = \frac{39^2}{4} (3.14 - \sin(3.14))$$

$$A_r = 1192.64 \text{ cm}^2$$

Los coeficientes f_1 y f_2 se los obtiene de las tablas 7 y 14, con el factor de forma S y el valor de K ($20400 \text{ Kg/cm}^2 \approx 2000 \text{ MPA}$) se ingresan en las tablas y se obtiene los valores respectivos para cada coeficiente, en este caso como el valor de S no se encuentra en las tablas se hace una interpolación con los valores cercanos y se obtiene los coeficientes.

$$f_1 = 1.326$$

$$f_2 = 0.284$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{ccs} = \frac{P_u}{A_r GS} \cdot f_1 \quad (5.67)$$

$$\gamma_{ccs} = \frac{25000}{1192.64 * 7.14 * 19.5} * 1.326$$

$$\gamma_{ccs} = 0.2$$

- *Deformación por rotación:*

$$\gamma_{rcs} = \frac{L^2(\theta_{st} + \theta)}{tT_r} \cdot f_2 \quad (5.68)$$

$$\gamma_{rcs} = \frac{39^2(0.005 + 0.0002)}{0.5 * 7.2} * 0.284$$

$$\gamma_{rcs} = 0.62$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{T_r} \quad (5.69)$$

$$\gamma_{scs} = \frac{0.05}{7.2}$$

$$\gamma_{scs} = 0.007$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\frac{P_u}{A_r GS} * f_1 \leq 3.5 \quad (5.70)$$

$$\frac{25000}{1192.64 * 7.14 * 19.5} * 1.326 \leq 3.5$$

$$0.20 < 3.5 \text{ OK}$$

$$\gamma_{ccs} + \gamma_{scs} + \gamma_{rcs} \leq 6 \quad (5.71)$$

$$0.2 + 0.62 + 0.007 \leq 6$$

$$0.83 < 6 \text{ OK}$$

$$t_s \geq 1.9mm \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

$$t_s = \frac{1.65 * 0.5}{1.08 * 4200 * \frac{1192.64}{25000} - 2}$$

$$t_s = 0.04 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 2\text{mm}$ está correcto.

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (5.42)$$

$$P'_{cr} = 1000254.77 * \frac{1192.64}{1194.59}$$

$$P'_{cr} = 998622.00 \text{ Kg}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0 \quad (5.73)$$

$$\frac{998622}{25000} \geq 2.0$$

$$39.94 \geq 2.0 \quad \text{OK}$$

Comprobación para Sismo de Diseño.

$\Delta = 0.05 \text{ cm}$ (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002 \text{ rad}$ (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$D_{DE} = 7.35\text{cm}$ (Desplazamiento por sismo de Diseño).

$P = 66.39\text{T}$.

$t_s = 2\text{mm}$ (espesor de las placas de refuerzo).

- *Cálculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D} \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta = 0.05 + D_{DE}$$

$$\Delta = 0.05 + 7.35$$

$$\Delta = 7.40$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{7.40}{39} \right)$$

$$\delta = 2.76$$

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$A_r = \frac{39^2}{4} (2.76 - \sin(2.76))$$

$$A_r = 907.83 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{cDE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.74)$$

$$\gamma_{cDE} = \frac{66390}{907.83 * 7.14 * 19.5} * 1.326$$

$$\gamma_{cDE} = 0.70$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{sDE} = \frac{\Delta + \Delta_{DE}}{T_r} \quad (5.75)$$

$$\gamma_{sDE} = \frac{0.05 + 7.35}{7.2}$$

$$\gamma_{sDE} = 1.03$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{cDE} + \gamma_{sDE} + 0.5\gamma_{rcs} \leq 7 \quad (5.76)$$

$$0.70 + 1.03 + 0.5 * 0.62 \leq 7$$

$$2.036 \leq 7 \quad \mathbf{OK}$$

$$t_s \geq 1.9 \text{ mm} \quad (5.72)$$

$$t_s \geq \frac{1.65t}{1.08F_y \frac{A}{P_u} - 2} \quad (5.50)$$

$$t_s = \frac{1.65 * 0.5}{1.08 * 4200 * \frac{907.83}{66390} - 2}$$

$$t_s = 0.14 \text{ mm}$$

Como se asumió un $t_s = 2\text{mm}$ está correcto.

Comprobación para Sismo Máximo Considerado.

$\Delta = 0.05 \text{ cm}$ (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$\theta = 0.0002 \text{ rad}$ (obtenido del análisis estructural Tabla 22).

$D_{MCE} = 11.021\text{cm}$ (Desplazamiento por sismo Máximo Considerado).

$P = 72.96\text{T}$.

$t_s = 2\text{mm}$ (espesor de las placas de refuerzo).

- *Calculo del área reducida.*

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D_e} \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta = 0.05 + D_{MCE}$$

$$\Delta = 0.05 + 11.021$$

$$\Delta = 11.07$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{11.07}{39} \right)$$

$$\delta = 2.57$$

$$A_r = \frac{D_E^2}{4} (\delta - \sin \delta) \quad (5.44)$$

$$A_r = \frac{39^2}{4} (2.57 - \sin(2.57))$$

$$A_r = 768.69 \text{ cm}^2$$

- *Deformación por Compresión.*

$$\gamma_{cMCE} = \frac{P_u}{A_r G S} \cdot f_1 \quad (5.77)$$

$$\gamma_{cMCE} = \frac{72960}{768.69 * 7.14 * 19.5} * 1.325$$

$$\gamma_{cMCE} = 0.90$$

- *Deformación por desplazamiento lateral:*

$$\gamma_{sMCE} = \frac{0.5\Delta + \Delta_{MCE}}{T_r} \quad (5.78)$$

$$\gamma_{sMCE} = \frac{0.5 * 0.05 + 11.021}{7.2}$$

$$\gamma_{sMCE} = 1.534$$

- *Comprobación por Pandeo:*

$$P'_{crMCE} \geq 0.15P_{cr} \quad (5.79)$$

$$P'_{crMCE} = 1000254.77 * \frac{768.69}{1194.59}$$

$$P'_{crMCE} = \mathbf{643641.87 \text{ Kg}}$$

$$0.15P_{cr} = 0.15 * 1000254.77$$

$$\mathbf{0.15P_{cr} = 150038.22 \text{ Kg}}$$

$$643641.87 \text{ Kg} > 150038.22 \text{ Kg} \quad \mathbf{CUMPLE}$$

El diseño se acepta si cumple con las condiciones a continuación:

$$\gamma_{CMCE} + \gamma_{SMCE} + \gamma_{rcs} \leq 9 \quad (5.80)$$

$$0.90 + 1.5342 + 0.62 \leq 9$$

$$3.062 < 9 \text{ **CUMPLE**}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1 \quad (5.81)$$

$$\frac{643641.87}{72960} \geq 1.1$$

$$8.82 \geq 1.1 \text{ **OK**}$$

$$D_{cr} = \frac{PB}{K_{eff}h + P} \quad (5.49)$$

$$D_{cr} = \frac{72960 * 39}{1842.76 * 10 + (72960)}$$

$$D_{cr} = 31.21 \text{ cm}$$

$$\frac{D_{cr}}{0.5\Delta + \Delta_{MCE}} \geq 1.1 \quad (5.82)$$

$$\frac{31.21}{0.5 * 0.05 + 11.021} \geq 1.1$$

$$3.92 > 1.1 \text{ **CUMPLE**}$$

Cálculo del espesor de las placas de montaje

Para este método se usa los datos obtenidos en la comprobación para Sismo Máximo Considerado.

- *Calculo de la dimensión **b** del área reducida rectangular equivalente*

$$b = \frac{A_r}{0.75L} \quad (5.52)$$

$$b = \frac{768.69}{0.75 * 39}$$

$$b = 26.28 \text{ cm}$$

- *Calculo de la resistencia del hormigón en el apoyo.*

$$f_b = 1.7\phi_c f'_c \quad (5.53)$$

$$f_b = 1.7 * 1 * 210$$

$$f_b = 357 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Calculo la dimensión b_1 del área de carga del hormigón.*

$$b_1 = \frac{P}{0.75L f_b} \quad (5.54)$$

$$b_1 = \frac{72960}{0.75 * 39 * 357}$$

$$b_1 = 6.99 \text{ cm}$$

- *Calculo del brazo de palanca.*

$$r = \frac{b_1 - b}{2} \quad (5.55)$$

$$r = \frac{6.99 - 26.28}{2}$$

$$r = -9.65 \text{ cm}$$

- *Calculo del momento generado en el apoyo.*

$$M_u = \frac{f_b r^2}{2} \quad (5.56)$$

$$M_u = \frac{357 * (-9.65)^2}{2}$$

$$M_u = 16610.47 \text{ Kg.cm}$$

- *Calculo del espesor de la placa de montaje.*

$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4M_u}{\phi_b F_y}} \quad (5.57)$$

$$t_{es} \geq \sqrt{\frac{4 * 16610.47}{1 * 4200}}$$

$$t_{es} \geq 3.98 \text{ cm}$$

$$t_{es} \geq \mathbf{39.8 \text{ mm}}$$

El espesor escogido es de 10mm, por lo tanto no cumple con el diseño de las placas de anclaje sin embargo se lo construyo con el espesor escogido para mantener las dimensiones del aislador de ANDEC.

6.4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL AISLADOR.

Una vez que se realizó el diseño y se comprobó de las dimensiones establecidas, se procedió a fabricar el aislador, a continuación se muestra el proceso que se llevó a cabo para su construcción.

1. Alineación y perforación de las placas base (Figura 113).



Figura 113: Placas base.

2. Corte de las láminas de caucho (figura 114).



Figura 114: Láminas de caucho.

3. Preparación de las láminas de metálicas de refuerzo (figura 115).



Figura 115: Perforación de las láminas de refuerzo y colocación de una pega especial para el vulcanizado.

4. Preparación de las placas base para el vulcanizado (figura 116).



Figura 116: Limpieza de las placas base y colocación de una pega especial para el vulcanizado en las bases y el molde.

5. Armado del Núcleo del aislador (figura 117).



Figura 117: Colocación de las láminas de caucho y las placas de refuerzo alternadamente.

6. Preparación del aislador para el vulcanizado (figura 118).



Figura 118: Colocación del molde exterior y la capa de recubrimiento / colocación y fijación de la placa superior del aislador.

7. Vulcanizado del aislador (figura 119).



Figura 119: Aislador colocado en la prensa de vulcanizado / excedentes de caucho producto del vulcanizado.

8. Aislador terminado (figura 120).



Figura 120: Aislador terminado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Terminado el proyecto de investigación se puede aportar con las siguientes conclusiones:

7.1 CONCLUSIONES.

Sistemas de Protección Sísmica.

- El uso de sistemas de protección sísmica mejora el comportamiento de las estructuras ante un sismo, ya que reducen el daño en los elementos estructuras y no estructurales, lo que permite que estas puedan ser utilizadas inmediatamente con toda seguridad después de ocurrido el evento.
- Los aisladores sísmicos al crear una interfaz flexible entre el suelo y la superestructura, reducen las aceleraciones en la superestructura lo que evita el daño en la misma, se aumenta el periodo fundamental de la estructura, se incrementa el amortiguamiento en la edificación y se aumenta el desplazamiento de forma uniforme reduciendo las deformaciones.
- Todas las estructuras pueden utilizar aisladores sísmicos, se encuentren estas en etapa de construcción o ya estén construidas, lo único que se debe controlar es la relación entre altura y base de la edificación que no pase de 3, y verificar el tipo de suelo en el que se encuentra.
- Los Aisladores sísmicos elastoméricos presentan un excelente comportamiento cuando la estructura aislada es regular tanto en planta como en elevación. Cuando la estructura es irregular los aisladores dejan de actuar como un solo sistema y comienzan a trabajar independientemente lo que genera varios desplazamientos

debido a que la concentración de masas no se ubica en el centro geométrico de la estructura.

Software de Diseño: Programa ELASTOESPE.

- El programa ELASTOESPE es una herramienta informática que contribuye en el campo de estudio de la aislación sísmica en la Universidad de las Fuerzas Armadas, y ayuda en la comprobación del diseño de aisladores sísmicos elastoméricos.
- El diseño de un software de cálculo requiere de tener bien en claro los conceptos del tema a programar, además de un buen conocimiento en el área de programación, para establecer las rutinas necesarias para el funcionamiento del mismo, también se deben realizar varias pruebas para determinar errores con el fin de corregirlos y ofertar un programa funcional.
- A diferencia de los softwares comerciales de diseño estructural, este programa se orienta únicamente al cálculo y diseño de aisladores sísmicos elastoméricos, su función es proporcionar los parámetros que necesitan los softwares convencionales para el modelamiento de aisladores sísmicos.

Experiencias con Aisladores fabricados en la ESPE.

- Al realizar las pruebas del aislador en la máquina de ensayos universales, lo único que se puede medir es la eficiencia del vulcanizado, debido a que esta máquina no proporciona las condiciones adecuadas para que el aislador trabaje a toda su capacidad.
- En los prototipos mencionados en la primera experiencia, las variaciones presentadas en las curvas de histéresis con frecuencias altas, en los ensayos

realizados se debe a la deficiencia de la máquina, al no poder generar una carga axial que simule el peso de la estructura, generando giros y por lo tanto inestabilidad en los aisladores.

- En el caso del dispositivo fabricado por ANDEC, se nota la importancia de mantener un diseño y un control adecuado al momento de construir aisladores sísmicos, este es un factor importante que influye en el posterior desempeño, la falta de control puede llevar fallas prematuras en los dispositivos, como lo sucedido, el aislador falló al momento de ser montado en la máquina de ensayos universales, sin la influencia de carga alguna.
- A pesar que el aislador de la tercera experiencia fue construido en base a un diseño y bajo un adecuado control de calidad, no pudo ser ensayado debido a la falta de equipos e implementos adecuados que brinden un entorno favorable, esto se convierte en un gran limitante para la investigación, ya que no se puede determinar sus propiedades dinámicas en forma práctica para compararlas con las obtenidas teóricamente y determinar si el diseño es el adecuado o no.

7.2 RECOMENDACIONES

Sistemas de Protección Sísmica.

- Para determinar el tipo de sistema de protección sísmica a usar se recomienda realizar un análisis económico en el cual se debe establecer los aspectos positivos y negativos de cada sistema.
- Después de cada sismo se debe realizar una inspección visual de los aisladores sísmicos para identificar posibles daños en estos, en caso de observar grietas en el núcleo del aislador este debe ser reemplazo inmediatamente.

- Las gradas y ascensores al igual que las instalaciones de agua, gas, luz y otras deben estar ancladas a la superestructura y tener un cierto juego, para evitar daños al momento de ocurrir un sismo.
- Para Aislar estructuras irregulares y de gran esbeltez siempre y cuando cumplan con la relación altura sobre base de la edificación menor a 3, se recomienda utilizar una losa de transferencia, con esto se consigue una mejor distribución de las cargas, reducir el número de aisladores y un adecuado comportamiento de los mismos.

Software de Diseño: Programa ELASTOESPE.

- El programa ELASTOESPE al ser la primera versión, se recomienda sea revisado con la finalidad de mejorarlo antes de utilizarlo como un software de carácter comercial o similar.

Experiencias con Aisladores fabricados en la ESPE.

- Al momento de construir los aisladores se recomienda llevar un estricto control de calidad, para evitar que estos fallen como ocurrió con el aislador de ANDEC mencionado en la segunda experiencia.
- Tratar de equipar al Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, con un laboratorio de Estructuras, para que se puedan realizar los ensayos que requieren este tipo de dispositivos.
- Al momento de realizar los ensayos de los aisladores sísmicos, se recomienda hacerlos en un equipo que proporcione las condiciones adecuadas, simulando la carga vertical de la estructura y la fuerza dinámica proveniente del sismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2011). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito.
- AASHTO. (2010). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. Washington, DC.
- Aguiar Falconí, R., Espinoza, D., Castillo, Á., & Cruz, M. (25 de Agosto de 2013). *ANÁLISIS SÍSMICO DE APOYOS INTERIORES DEL PUENTE DE BAHÍA DE CARÁQUEZ CON AISLADORES FPS ANTE UN SISMO LEJANO Y OTRO IMPULSIVO*. Obtenido de http://biblioteca.espe.edu.ec/upload/Articulo_3_sobre_puente_de_Bahia.pdf
- Aguiar, R. (1999). *sismos*. quito: ESPE.
- Aguiar, R. (2010). PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ECUADOR Y DESCRIPCIÓN DE LOS PUENTES CONSTRUIDOS SOBRE EL ESTUARIO DEL RÍO ESMERALDAS, CON AISLADORES DE BASE FPS . *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 15, 1, 85-119.
- Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., & Suárez, V. (2008). *Aisladores de Base Elastoméricos y FPS*. Sangolquí: ESPE.
- American Society of Civil Engineers. (2010). *ASCE Standar (ASCE/SEI 7-10), Minimun Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia: ASCE.
- Arancibia Carvallo, F. (15 de Septiembre de 2013). *Ingeniería Sísmica y la Construcción Civil*. Obtenido de <http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com/>
- Auqui, P., & Aguiar, R. (2010). *Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador*. Sangolquí: ESPE.

- Chacón, W., & Aguiar, R. (2009). *Torsión accidental en estructuras con aislamiento de base*. Sangolquí: ESPE.
- Constantinou, M. C. (2011). *LRFD - Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*. Buffalo: MCEER.
- Constantinou, M., Soong, T., & Dargush, G. (1998). *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit*. New York: MCEER.
- Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G. (2007). *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading*. New York: MCEER.
- Correa, E., & Aguiar, R. (2011). *Análisis de los elementos elastómeros utilizados en aisladores y neoprenos*. Sangolquí: ESPE.
- ESPAÑA, M. S. (10 de Septiembre de 2013). *Maurer Söhne forces in motion*. Obtenido de <http://www.iaem.es/Documentos/SistAntisismMaurer.htm>
- Farzad, N., & James, M. K. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- IG EPN. (2010 - 2013). *Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/sismos/origen.html>
- Jara, A., & Aguiar, R. (2009). *Análisis de edificios abiertos con y sin aisladores de base elastoméricos*. Sangolquí: ESPE.
- Peña, A., & Aguiar, R. (2008). *Análisis sísmico plano de estructuras con Aisladores Elastoméricos*. Sangolquí: ESPE.
- Quintero, D., & Ussher, J. (20 de Agosto de 2013). *Asistente para el Diseño de Estructuras Sismorresistente*. Obtenido de <http://www.civil.cicloides.com/cgenerales/1.5.8/>

- Romo, M., Aguiar Falconí, R., & Bravo, V. (2007). Alternativas de Modelamiento de Estructuras con Aisladores Sísmicos mediante SAP2000. *II Congreso de Ciencia y Tecnología*.
- Salazar, J., & Aguiar, R. (2011). *Análisis Modal Espectral en estructuras con aisladores elastoméricos*. Sangolquí: ESPE.
- Sarrazín, M., Boroschek, R., Vargas, J., & Moroni, M. O. (1995). Desarrollo de Aisladores Sísmicos Circulares Huecos. En *XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural* (págs. 417-427). Tucumán.
- *UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN*. (01 de 12 de 2013). Obtenido de http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/19/cap_xii.htm

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

1. DATOS PERSONALES

Nombres y Apellidos:	Fernando Williams Cachipueno Condoy
Cédula de Identidad:	1104137235
Lugar y Fecha de Nacimiento:	Quito, 27 de Diciembre de 1987
Nacionalidad:	Ecuatoriana
Estado Civil:	Soltero
Domicilio:	Rancho los Pinos S31-127
Teléfonos	(02)3074 086 / 0984670903
E-mail:	fernando_scob@hotmail.com

2. ESTUDIOS

Primaria:

- Escuela Fiscal Mixta “Rafael Cruz Cevallos” (Quito – Ecuador), 1999

Secundaria:

- Instituto Tecnológico Superior “Cinco de Junio” (Quito – Ecuador), 2005

Superior:

- Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción - Carrera de Ingeniería Civil – Escuela Politécnica del Ejército (Sangolquí – Ecuador), 2013

3. CAPACITACIÓN

- **Curso:** Manejo de AUTOCAD básico e intermedio; Escuela Politécnica Nacional; 2006.

- **Curso:** Entrenamiento en modelado y análisis estructural con SAP2000 Básico Intermedio; CSI; 2013.
- **Curso:** XIX curso internacional de Estructuras “Aisladores Sísmicos”; Escuela Politécnica del Ejército; 2013.
- **Curso:** Safe y Etabs básico; Cámara de la Construcción de Quito; 2013

4. EXPERIENCIA PROFESIONAL

- Pasante:
Auxiliar en la sección Técnica del Grupo de Trabajo Cética; Cuerpo de Ingenieros del Ejército; 2011.

5. IDIOMAS

- Español – Nativo.
- Inglés – Suficiencia en el Idioma (Departamento de Lenguas de la ESPE).

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR

Sr. Fernando Williams Cachipundo Condoy

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Sr. Ing. Patricio Romero Flores.

Lugar y fecha: _____