

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL MENDOZA**

CEREDETEC

Tesis para otorgar el Título de Doctor en Ingeniería
Mención Civil-Ambiental

**DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE
AISLAMIENTO SISMICO CON BAJO NIVEL DE
CARGA AXIAL**

Autor: Ing. GUSTAVO GIOACCHINI

Director de Tesis: Dr. Ing. MIGUEL EDUARDO TORNELLO

Codirector de Tesis: Dr. Ing. CARLOS DANIEL FRAU

Mendoza, Argentina
2017

A Mariana, mi amor y fortaleza.

A mis hijas María y Jazmín,

los motores de vida.

A mis papás y hermanos,

todo lo que soy se los debo a ellos.

RESUMEN

Los terremotos son uno de los fenómenos naturales que causan anualmente la mayor cantidad de pérdidas de vidas humanas y también económicas. En los últimos años la ingeniería estructural sismorresistente ha desarrollado nuevas estrategias para proteger las construcciones de los terremotos entre las cuales se destaca el aislamiento sísmico. Los antecedentes sobre el empleo de estructuras aisladas indican que la estrategia de protección ha sido orientada fundamentalmente a grandes emprendimientos, aspecto que se considera altamente positivo, sin embargo, se han omitido muchas obras, ampliamente difundidas tales como viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales de bajo peso, donde el uso de dispositivos de aislamiento tendría una incidencia importante en el costo final. El objeto de la tesis es el diseño y fabricación de dispositivos elastoméricos para baja carga axial junto a su caracterización elástica y mecánica. Se presentan los resultados de los ensayos experimentales, de los distintos prototipos fabricados, ensayados a cargas verticales y horizontales cíclicas. También se muestran modelos numéricos y su validación a través de los ensayos experimentales. Los resultados obtenidos indican un aceptable comportamiento de los distintos dispositivos ensayados en función de las mediciones de energía disipada durante los ciclos de carga y descarga. Por último se realiza un análisis de la respuesta estructural de dos viviendas del Instituto Provincial de la Vivienda de Mendoza (IPV), para el caso de fundación tradicional y para el caso de fundación aislada con el nuevo sistema de aislamiento desarrollado en la presente tesis. Los resultados indican que el sistema de aislamiento reduce de manera apreciable las solicitaciones producidas en los elementos estructurales de la superestructura respecto a las construcciones con fundaciones tradicionales.

Palabras Claves:

Aislador sísmico, fabricación, ensayos experimentales, modelos numéricos

ABSTRACT

Earthquakes are one of the natural phenomena that cause annually the most loss of human lives and economic. In recent years seismic structural engineering has developed new strategies to protect buildings from the earthquakes, among which stands out seismic isolation. The background on the use of isolated structures indicate that the protection strategy was primarily aimed at large building works, which is seen as highly positive, however, they have omitted many constructions, widely used such as housing one or two levels, commercial buildings, apartment buildings of low height, structures and industrial equipment of low weight, where the use of isolation devices would have a significant impact on the final cost. The aim of the thesis is the design and manufacture of elastomeric devices for low axial load and your elastic and mechanical characterization. The results of the experiments of the different prototypes manufactured, tested for horizontal cyclic load and vertical loads are presented. Numerical models and their validation through the experimental tests are presented. The results show an acceptable behavior of different devices tested depending on the measurements of energy dissipated during cycles of loading and unloading. Finally an analysis of the structural response of two houses of the Provincial Housing Institute of Mendoza (IPV) is performed, for the case of traditional foundation and isolated foundation with new isolation system developed in this thesis. The results indicate that the isolation system reduces significantly the stresses in the elements structural of the superstructure respect to buildings with traditional foundations.

Keywords:

Seismic isolator, manufacturing, experimental tests, numerical models

AGRADECIMIENTOS

Un trabajo de esta naturaleza y de tantos años sólo es posible llevarlo a cabo con la colaboración de muchas personas. A ellas les quiero agradecer profundamente, ya que en forma desinteresada me brindaron su tiempo, quitándose a sus obligaciones y a su familia.

Gracias a Dios, primero, por permitirme llevar adelante esta apasionante tarea que es la de investigar y seguir aprendiendo todos los días.

A mi esposa, Mariana, por su amor incondicional y su paciencia infinita durante esta etapa de mi vida. A mis hijas, María y Jazmín, sus risas, besos y abrazos me llenan el alma y me dan la fuerza necesaria para seguir adelante.

Sin lugar a duda a mis papás que han sido fundamentales, ellos son fuente de ejemplo permanente y su amor para conmigo no tiene límites. También a mis hermanos, que me han apoyan en todo momento.

A mis amigos de la vida y los que me regalo la ingeniería, todos fueron muy importantes en esta etapa, pero no quiero dejar de agradecer especialmente a Nelson Agüera y Sebastián Panella con ellos emprendí este duro, pero maravilloso camino llamado *doctorado*, sin su apuntalamiento y ayuda no hubiera podido llegar hasta acá.

A mi Director, Miguel Tornello, que es como un padre en esta segunda casa que es para mí la Universidad, sin su acompañamiento, enseñanzas y valiosos aportes nada de esto hubiera sido posible. A mi Codirector, Carlos Frau, siempre dispuesto a brindarme su apoyo y consejos, sus aportes enriquecieron la investigación que llevamos adelante.

A la Empresa Pra Baldi Hnos., fundamentalmente a Marcos Pra Baldi por su tiempo y colaboración en la fabricación de los aisladores. A las autoridades, docentes y personal del IMERIS y del INPRES, por permitirnos realizar los ensayos y brindarnos su cooperación. También quiero destacar la colaboración de los alumnos y hoy ya colegas Jorge Tonelli y Santiago Dottori.

A las autoridades y compañeros del CeReDeTeC Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. A las autoridades del Departamento de Ingeniería Civil de la FRM-UTN, por su apoyo desinteresado y a las autoridades de Facultad Regional Mendoza – UTN.

Finalmente destaco el irremplazable soporte económico del Programa de Becas Doctorales para Docentes UTN - Subsecretaría de Posgrado Secretaría de Ciencia y Tecnología - Rectorado de Universidad Tecnológica Nacional, por ello se agradece a las autoridades de la Universidad por la confianza y apoyo institucional brindado para el desarrollo de la presente tesis.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática actual que aborda la tesis	1
1.2. Motivación	4
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivos de la tesis	7
1.5. Metodología	7
1.6. Estructura de la tesis	8
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DE LOS DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO	11
2.1. Introducción	11
2.2. Antecedentes relevantes del aislamiento sísmico	12
2.3. Base teórica del aislamiento sísmico	18
2.4. Clasificación de los sistemas de control en la respuesta sísmica	26
2.4.1. Sistemas activos	26
2.4.2. Sistemas semi-activos	27
2.4.3. Sistemas pasivos	28
2.4.3.1. Disipación de energía	29
2.4.3.2. Aislamiento sísmico	30
2.5. Dispositivos más frecuentemente utilizados en proyectos de aislamiento sísmico	31
2.5.1. Aisladores elastoméricos	32
2.5.1.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)	32
2.5.1.2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)	33
2.5.1.3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)	34
2.5.2. Aisladores deslizantes	35
2.5.2.1. Aisladores friccionales	36
2.5.2.2. Simple Péndulo de friccionales (FPS, Friction Pendulum System)	38
2.5.2.2. Aisladores de triple péndulo de Fricción (FP)	40
2.5.3. Sistemas basados en resortes metálicos helicoidales	42
2.6. Dispositivos utilizados en estructuras de mediana y baja carga axial	45
2.7. Reglamentos para el diseño de estructuras aisladas	48

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL NUEVO DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO	53
3.1. Introducción	53
3.2. Procedimientos para el diseño de aisladores	54
3.2.1 Aisladores elastoméricos	54
3.2.2 Aisladores de goma con núcleo de plomo	55
3.3. Parámetros a considerar en el diseño del aislador	55
3.4. Rigidez lateral requerida	57
3.5 Dimensionamiento del aislador	57
3.6. Estimación del desplazamiento diseño	58
3.7. Rigidez vertical del aislador	60
3.8. Verificación de las deformaciones límites	61
3.8. 1. Distorsión angular máxima asociada a la compresión	61
3.8. 2. Distorsión angular máxima asociada al corte	62
3.8. 3. Incremento de desplazamiento por torsión	62
3.9. Verificación del aislador al vuelco	63
3.10. Verificación del aislador al pandeo	65
3.11. Recomendaciones para la modelación	68
3.11.1. Modelo del sistema de aislación	68
3.11.2. Modelación de aisladores	69
CAPÍTULO IV: FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO	73
4.1. Características principales de los materiales componentes de un aislador elastomérico	73
4.2. Propiedades físicas de la goma	74
4.3. Propiedades generales de los compuestos de goma	76
4.3.1. Propiedad tensión – deformación	76
4.3.2. Relación temperatura – deformación	76
4.3.3. Energía de absorción y de disipación	76
4.3.4. Propiedades térmicas	77
4.3.5. Agentes externos	77
4.4. Tipos de elastómeros	77
4.4.1. Caucho natural	78
4.4.2. Natural sintético o poliisopreno	78
4.4.3. Cloropreno	78

4.4.4. Butilo	78
4.4.5. Butadieno	78
4.5. Características de los principales aditivos de un compuesto de goma	80
4.5.1. Tipo de reforzante	80
4.5.2. Plastificante o aceite	81
4.5.3. Agentes protectores	81
4.6. Técnicas de proceso	82
4.7. Vulcanización	82
4.8. Características de la goma de alto amortiguamiento	83
4.9. Efectos ambientales	83
4.9.1. Ozono	83
4.9.2. Corrosión	84
4.9.3. Temperatura	84
4.10. Factor de forma	86
4.11. Propiedades “scragged”(ciclos de ensayos)	84
4.12. “Creep” bajo compresión	88
4.13. Fatiga	89
4.14. Envejecimiento y deterioro	90
4.15. Especificaciones y formulación de un compuesto de goma para el dispositivo	91
4.16. Ensayos realizados en los compuestos de goma	91
4.16.1. Ensayo de dureza	91
4.16.2. Ensayo de resistencia a tensión máxima y elongación a la rotura	92
4.16.3. Ensayo de compresión residual	93
4.17. Descripción de la fabricación de los prototipos de aisladores sísmicos	95
CAPÍTULO V: ANÁLISIS EXPERIMENTAL	101
5.1. Ensayos de los prototipos de aisladores a cargas verticales	101
5.1.1. Descripción del ensayo	101
5.1.2. Resultados	103
5.2. Ensayos de los prototipos de aisladores a cargas verticales y horizontales cíclicas	107
5.2.1. Descripción del ensayo	107
5.2.2. Resultados	109
5.2.3. Determinación de la rigidez y el amortiguamiento efectivo de los dispositivos	118

CAPÍTULO VI: VALIDACIÓN Y CALIBRACION DEL MODELO NUMÉRICO	121
6.1. Introducción	121
6.2. Modelo Histerético de Wen	121
6.2.1. Constitutiva de YIK WEN para evaluar comportamientos elastoplásticos	124
6.2.2. Calibración de los parámetros del modelo de Wen	127
6.2.3. Resultados de la calibración	127
6.3. Análisis numérico del aislador con del modelo hiperelástico de Ogden	135
6.3.1. Parámetros de los materiales utilizados en el modelo	136
6.3.2. Modelo hiperelástico utilizado para el elastómero	137
6.3.3. Resultados obtenidos	139
CAPÍTULO VII: APLICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SISMICO A VIVIENDAS. CASOS DE ESTUDIO	145
7.1. Introducción	145
7.2. Descripción de las viviendas	145
7.2.1. Vivienda unifamiliar de una planta	145
7.2.2. Vivienda unifamiliar de dos plantas	147
7.3. Descripción del sistema de aislamiento sísmico de base	152
7.4. Modelación de los dispositivos de aislamiento y de la estructura de las viviendas	156
7.5. Respuesta estructural	158
7.5.1. Respuesta estructural para base fija	160
7.5.2. Respuesta estructural para base aislada	161
7.5.3. Comparativa de la respuesta estructural de las viviendas de base fija y aislada	169
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES	177
8.1. Conclusiones relacionadas con el diseño y la fabricación de los dispositivos	177
8.2. Conclusiones relacionadas con los ensayos experimentales	178
8.3. Conclusiones relacionadas con la validación de los modelos numéricos	180
8.4. Conclusiones relacionadas con las respuestas sísmicas de obras en regiones sísmicas	182
8.5. Comentarios finales	184
8.6. Recomendaciones para futuras investigaciones	185

ANEXO I: BASE TEÓRICA DEL AISLAMIENTO SÍSMICO	187
A1.1. Teoría no lineal del aislamiento sísmico	187
A1.1.1. Métodos monolíticos de integración paso a paso	187
A1.1.2. Métodos de iteración por bloques	188
A1.2. Teoría del aislamiento sísmico aplicada a edificios de varios grados de libertad	189
A1.3. Influencia del amortiguamiento en la respuesta de los sistemas con aislamiento	191
ANEXO II: RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	201
A2.1. Obtenidos a partir de ensayos experimentales	201
A2.2. Obtenidos a partir del modelo numérico de Bouc – Wen	208
ANEXO III: RUTINA DE TRABAJO PARA LA CALIBRACIÓN LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE NUMÉRICO DE WEN	217
A3.1. Rutina de trabajo en Matlab correspondiente al prototipo ASNC-1-15mm	217
REFERENCIAS	221

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Respuesta de una estructura convencional y una aislada	3
Figura 1.2. Estrategias de la técnica de los sistemas de protección sísmica	3
Figura 1.3. Ciclo de histéresis debido a una deformación plástica	4
Figura 2.1. Fotografía del Hospital Olivie View de Los Ángeles, después el terremoto de San Fernando en 1971	14
Figura 2.2. Imagen del sistema de aislación de la escuela Pestalozzi en Ex Yugoslavia	15
Figura 2.3. Residencia Universitaria FRM-UTN	17
Figura 2.4. Instituto de Histología y Embriología Molecular de la UNC	18
Figura 2.5. Esquema básico del aislamiento sísmico	18
Figura. 2.6. Variación de la transmisibilidad “T” de un vibrador de un grado de libertad para amortiguamiento viscoso	21
Figura 2.7. Modelo de 2 GDL para representar la estructura aislada	22
Figura 2.8. Esquema mecanismo de operación de sistemas activos	27
Figura 2.9. Esquema de estructura con sistema de control activo	27
Figura 2.10. Esquema de estructura con sistema de control semi-activo	28
Figura 2.11. Esquema mecanismo de operación de sistemas pasivos	28
Figura 2.12. Esquema de edificio con y sin disipadores sometido a un movimiento sísmico	29
Figura 2.13. Esquema de edificio con y sin AMS sometido a un movimiento sísmico	30
Figura 2.14. Esquema de edificio con y sin aislamiento sometido a un movimiento sísmico	31
Figura 2.15. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)	33
Figura 2.16. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)	34
Figura 2.17. Constitutiva no lineal del aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)	34
Figura 2.18. Esquema de un dispositivo aislador sísmico de base del tipo deslizante plano	36
Figura 2.19. Esquema genérico y fotografía aislador friccional de simple péndulo (FPS)	38
Figura 2.20. Ensayo de un aislador pendular friccional realizado en mesa vibradora	39
Figura 2.21. Constitutiva de un aislador friccional de simple péndulo	39
Figura 2.22. Deslizador y superficie cóncava de deslizamiento	40
Figura 2.23. Geometría y características generales de un aislador de triple péndulo de fricción	40
Figura 2.24. Relación “Fuerza lateral versus desplazamientos” de un aislador de triple péndulo de fricción	41
Figura 2.25. Relación “Fuerza-Desplazamiento” para un caso especial del aislador de triple péndulo de fricción	42
Figura 2.26. Paquete de resortes metálicos GERB y Amortiguadores viscoelásticos GERB	43

Figura 2.27. Esquema general de los polos de rotación del sistema de aislamiento GERB para los modos pendulares	44
Figura 2.28. Relación lineal entre la fuerza máxima de amortiguamiento y el valor máximo de la velocidad	45
Figura 2.29. Sistema de aisladores elastoméricos en tiras longitudinales para muros	46
Figura 2.30. Vivienda con sistema de aislamiento sísmico construida en Chile en el 2009	46
Figura 2.31. Sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) y aislador elastomérico	47
Figura 2.32. Prototipos de aisladores elastoméricos fabricados en Ecuador	47
Figura 3.1. Características del aislador estudiado (Dimensiones en mm)	53
Figura 3.2. Desplazamiento lateral y acciones sobre el aislador	63
Figura 3.3. Reducción del área transversal del aislador en compresión	67
Figura 4.1. Variación de las propiedades de la goma en función de la adición del negro de humo	81
Figura 4.2. Efecto de la temperatura en el módulo de la goma	85
Figura 4.3. Tensión de compresión versus deformación para un rango de factor de forma de 0,25 a 6	87
Figura 4.4. (a) Propiedades unscragged para pequeños desplazamientos; (b) Propiedades scragged para pequeños desplazamientos	87
Figura 4.5. (a) Propiedades unscragged para grandes desplazamientos; (b) Propiedades scragged para grandes desplazamientos	88
Figura 4.6. Creep de compresión en aisladores	89
Figura 4.7. Variación de la deformación de corte versus fatiga	89
Figura 4.8. Variación en el tiempo de la rigidez y el amortiguamiento para los aisladores	90
Figura 4.9. Durómetro tipo A y probeta del compuesto ensayado	92
Figura 4.10. Probeta tipo Dumbbell y la maquina dinamómetro	93
Figura 4.11. Dispositivo de compresión y horno utilizado en el ensayo	94
Figura 4.12. Esquema de los moldes utilizados en la fabricación de los prototipos	95
Figura 4.13. Fotografía de los moldes utilizados en la fabricación de los prototipos	96
Figura 4.14. Esquema de las pletinas de conexión inferior y superior	96
Figura 4.15. Fotografías de una de las pletinas de conexión inferior y superior y el anillo de centrado	97
Figura 4.16. Fotografías de los moldes, las pletinas de conexión y el anillo de centrado	97
Figura 4.17. Fotografías de los núcleos colocados en los prototipos ANAG y ANAF	98
Figura 4.18. Fotografías de la colocación de aditivos en moldes y adhesivo en las pletinas	98
Figura 4.19. Fotografías previas al proceso de vulcanizado de los prototipos	99
Figura 4.20. Fotografías durante el proceso de vulcanizado de los prototipos	99

Figura 4.21. Fotografías durante la colocación de la pletina de conexión superior y vulcanización final	100
Figura 4.22. Fotografías de los prototipos posteriores a su desmolde	100
Figura 5.1. Fotografías de la máquina utilizada en los ensayos a cargas verticales	101
Figura 5.2. Fotografías del ensayo a fuerza axial vertical al prototipo ASNC-1	102
Figura 5.3. Fotografías del ensayo a fuerza axial vertical al prototipo ANAG-1	102
Figura 5.4. Fotografías del ensayo a fuerza axial vertical al prototipo ANAF-1	103
Figura 5.5. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ASNC-1	103
Figura 5.6. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANAG-1	104
Figura 5.7. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANTC-1	104
Figura 5.8. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANAF-1	105
Figura 5.9. Relación fuerza – desplazamiento superpuesto para los cuatro prototipos	106
Figura 5.10. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANAF-1 para un desplazamiento de 100 mm	107
Figura 5.11. Esquema del ensayo de los prototipos junto al pórtico de cargas	108
Figura 5.12. Fotografías de los ensayos experimentales de distintos prototipos	109
Figura 5.13. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1-15mm.	110
Figura 5.14. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1-30mm	110
Figura 5.15. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm	111
Figura 5.16. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-2-15mm	111
Figura 5.17. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-2-30mm	112
Figura 5.18. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-2, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm	112
Figura 5.19. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG-1-15mm	113
Figura 5.20. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG1-3mm	113
Figura 5.21. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo	

ANAG-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 3mm	114
Figura 5.22. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG-2-15mm	114
Figura 5.23. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-1-15mm	115
Figura 5.24. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-1-30mm	115
Figura 5.25. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm	116
Figura 5.26. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-2-15mm	116
Figura 5.27. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAF-1-15mm	117
Figura 5.28. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-1-15mm	118
Figura 6.1. Curva histerética de Z versus x con $\beta = 0.5$ y $\gamma = 0.5$	122
Figura 6.2. Comportamiento de la variable z con $A = 1$, $\alpha = 0.6$, $\beta = \gamma = 0.5$, y distintos valores de n	123
Figura 6.3. Constitutiva fuerza-deformación elastoplástica	124
Figura 6.4. Constitutiva fuerza deformación elastoplástica adimensional	124
Figura 6.5. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-1-15mm	128
Figura 6.6. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-1-30mm	128
Figura 6.7. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-2-15mm	129
Figura 6.8. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-2-30mm	129
Figura 6.9. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAG-1-15mm	130
Figura 6.10. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAG-1-3mm	130
Figura 6.11. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAG-2-15mm	131
Figura 6.12. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANTC-1-15mm	131
Figura 6.13. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANTC-1-30mm	132

Figura 6.14. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANTC-2-15mm	132
Figura 6.15. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAF-1-15mm	133
Figura 6.16. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-1-15mm	133
Figura 6.17. Modelo de elementos finitos utilizado en la plataforma ABAQUS	136
Figura 6.18. Comparación de la respuesta a carga axial de compresión para el modelo numérico y el ensayo experimental	136
Figura 6.19. Ciclo histerético obtenidos a partir del modelo numérico de Ogden en Abaqus para el aislador ASNC-1-30mm	140
Figura 6.20. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo y del modelo numérico de Ogden en Abaqus para el aislador ASNC-1-30mm	140
Figura 6.21. Estado de tensión axial S11 para el eje x [MPa x e-01]	141
Figura 6.22. Estado de tensión axial S33 para el eje z [MPa x e-01]	141
Figura 6.23. Estado de tensión de corte S12 para los ejes x-y [MPa x e-01]	141
Figura 6.24. Comparación cualitativa de la respuesta obtenida en el ensayo experimental y el modelo numérico de Ogden.	142
Figura 6.25. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Ogden para el prototipo ASNC-1-30mm.	143
Figura 7.1. Planta de arquitectura de la vivienda de una planta	146
Figura 7.2. Planta de estructura de la vivienda de una planta	147
Figura 7.3. Planta baja de arquitectura de la vivienda de dos plantas	148
Figura 7.4. Planta alta de arquitectura de la vivienda de dos plantas	149
Figura 7.5. Planta de fundaciones de la vivienda de dos plantas	150
Figura 7.6. Planta de Estructura de planta baja de la vivienda de dos plantas	151
Figura 7.7. Planta de Estructura de planta alta de la vivienda de dos plantas	152
Figura.7.8. Planta fundación de la vivienda aislada de una planta	153
Figura.7.9. Planta fundación de la vivienda aislada de dos plantas	154
Figura 7.10. Corte de la vivienda aislada de una planta	155
Figura 7.11. Corte de la vivienda aislada de dos plantas	155
Figura 7.12. Relación fuerza – desplazamiento horizontal para el prototipo ASNC-1-30	156
Figura 7.13. Constitutiva no lineal del aislador elastomérico	157
Figura 7.14. Modelo realizad en el ETABS de la vivienda de una planta	157
Figura 7.15. Modelo realizad en el ETABS de la vivienda de dos plantas	158
Figura 7.16. Período de estructura de una planta con base fija vs período de estructura de una planta con base aislada, en contraste con los espectros de diseño	159
Figura 7.17. Período de estructura de dos plantas con base fija vs período de estructura	

de dos plantas con base aislada, en contraste con los espectros de diseño	159
Figura 7.18. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de una planta	163
Figura 7.19. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Caucete en la vivienda de una planta	163
Figura 7.20. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de una planta	164
Figura 7.21. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de una planta	164
Figura 7.22. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Caucete en la vivienda de una planta	165
Figura 7.23. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de una planta	165
Figura 7.24. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de dos plantas	166
Figura 7.25. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Caucete en la vivienda de dos plantas	166
Figura 7.26. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de dos plantas	167
Figura 7.27. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de dos plantas	167
Figura 7.28. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Caucete en la vivienda de dos plantas	168
Figura 7.29. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de dos plantas	168
Figura 7.30. Cortes basales en vivienda de una planta, base fija vs base aislada	169
Figura 7.31. Cortes basales en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	170
Figura 7.32. Desplazamientos en vivienda de una planta, base fija vs base aislada	170
Figura 7.33. Desplazamientos en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	171
Figura 7.34. Esquema desplazamientos relativos horizontales por rotación del sistema de aislamiento	172
Figura 7.35. Corte en muro M1X en vivienda de una planta, base fija vs base aislada	172
Figura 7.36. Corte en muro M3Y en vivienda de una planta, base fija vs base aislada	173
Figura 7.37. Corte en muro M3Y en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	173
Figura 7.38. Momento en C9 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	174
Figura 7.39. Corte en Columna C9 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	175
Figura 7.40. Momento en Viga B4 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	171

Figura 7.41. Corte en Viga B4 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada	176
Figura A1.1. Representación de un amortiguador viscoso	192
Figura A1.2. Influencia del factor de amortiguamiento en los valores de aceleraciones	196
Figura A1.3. Variación de la aceleración en la superestructura en función del amortiguamiento	197
Figura A1.4. Variación del desplazamiento a nivel del sistema de aislamiento sísmico en función del amortiguamiento	198
Figura A1.5. Historia de desplazamientos en la base del edificio con aislamiento y relac.: corte en la base versus desplazamientos en la base para un amortiguamiento del 15%	199
Figura A1.6: Historia de desplazamientos en la base del edificio con aislamiento y relac.: corte en la base versus desplazamientos en la base para un amortiguamiento del 30%	199
Figura A2.1. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-1-15mm	201
Figura A2.2. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-1-30mm	201
Figura A2.3. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-2-15mm	102
Figura A2.4. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-2-30mm	203
Figura A2.5. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAG-1-15mm	203
Figura A2.6. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAG-1-3mm	204
Figura A2.7. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAG-2-15mm	205
Figura A2.8. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANTC-1-15mm	205
Figura A2.9. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANTC-1-30mm	206
Figura A2.10. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANTC-2-15mm	207
Figura A2.11. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAF-2-15mm	207
Figura A2.12. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-1-15mm	208
Figura A2.13. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-1-30mm	209
Figura A2.14. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-2-15mm	209
Figura A2.15. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-2-30mm	210
Figura A2.16. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANAG-1-15mm	211
Figura A2.17. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANAG-1-3mm	211
Figura A2.18. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANAG-2-15mm	212
Figura A2.19. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANTC-1-15mm	213
Figura A2.20. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANTC-1-30mm	213
Figura A2.21. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANTC-2-15mm	214
Figura A2.22. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANAF-1-15mm	215

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores límites de la función de transmisibilidad para amortiguamiento viscoso	21
Tabla 3.1. Coeficientes de reducción	68
Tabla 4.1. Constantes físicas características de la goma natural	75
Tabla 4.2. Propiedades de los distintos polímeros	79
Tabla 4.3. Efecto de la temperatura en la rigidez y amortiguamiento	86
Tabla 4.4. Componentes del compuesto de goma utilizado	91
Tabla 4.5. Valores obtenidos de los ensayos de tracción y elongación	93
Tabla 5.1. Rigidez vertical de los aisladores a partir de los ensayos experimentales	106
Tabla 5.2. Parámetros característicos obtenidos de los ensayos experimentales.	117
Tabla 5.3. Rigidez y amortiguamiento efectivo de los dispositivos, obtenidos a partir de los ensayos experimentales	119
Tabla 6.1. Parámetros correspondientes al modelo numérico de Wen	127
Tabla 6.2. Comparación del amortiguamiento efectivo obtenido a partir de los ensayos (ξ_{eff}) y del obtenido del modelo numérico de Wen (ξ_{eff})	134
Tabla 6.3. Comparación de la rigidez efectiva obtenida a partir de los ensayos (K_{eff}) y de la obtenida del modelo numérico de Wen (K_{eff}).	135
Tabla 6.4. Parámetros correspondientes al modelo de Ogden	137
Tabla 6.5. Comparación del amortiguamiento efectivo obtenido a partir del ensayo y del obtenido del modelo numérico de Ogden en Abaqus	143
Tabla 7.1. Valores máximos para la vivienda de una planta con base fija	160
Tabla 7.2. Valores máximos para la vivienda de dos plantas con base fija	160
Tabla 7.3. Valores máximos para la vivienda de una planta con base aislada	161
Tabla 7.4. Valores máximos para la vivienda de dos plantas con base aislada	161
Tabla 7.5. Desplazamientos y cortes en ambas direcciones obtenidos del análisis de historia en el tiempo para la vivienda de una planta	162
Tabla 7.6. Desplazamientos y cortes en ambas direcciones obtenidos del análisis de historia en el tiempo para la vivienda de dos plantas	162
Tabla A1.1. Respuestas en términos de desplazamientos y cortes en la base del edificio con Aislamiento sísmico para los terremotos de Coalinga y Kobe.	200

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{a} :	Aceleración máxima de la masa (m)
\bar{a}_g :	Aceleración máxima absoluta del terreno
A :	Factor de escala general
A_t :	Sección transversal de un aislador elastomérico
a_i, b_i :	Dimensiones en planta del edificio aislado
A_l :	Sección transversal del núcleo de plomo en un aislador elastomérico
A_r :	Sección transversal neta de goma en un aislador elastomérico
B :	Tensor izquierdo de Cauchy-Green
B_D, B_M :	Factor definido por la NCh 2745 según el valor del amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento
b_f :	Parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad
C :	Tensor derecho de Cauchy-Green
c :	Coefficiente de amortiguamiento
c_b :	Coefficiente de amortiguamiento viscoso del sistema de aislamiento
c_s :	Coefficiente de amortiguamiento viscoso de la superestructura
C_s :	Matriz de amortiguamiento de la estructura
c_c :	Amortiguamiento crítico
c_{eq} :	Amortiguamiento viscoso equivalente
C_D, C_M :	Factor definido por la NCh 2745 según el tipo de suelo
d_e :	Diámetro de la espira de un resorte
d :	Deformación
d_p :	Diámetro del núcleo de plomo de un aislador elastomérico
D :	Diámetro de un aislador elastomérico
D_D :	Desplazamiento de diseño según NCh 2745
D_M :	Desplazamiento máximo según la NCh 2745
D_{TD}, D_{TM} :	Desplazamientos del conjunto aislado cuando se consideran efectos torsionales (NCh 2745)
D_{max} :	Desplazamiento máximo en la constitutiva de carga – deformación de un aislador elastomérico con núcleo de plomo

E_d :	Energía disipada por un amortiguador viscoso lineal
$E_{viscoso}$:	Energía disipada por amortiguamiento viscoso
$E_{Coulomb}$:	Energía disipada por amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco
E_{fluido} :	Energía disipada por amortiguamiento por fluido
E_c :	Módulo de compresión confinado de un aislador elastomérico
E :	Módulo de elasticidad longitudinal de la goma
E_b :	Módulo efectivo a flexión de un aislador elastomérico
e_s :	Distancia medida en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento
F^+ :	Fuerza máxima obtenida del ciclo histerético
F^- :	Fuerza mínima obtenida del ciclo histerético
f_y :	Fuerza de fluencia
F_{max} :	Fuerza máxima para deformación máxima en la constitutiva de carga – deformación de un aislador elastomérico con núcleo de plomo
$F_{ve-max,min}$:	Fuerzas en un amortiguador visco elástico
F_{vol} :	Tensor gradiente de deformación en su parte volumétrica
\bar{F} :	Tensor gradiente de deformación en su parte desviadora
F_N :	Vector de pseudofuerza
$f_{(x)}$:	Fuerzas no lineales
f :	Fuerza de restauración
g :	Aceleración de la gravedad
G :	Módulo de corte
G_r :	Módulo de corte de la goma
h_s :	Altura libre de un resorte
h_i :	Altura de un nivel “i” del edificio.
H_s :	Altura total de un aislador elastomérico (láminas de goma + planchas de acero)
H_r :	Altura total de las láminas de goma en un aislador elastomérico
I :	Momento de inercia
J :	Determinante del Tensor gradiente de deformación
K_a :	Rigidez de la superestructura
K_b :	Rigidez del sistema de aislamiento
K_s, K_o :	Matriz de rigidez de la estructura

K_d :	Rigidez posfluencia en la constitutiva de carga – deformación de un aislador elastomérico con núcleo de plomo
K_h :	Rigidez horizontal del aislador
K_v :	Rigidez vertical del aislador
K_{eff} :	Rigidez efectiva de un aislador elastomérico
K_{min} :	Rigidez lateral mínima de un aislador elastomérico
K_i :	Rigidez inicial
K_r :	Rigidez elástica de la goma
K_u :	Rigidez total de un aislador elastomérico con núcleo de plomo
K_{vc} :	Rigidez vertical del aislador elastomérico con núcleo de plomo
k :	módulo volumétrico
L :	Factores de participación modal
L_x, L_y :	Dimensiones en planta del edificio
m :	Masa del sistema
m_b :	Masa del sistema de aislamiento
m_s :	Masa de la superestructura
m_{tot} :	Sumatoria de las masas del edificio
M_t :	Masa total (sistema de aislamiento más superestructura)
M_o, M_s :	Matriz de masa del edificio
n_e :	Número de espiras activas de un resorte
n, e :	Regula la suavidad de la transición entre la región lineal y la no lineal.
N :	Carga actuante sobre el aislador
$N_{i-máx}$:	Carga normal dinámica máxima impuesta sobre cada aislador
N_{i-min} :	Carga normal dinámica mínima impuesta sobre cada aislador
N_n :	Fuerza normal en la interfase de la aislación
N_A :	Autovectores
\mathcal{P} :	Carga normal sobre un aislador elastomérico
p :	Presión hidrostática
P_E :	Carga euleriana
P_{cr} :	Carga critica
$P_{cr(eff)}$:	Carga critica efectiva
Q_i :	Peso de un nivel “ <i>i</i> ” del edificio

Q_d :	Fuerza máxima para deformación cero en la constitutiva de carga – deformación de un aislador elastomérico con núcleo de plomo
r :	Radio de fluencia
R_e :	Radio de la superficie esférica de un aislador friccional
$R_{eff\ i}$:	Radio efectivo para la superficie “i”
R_{ec} :	Deformación residual de la probeta
R_U :	Rigidez lateral unitaria
s :	Cociente entre el área cargada y el área libre para deformar en un aislador elastomérico
S :	Tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff
S_{vol} :	Tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff en su parte volumétrica
\bar{S} :	Tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff en su parte desviadora
t :	Intervalo de tiempo
t_o :	Duración del registro
t_r :	Espesor de una lámina de goma de un aislador elastomérico
t_s :	Espesor de una placa de acero de un aislador elastomérico
T_o :	Espesor inicial de la probeta.
T_f :	Espesor final de la probeta.
T_s :	Altura del espaciador
T :	Amplitud de la transmisibilidad
T_{sec} :	Periodo secante de un aislador friccional
T_o :	Periodo propio o fundamental del edificio.
T_i :	Periodo del sistema amortiguado
T_θ :	Rigidez flexional unitaria
U :	Amplitud del movimiento del suelo
\ddot{u}_g :	Aceleración del suelo
\bar{u}_g :	Desplazamiento máximo absoluto del suelo
\dot{u}_g :	Velocidad del suelo
u_b :	Desplazamiento absoluto del sistema de aislamiento
u_s :	Desplazamiento absoluto de la superestructura
\ddot{u}_b :	Aceleración del sistema de aislamiento
\ddot{u}_s :	Aceleración de la superestructura
\dot{u}_b :	Velocidad del sistema de aislamiento

\dot{u}_s :	Velocidad de la superestructura
ω :	Frecuencia de la excitación exterior
ω_o :	Frecuencia propia del sistema
ω_b :	Frecuencia natural del sistema de aislamiento
ω_s :	Frecuencia natural de la superestructura
ω_1 :	Frecuencia natural del modo 1
ω_2 :	Frecuencia natural del modo 2
W :	Fuerza normal sobre el patín de un aislador friccional
W_d :	Energía disipada por ciclo
W_o :	Área ciclo histerético
W_e, W_d :	Energía elástica
$W(J)$:	Energía libre asociada al cambio de volumen del sólido
W^* :	Energía libre asociada a las deformaciones isocóricas
\bar{x} :	Desplazamiento máximo de la masa (m)
x_o :	Amplitud del desplazamiento
\dot{x} :	Velocidad del sistema
\dot{x}_b :	Velocidad de deslizamiento.
x :	Desplazamiento del sistema
ν :	Módulo de Poisson
Z, M_M :	Factor definido por la NCh 2745 según el riesgo sísmico
Z :	Parámetro histerético para el modelo de Wen
α :	Razón de proporción entre la fuerza lineal y la fuerza no lineal
β :	Parámetro para determinar la forma de la curva histerética del modelo de Wen
β_1 :	Amortiguamiento crítico correspondiente al modo 1
β_2 :	Amortiguamiento crítico correspondiente al modo 1
β_s :	Factor de amortiguamiento de la estructura
β_b :	Factor de amortiguamiento del sistema de aislamiento
β_{ef} :	Razón de amortiguamiento lineal viscoso equivalente
ε :	Relación entre los cuadrados de las frecuencias naturales (ω_b, ω_s)
δ :	Desplazamiento del patín del aislador friccional
δ_o :	Deformación máxima en un aislador friccional
Δ^+ :	Desplazamiento máximo obtenido del ciclo histerético
Δ^- :	Desplazamiento mínimo obtenido del ciclo histerético

Δ_{to} :	Capacidad de desplazamiento lateral de un aislador elastomérico
ε_u :	Distorsión angular máxima de un aislador elastomérico en estado último
$\varepsilon_{c(est)}$:	Deformación normal en un aislador elastomérico en estado de servicio
$\varepsilon_{c(din)}$:	Deformación normal en un aislador elastomérico en estado último
ϕ :	Ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción en un aislador friccional
φ :	Forma modal
γ_m :	Relación entre la masa de la superestructura (m_s) y la masa total (M)
γ :	Parámetro para determinar la forma de la curva histerética del modelo de Wen
$(\gamma_s)_o$:	Distorsión angular máxima de un aislador elastomérico asociada, al corte
$(\gamma_b)_o$:	Distorsión angular máxima de un aislador elastomérico asociada, a la flexión
$(\gamma_c)_o$:	Distorsión angular máxima de un aislador elastomérico, asociada a la compresión
μ :	Coefficiente cinético de fricción
μ_{max} :	Coefficiente de fricción a velocidades altas
μ_{min} :	Coefficiente de fricción a velocidades cercanas a cero
μ_i, α_i :	Parámetros del material para el modelo numérico de Ogden
Ω :	Relación entre la frecuencia de la excitación exterior y la frecuencia propia del sistema
λ_A :	Estiramientos principales
$\sigma_{c(est)}$:	Tensión normal en un aislador elastomérico en estado de servicio
$\sigma_{c(din)}$:	Tensión normal en un aislador elastomérico en estado último
$\bar{\sigma}$:	Tensor de tensiones de Cauchy en su parte desviadora
σ_s :	Tensiones normales en las placas de acero de un aislador elastomérico
τ_e :	Esfuerzos de corte en estado de servicio
τ_{e+s} :	Esfuerzo de corte en estado último
ξ, β :	Factor de amortiguamiento crítico
ξ_{eq}, ξ_{eff} :	Amortiguamiento equivalente de un aislador elastomérico

CAPÍTULO I: INTRODUCCION

1.1. Problemática actual que aborda la tesis

Los terremotos son fenómenos naturales que ocasionan cuantiosos daños materiales y un número importante de pérdidas de vidas humanas. En muchas regiones del planeta se producen terremotos severos capaces de colapsar estructuras e interrumpir la actividad económica, las líneas de comunicación y los servicios públicos. La principal causa de estas grandes pérdidas es la variabilidad de las respuestas de las construcciones frente a terremotos severos y a sus características sumadas a la incertidumbre sobre el comportamiento de los materiales frente a acciones dinámicas, tipo de suelos, fundaciones, características de las fuentes generadoras de terremotos, etc., lo cual se traduce, muchas veces, en diseños no convenientes para afrontar la acción de terremotos destructivos.

Al considerar el riesgo latente que representan los desastres naturales, son los terremotos los que mayor temor infunden a la población, a la vez los que conllevan un mayor potencial destructivo, por cuanto el número de personas y estructuras expuestas es considerablemente mayor en comparación a aquellas que pueden sufrir los efectos de huracanes, tornados, inundaciones y otros desastres naturales. Los terremotos son responsables directos del 60% de las muertes debido a catástrofes naturales a nivel mundial (Shedlock, 2001).

La estadística precedente encuentra un fuerte sustento si consideramos que gran parte de los asentamientos urbanos se encuentran en zonas de moderado o alto peligro sísmico, lo que junto al explosivo aumento demográfico de las últimas décadas, la ocurrencia de un terremoto destructivo, ha provocado un crecimiento sostenido de las pérdidas económicas y humanas. Adicionalmente, si se considera que la construcción de edificios y estructuras, muchas veces posee diseños estructurales no convenientes para regiones sísmicas, en la cual los elementos estructurales son relegados a un segundo plano en beneficio de las prestaciones arquitectónicas y funcionales, se pone en evidencia la necesidad de concretar estructuras, que sin perder su funcionalidad y estética, permitan minimizar las pérdidas ocasionadas por los terremotos.

Convencionalmente, el diseño de estructuras se basa en un enfoque de control del mecanismo de falla de la propia estructura, otorgándole una adecuada capacidad que permita hacer frente a los esfuerzos derivados de las aceleraciones sísmicas. Para ello, se consideran elementos dúctiles que sean capaces de resistir ciclos de carga-descarga de tal manera que la liberación de energía se realice a través de un comportamiento histerético, amortiguando la acción

sísmica y permitiendo que el resto de elementos en la estructura permanezca en el rango elástico lineal, o mínimamente incursiones en el rango plástico. En principio, esta filosofía de diseño permitiría una aceptable respuesta de los elementos resistentes para cualquier estructura, sin embargo su aplicación puede verse limitada al enfrentarse a fuerzas sísmicas elevadas, principalmente debido a dos factores:

- i. El comportamiento dúctil de los elementos está asociado a una degradación del propio elemento estructural, registrándose importantes deformaciones inelásticas que puede llegar a inutilizar la estructura en caso de grandes terremotos. Esta situación cobra especial relevancia en aquellas estructuras esenciales es decir aquellas de primera necesidad para la población o bien las que deben ocuparse de las acciones pos terremotos (hospitales, policía, establecimientos educacionales, bomberos, gobierno, etc.).
- ii. En edificios rígidos, donde el efecto amplificado del período fundamental es reducido, a medida que aumenta la magnitud de las fuerzas sísmicas, también lo hace la sección de los elementos, rigidizando aún más la estructura, por lo tanto el edificio experimenta aceleraciones más cercanas a las registradas por el terreno. Esta filosofía, en términos prácticos, representa un enfoque extremadamente costoso, a lo que debe agregarse que las aceleraciones percibidas pueden ser lo suficientemente elevadas para dañar los equipos y contenidos de las estructuras.

A nivel mundial la ingeniería sísmica, en los últimos años, ha tenido que reconocer la limitación de sus métodos de diseño, fundamentalmente porque un número reducido de edificios, diseñados por ingenieros y en los cuales se han utilizado reglamentos de diseño sísmico de última generación, han colapsado. Dicho colapso en muchos casos se ha puesto en evidencia cuando las construcciones civiles se encuentran emplazadas próximas al epicentro (Saragoni, 2004).

Hasta no hace muchos años, el colapso de las estructuras se consideraba un fenómeno casi exclusivo de los países subdesarrollados principalmente debido a las construcciones con adobe y mampostería. Sin embargo los terremoto de San Fernando (1971) y Northridge (1994) en Estados Unidos, o Kobe (1995) en Japón, por citar algunos ejemplos, pusieron en evidencia para los países desarrollados que los efectos de los terremotos sobre las construcciones y las personas no se trata solamente de un problema económico, sino del estado del conocimiento que posee la ingeniería para dar una adecuada respuesta a una necesidad que desde tiempos remotos plantea la sociedad.

Una de las estrategias no tradicionales para controlar el daño en las construcciones es el aislamiento sísmico. El objetivo fundamental de la estrategia consiste en desacoplar la estructura del suelo de fundación con el objeto de que el movimiento del terreno durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial (Figura 1.1). Por cierto, un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable actualmente, sin embargo, cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el movimiento del suelo, filtrando el movimiento que se trasmite hacia la superestructura (Tornello, 2007).

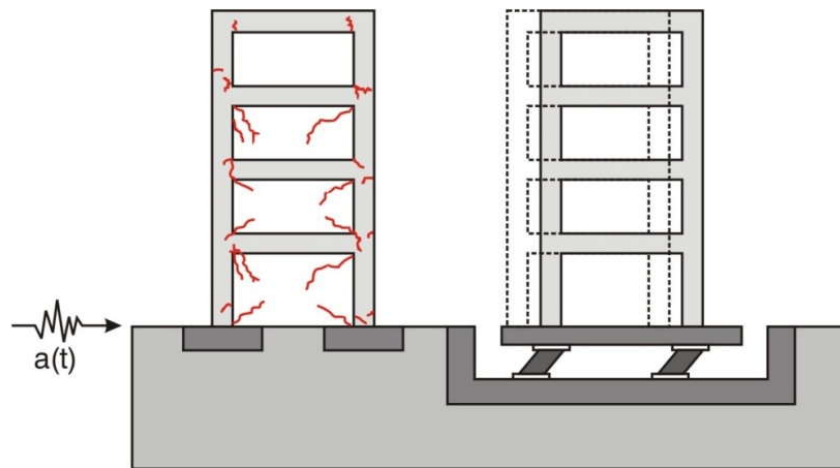


Figura 1.1. Respuesta de una estructura convencional y una aislada.

Los sistemas de protección sísmica trabajan bajo dos estrategias. La primera es mediante una disipación controlada de la energía que entrega el terremoto y la segunda se concreta a través de modificar las características dinámicas de la obra que se quiere proteger. En algunos casos también se utiliza una combinación de ambas estrategias. La disipación de energía se logra mediante un aumento del amortiguamiento mientras que la segunda, se logra aumentando el periodo y también el amortiguamiento. En la Figura 1.2, puede observarse de manera gráfica las estrategias de la técnica de protección de las estructuras para una idealización de un espectro de aceleraciones y de desplazamientos.

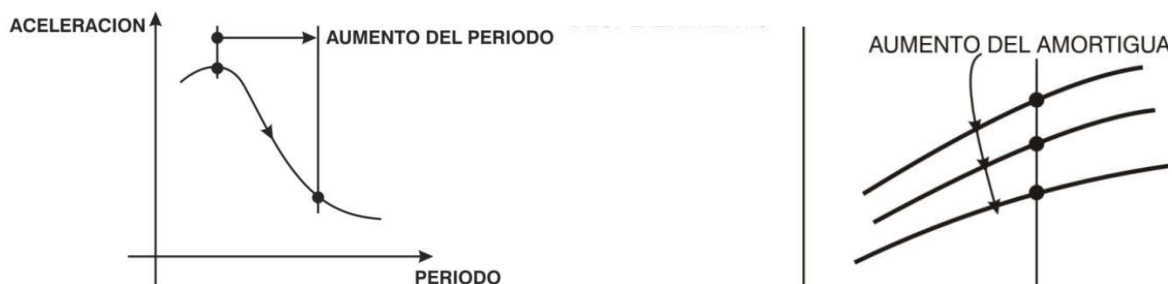


Figura 1.2. Estrategias de la técnica de los sistemas de protección sísmica

Una de las formas de adicionar amortiguamiento es a través de la disipación de energía denominada histéresis. Esta disipación de energía está representada por el área encerrada entre las curvas de carga y descarga, para el caso de cargas cíclicas. El trabajo realizado durante la etapa de carga no es totalmente recuperado durante la descarga y la diferencia se pierde, o disipa como calor. La Figura 1.3 muestra un ciclo idealizado de fuerza versus desplazamiento, donde el área encerrada es una medida de la energía disipada durante un ciclo de movimiento.

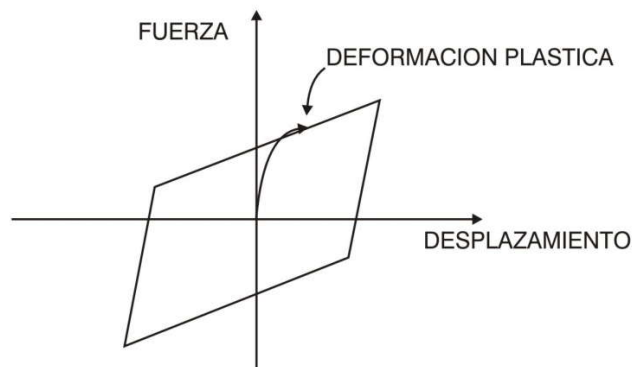


Figura 1.3. Ciclo de histéresis debido a una deformación plástica.

La implementación de dispositivos de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos, por lo tanto dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y la salvaguarda de sus contenidos.

1.2. Motivación

La vulnerabilidad sísmica es inherente al desarrollo de la actividad humana, la misma puede y debería ser minimizada. De esta forma, el diseño de estructuras sismo resistentes debe procurar cumplir con tres premisas básicas:

- Evitar las pérdidas de vidas humanas.
- Disminuir las pérdidas económicas públicas y privadas.
- Reducir el retraso socio-económico que ocasiona la ocurrencia de un terremoto destructivo.

La observación del comportamiento de las estructuras durante sismos severos, ha demostrado que la filosofía de control de daños es adecuada para satisfacer la primera de las premisas señaladas, pero dado que la incursión de las estructuras en el rango plástico está directamente asociada a daños no recuperables, la rehabilitación de los edificios e infraestructuras, y su elevado costo, atenta contra las premisas de disminuir las pérdidas económicas asociadas. En

el período comprendido entre los años 2000 y 2011, las pérdidas económicas directas asociadas a los terremotos ascendieron a US\$536.319 millones, lo que representa un 40% del total de pérdidas económicas relacionadas con catástrofes naturales. (EM-DAT, 2011).

El concepto de aislamiento sísmico es ampliamente aceptado en regiones sísmicas para proteger edificios importantes o que deban cumplir funciones esenciales después de ocurrido el terremoto, de hecho hay muchos ejemplos en Estados Unidos, Japón, Italia y Nueva Zelanda, sin embargo también existen proyectos de menor costo para viviendas económicas de los cuales hay casos realmente construidos en Chile, China y Armenia.

Otros de los beneficios de los sistemas de aislamiento es la protección de los contenidos de importancia en los edificios (por ejemplo en el caso de hospitales, centro de datos informáticos, laboratorios, etc., el equipamiento tiene un costo muchas veces mayor que el edificio mismo). Suministrar una mayor rigidez puede significar menores desplazamientos (en estructuras de base fija) y por lo tanto menor distorsión de piso y menor daño en elementos no estructurales. Los daños en contenidos están relacionados a las aceleraciones de piso las cuales pueden reducirse aumentando la flexibilidad del sistema de aislamiento provocando un efecto opuesto a la distorsión de piso. La elección de las características del sistema de aislamiento implica encontrar un balance que satisfaga los dos parámetros de respuesta.

Los sistemas de aislamiento sísmico permiten controlar simultáneamente los dos parámetros porque el mismo posee la flexibilidad necesaria como para concentrar toda la deformación en el nivel donde se emplazan los dispositivos de aislamiento.

Los sistemas de aislamiento sísmico no sólo se han utilizado en obras nuevas sino también en proyectos de edificios existentes. El problema que enfrentan las regiones de países desarrollados y no desarrollados emplazados en zonas de peligro sísmico, no es solamente la amenaza permanente de un terremoto destructivo sino, además, que muchos de sus construcciones (civiles, comerciales, industriales y de infraestructura) fueron construidas con códigos de edificación hoy obsoletos y en muchos otros casos con pocas prescripciones sísmicas. En alguna ocasión el edificio podrá ser demolido y reconstruido, en otros no, ya sea por razones económicas, sociales o históricas. Por lo tanto, hoy, los sistemas de aislamiento sísmico resultan ser técnicas no tradicionales para recuperar dichas construcciones con un grado de seguridad aceptable.

Los antecedentes indican que las técnicas de aislamiento han sido orientadas fundamentalmente a grandes emprendimientos o bien a obras de infraestructura, aspecto que se considera altamente positivo, sin embargo, se piensa que se está descuidando un gran

número de obras, ampliamente difundidas y de construcción masiva (viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales, hoteles y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales de bajo peso, equipos de estaciones transformadoras, etc.) que al igual que las grandes obras, sufren el impacto de un terremoto destructivo (pérdidas económicas y de vidas humanas, retraso socio económico de la región).

En consecuencia y basado en esta última realidad, la presente tesis busca dar una respuesta, mediante una técnica de aplicación, a esas estructuras que igualmente se ven impactada por la ocurrencia de terremotos destructivos.

Si bien los dispositivos que hoy existen comercialmente pueden también utilizarse para el tipo de construcción que trata la tesis, los mismos tienen los siguientes inconvenientes para nuestra región: i) los dispositivos tienen sus propias patentes, ii) no se fabrican en el país y por lo tanto hay que importarlos con el consecuente incremento de los costos, iii) para amortizar su costo es necesario fabricar un número importante de dispositivos; iv) no permite el desarrollo de tecnología local.

Atento a las causas enunciadas en el párrafo precedente, se plantea el desarrollo de un dispositivo de aislamiento sísmico con bajo nivel de carga axial, para ser empleado en construcciones altamente utilizadas y difundidas, no solamente en nuestra provincia, sino en toda la región sísmica del oeste del país y Sudamérica. Para ello se diseñan y fabrican dispositivos de aislamiento en forma conjunta con empresas del medio local y/o nacional. Con ésta última acción se pretende generar tecnología en la Universidad y transferirla a empresas locales.

Mediante ensayos se determinan las características mecánicas y las leyes constitutivas del dispositivo de aislamiento y finalmente se construye un modelo numérico que se valida con los resultados experimentales. También se analiza la respuesta de construcciones típicas emplazadas en regiones sísmicas del oeste del país con y sin los dispositivos de aislamiento, frente a los terremotos que puedan ocurrir en la región y también para otros escenarios. Los dispositivos que se utilizan para este último objetivo son los diseñados y fabricados en el ámbito de la presente tesis.

1.3. Hipótesis

Si se adecuan los parámetros que rigen el comportamiento de todo dispositivo de aislamiento sísmico es posible el diseño de un nuevo dispositivo con fines a los objetivos de la tesis.

El empleo de tecnología local permite concretar la fabricación de dispositivos de aislamiento sísmico para ser utilizados en construcciones que posean baja carga axial.

Un diseño adecuado de los nuevos dispositivos de aislamiento sísmico facilita el empleo de los mismos en construcciones donde la incidencia de dispositivos importados es elevada y permite la reducción de las respuestas sísmicas de las construcciones, mejorando la seguridad sísmica de las mismas, de las personas que la habitan y de sus contenidos.

1.4. Objetivos de la tesis

Los principales objetivos de la tesis se orientan al estudio analítico y experimental de un nuevo dispositivo de aislamiento. La tesis se complementa con el análisis de construcciones típicas de la región sometidas a acciones sísmicas con y sin los dispositivos de protección sísmica. Los objetivos específicos se resumen en los siguientes puntos:

- 1) Diseñar un nuevo dispositivo de aislamiento sísmico para bajo nivel de carga axial.
- 2) Fabricar los dispositivos de aislamiento en forma conjunta con empresas del medio local y/o nacional.
- 3) Determinar los parámetros mecánicos y las leyes constitutivas del nuevo dispositivo.
- 4) Proponer un modelo numérico del dispositivo de aislamiento sísmico.
- 5) Analizar la respuesta de estructuras típicas con y sin dispositivos frente a los terremotos que puedan ocurrir en la región y para otros escenarios posibles.

1.5. Metodología

En una primera etapa se realiza una recopilación y análisis de los trabajos relacionados con la temática de aislamiento sísmico de base para construcciones de baja carga axial. Se estudian los diferentes tipos de sistemas de aislamiento, analizando sus ventajas y desventajas.

En una segunda etapa se estudia el diseño cualitativo y cuantitativo del nuevo dispositivo de protección sísmica. Se fabrica el mismo con materiales y tecnología del medio local.

En una etapa siguiente se realizan los ensayos experimentales para obtener los parámetros mecánicos y las leyes constitutivas del nuevo dispositivo. Paralelamente se realiza la modelación numérica del aislador diseñado con el objeto de validar los modelos numéricos con los resultados experimentales.

Finalmente se evalúa analíticamente la respuesta de las construcciones de bajo y mediano peso con el dispositivo de aislamiento objeto de la tesis, mediante programas computacionales de fines específicos y de uso comercial. Se compara la respuesta de las mismas estructuras para fundación tradicional y para base aislada con el dispositivo diseñado en la presente tesis.

1.5. Estructura de la tesis

La tesis se divide en ocho capítulos. En el Capítulo II se presenta una recopilación de antecedentes, en la que se muestra la variación a lo largo de la historia y el uso en los distintos países del mundo de la estrategia de aislación sísmica. Se describe la base teórica de la misma y los dispositivos más frecuentemente utilizados en proyectos de aislamiento sísmicos, como además los utilizados en estructuras de mediana y baja carga axial. Por último se realiza una breve descripción de los distintos reglamentos para el diseño de estructuras aisladas.

El Capítulo III tiene como objeto desarrollar el diseño del aislador elastomérico. Se realiza un pre diseño, donde se definen las características geométricas del aislador y los materiales a utilizar. Para ello se sigue los lineamientos indicados para el método estático del código de Chile (NCh2745, 2003).

En el Capítulo IV se presenta una descripción de las características principales de los materiales componentes de un aislador elastomérico. Se detalla el compuesto de goma elegido para los prototipos que se fabrican al objeto de la tesis. Se describen los ensayos realizados a los compuestos de goma, y finalmente se desarrolla el proceso de fabricación de los prototipos de aisladores sísmicos.

Tal cual se mencionó en los puntos anteriores, uno de los objetivos de la tesis es determinar los parámetros mecánicos y las leyes constitutivas del dispositivo de aislamiento fabricado. Para ello se realizaron ensayos a carga axial vertical en el laboratorio de estructuras del INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) en la Provincia de San Juan, y ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas en el IMERIS (Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo. La descripción y los resultados de los ensayos mencionados se desarrollan en el Capítulo V.

En el Capítulo VI se realiza la validación numérica del dispositivo de aislamiento sísmico diseñado y fabricado, para ello se estudia la respuesta mecánica, considerando el

comportamiento no lineal de los materiales componentes y la interacción entre ellos a partir de una combinación de cargas ficticias.

Para su análisis se emplean dos metodologías. La primera de ellas es el modelo histerético de Wen con el cual se representa la ley constitutiva de los aisladores y se los compara con la obtenida de los ensayos experimentales. Para ello se emplea la plataforma comercial MatLab (MatLab, 2000). En la segunda metodología se estudia el análisis numérico del aislador a través del modelo hiperelástico de Ogden para el cual se utiliza el código comercial Abaqus como programa de elementos finitos (Abaqus, 2003). A partir de los resultados obtenidos en este capítulo, se puede concluir que los modelos numéricos seleccionados y calibrados, son adecuados para representar y validar todos los ensayos realizados.

El Capítulo VII tiene como objeto implementar el sistema de aislamiento de base en dos tipos de viviendas. Las viviendas seleccionadas para el estudio son de una y dos plantas y las mismas corresponden a una tipología de proyectos del Instituto Provincial de la Vivienda de Mendoza (IPV).

Se realiza un análisis de la respuesta estructural de las viviendas para los casos de base fija y para el caso de base aislada. La herramienta utilizada para la modelación de los dispositivos de aislamiento y la estructura de las propias viviendas es el programa computacional ETABS. Los resultados indican que, en general, el sistema de aislamiento, conformado con los aisladores objeto de la presente tesis, reducen de manera apreciable las solicitaciones producidas en los elementos estructurales de la superestructura respecto a las construcciones con fundaciones tradicionales.

Los resultados y las conclusiones finales se discuten en el Capítulo VIII. Las mismas han sido ordenadas en función de los objetivos de la tesis: el diseño de los dispositivos de aislamiento, la fabricación de los aisladores sísmicos, los ensayos experimentales, validación del modelo numérico y estudio de las respuestas sísmicas de obras emplazadas en regiones sísmicas del oeste argentino. Por último la tesis incluye tres anexos.

El Anexo I profundiza la base teórica del aislamiento sísmico descrita en el Capítulo II. En el Anexo II se evalúa la rigidez y el amortiguamiento efectivo obtenidos de los dispositivos a partir de los ensayos experimentales, para todos los prototipos ensayados. El anexo III muestra la rutina de trabajo del código comercial MatLab, que se emplea en la calibración de los parámetros del modelo numérico de Wen.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DE LOS DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

2.1. Introducción

Durante muchos años el diseño sísmico de las estructuras se ha basado en fortalecer o dotar a los elementos estructurales de la suficiente rigidez a fin de soportar los esfuerzos derivados de las acciones sísmicas. Sin embargo el concepto de rigidización está inevitablemente asociado a un aumento de la masa del edificio, y por tanto contribuye a aumentar las demandas sísmicas sobre la estructura.

Si bien una estructura diseñada de acuerdo a esta filosofía es capaz de resistir un fuerte evento sísmico, sus elementos no estructurales y equipamiento, pueden resultar seriamente afectados producto de las grandes aceleraciones a las que son sometidos. Por otra parte, la componente económica asociada al aumento de rigidez de los elementos, traducida directamente en una mayor sección de ellos, limita fuertemente la construcción de edificios que garanticen la seguridad estructural dentro de los rangos tradicionales de construcción (Fan et al, 1991).

Los códigos a nivel mundial aceptan que la estructura, por razones económicas, no responda exclusivamente en rango elástico y en general aceptan un comportamiento plástico con el consecuente daño asociado a dicho comportamiento. Este comportamiento plástico tiene el efecto de aumentar el período fundamental del edificio. En edificios convencionales, este comportamiento inelástico se concentra en las uniones vigas-columnas, las que deben estar diseñadas bajo conceptos de capacidad con el objeto de asegurar la disipación de energía en dichas zonas. Esta disipación implica para la estructura un cierto nivel de daño en los elementos estructurales principales de la construcción.

El objetivo entonces es reducir las aceleraciones en los edificios a niveles inferiores a los registrados por el terreno, para lo cual la estructura debe necesariamente ser flexible. Por su parte, una alta flexibilidad estructural producirá problemas con los elementos no estructurales del edificio. En edificios de baja y mediana altura, la flexibilidad necesaria sólo puede ser lograda a nivel de fundaciones mediante el empleo de dispositivos de aislamiento sísmico.

En las últimas décadas se han logrado importantes avances en materia de desarrollo de estrategias de diseños alternativos. Las nuevas estrategias apuntan al empleo de mecanismos de control, tanto activos como pasivos, para controlar las vibraciones de las estructuras durante los episodios sísmicos. Esta clasificación es tratada en el punto 2.4 del presente capítulo. La filosofía del uso de aisladores basales, si bien es simple, no es por ello menos

efectiva. La estrategia busca desacoplar la estructura de las componentes horizontales del movimiento del terreno mediante la colocación de dispositivos, entre la estructura y la cimentación, de baja rigidez horizontal.

Este cambio de rigidez, a nivel de base, produce un cambio en la frecuencia fundamental del edificio, la que experimenta una disminución que la aleja de la frecuencia de la estructura no aislada y de las frecuencias sísmicas predominantes. El primer modo dinámico de la estructura aislada sólo presenta deformaciones en los dispositivos de aislamiento, admitiendo que la estructura superior se comporta como un cuerpo rígido. La participación de los modos superiores no es significativa en el valor final desplazamiento de la superestructura con aislamiento sísmico, de forma tal que la energía contenida en las altas frecuencias del movimiento del terreno, no son transmitidas a la misma. Por otro lado en estructuras con aislamiento sísmico los dos primeros modos definen los parámetros de la respuesta (Kelly, 1998).

2.2. Antecedentes relevantes del aislamiento sísmico

Las primeras investigaciones sobre un edificio realmente construido sobre un sistema de aislamiento sísmico se atribuyen a John Milne quien fuera profesor de la carrera de ingeniería en minería en Tokio entre 1876 y 1895. La estructura fue construida sobre “bolas” contenidas en cajas de aceros. Por encima de las mismas existía una placa de acero tomada al edificio cuya superficie de contacto con las bolas era de forma cóncava, otra placa de idénticas características se ubicaba por debajo de las placas de aceros. El edificio fue instrumentado y ensayado a movimientos sísmicos, las experiencias obtenidas fueron publicadas en 1885 en el informe de la Asociación Británica para el avance de la ciencia. El primer informe contemplaba un diámetro de bolas de 10 pulgadas, al año siguiente, en 1886, el trabajo fue actualizado y se publicaron los resultados para diámetros de bolas de 8, 1 y $\frac{1}{4}$ de pulgadas (Naeim et al, 1999).

En 1908 tras el terremoto de la región italiana de Messina-Regio se creó una comisión de ingenieros y académicos con la misión de recomendar métodos de diseño estructural a fin de reconstruir la zona afectada de forma segura. A partir de dicha comisión se generaron dos propuestas; la primera sugería la separación de las estructuras de su fundación mediante el uso de una capa de arena o de deslizadores. La segunda propuesta se orientaba al empleo de fundaciones mixtas.

Simultáneamente en 1909, el doctor en medicina Johannes Avetican Calantarients solicitó una patente en Inglaterra en la que se describía un diseño sísmico resistente de edificaciones, para el cual se consideraba el empleo de una fina capa de arena o talco entre la estructura y su cimentación. La patente presentada por Calantarients fue más allá de una simple proposición de aislamiento del edificio, ya que incluía elementos que limitaban los desplazamientos producto de las acciones del viento y un diseño para llevar a cabo las canalizaciones respectivas, previendo así grandes desplazamientos relativos entre el terreno y la estructura.

No obstante estos tempranos diseños, la primera aplicación práctica de aislamiento sísmico en edificios se le atribuye a Frank Lloyd Wright, que en 1921 diseñó el Imperial Hotel en Tokyo bajo una fuerte controversia. El lugar de emplazamiento del hotel presentaba una capa de 2,5 metros de un suelo en buenas condiciones, bajo el cual existía una capa de arcilla blanda. Según Wright, esta última capa constituía *“un buen cojín para liberar fuertes impactos. ¿Por qué no permitir que el edificio flote sobre él?”* (sic) (Kelly, 1986).

Para llevar a cabo la idea de “flotación”, utilizó pilas cortas muy juntas entre sí, que descansaban sobre la capa de arcilla blanda. El terremoto de Tokyo en 1923 le dio la razón a Wright dado que el edificio sólo sufrió daños menores.

En la medida que avanzaron las investigaciones fueron concretándose nuevas propuestas. A fines de los años veinte e inicios de los treinta, surgió el concepto de otorgarle al primer nivel una alta flexibilidad de tal manera que la rigidez lateral de las columnas en la planta baja fuese considerablemente menor que la rigidez de las columnas de los pisos superiores, concentrando, de esa manera, las deformaciones en las columnas del primer nivel y reduciendo las aceleraciones en los pisos superiores. Para lograr dicho objetivo era necesario que los desplazamientos registrados en el primer nivel fuesen elevados, sumado al efecto de las cargas verticales de los pisos superiores, se producían daños severos en las columnas del primer nivel, situación que provocaba el colapso parcial o total.

Si bien el mecanismo de piso blando protege los niveles superiores, el precio a pagar es la potencial destrucción de las columnas del primer nivel. Por lo general, las columnas diseñadas de manera convencional no son capaces de resistir el peso del edificio y los grandes desplazamientos producidos por un sismo de manera simultánea. Un ejemplo de ello se puede observar en la Figura 2.1, donde se muestra el colapso del Hospital Olivie View de Los Ángeles, durante el terremoto de San Fernando en 1971 (Bertero, 1976).



Figura 2.1. Fotografía del Hospital Olivie View de Los Ángeles, después el terremoto de San Fernando en 1971.

Inicialmente se idearon aisladores deslizantes con el objeto de encontrar mecanismos que permitieran grandes desplazamientos sin comprometer la integridad estructural del edificio. Dado que los movimientos del terreno pueden darse en cualquier dirección, era necesario el uso de aisladores esféricos o en su defecto, dos capas ortogonales de aisladores. La particularidad que presentan los aisladores esféricos o deslizantes, es su amortiguamiento extremadamente bajo y su escasa resistencia a las acciones del viento por lo tanto, el uso de dispositivos que permitan incrementar los desplazamientos de los pisos inferiores debe proveer resistencia al viento y capacidad de adicionar amortiguamiento al conjunto aislado.

Si bien los aisladores tipo deslizantes ofrecen un adecuado control de las aceleraciones su gran desventaja radica en la posibilidad de experimentar desplazamientos permanentes luego de la ocurrencia de un terremoto debido a que no cuentan con un mecanismo restitutivo que les permitan recobrar su posición original. Además exigen un mantenimiento continuo ya que al estar en contacto, bajo presión dos superficies de acero, es posible desarrollar un proceso de soldadura en frío situación que, afectaría fuertemente el comportamiento del sistema.

El crecimiento de la industria química y el desarrollo de nuevas técnicas y materiales, permitieron que en 1969 apareciera el primer uso de aisladores elastoméricos. La escuela de tres niveles y hormigón armado construida en Skopje, ExYugoslavia, descansa sobre grandes bloques de caucho natural, los que no presentan refuerzos de ningún tipo, causando el pandeo de los aisladores debido al peso propio de la estructura, según se puede observar en la Figura 2.2. (Garevski et al, 2000).



Figura 2.2. Imagen del sistema de aislación de la escuela Pestalozzi en Ex Yugoslavia.

Dado que la rigidez horizontal y vertical del dispositivo es similar, se espera que el edificio presente un balanceo durante un sismo. Es importante mencionar que estos dispositivos fueron diseñados cuando la tecnología para bloques de neopreno reforzado con acero no se encontraba desarrollada.

Los proyectos más recientes hoy utilizan casi exclusivamente aisladores conformados por planchas de goma vulcanizadas a láminas de acero y en muchos países (Estados Unidos de Norteamérica y Nueva Zelanda) con núcleo de plomo para mejorar el amortiguamiento de los dispositivos. Dichas planchas proveen una importante rigidez vertical pero conservan su flexibilidad horizontal parámetro importante para el proceso de disipación de energía.

Muchos proyectos de aislamiento sísmico, particularmente en Nueva Zelanda y Japón, combinan aisladores de goma natural de alto amortiguamiento con amortiguadores hidráulicos, barras de acero retorcidos o núcleo de plomo dentro del aislador elastomérico. Dichos elementos introducen una no linealidad de la respuesta que en parte complican el análisis teórico y por otro lado reducen el grado de aislamiento para los modos superiores de la excitación sísmica (Naeim et al, 1999). Sin embargo, la presencia de los amortiguadores hidráulicos funcionando en paralelo con aisladores, conducen a respuestas eficientes del sistema de aislamiento cuando se está en presencia de terremotos asociados a falla cercana (Jangid et al, 2001).

Como antecedente es importante mencionar que el uso del aislamiento sísmico en Japón es mayor que en los Estados Unidos de Norteamérica. Después del primer proyecto realizado en 1986 el número de construcciones con aislamiento sísmico de base creció a cerca de diez edificios por año en 1990 y 1991. Una adecuada respuesta del edificio del centro postal de Japón, ante la ocurrencia del terremoto de Kobe de 1995, motivó que el número de aplicaciones de aislamiento de base se incrementara notablemente e inclusive se extendiese a edificios de viviendas; por ejemplo en marzo de 1997 se habían autorizado la construcción de

393 proyectos, de los cuales 228 correspondían a edificios de viviendas y 84 a oficinas públicas (Naeim et al, 1999). El crecimiento del aislamiento sísmico en Japón incluye además la construcción de 21 hospitales y 22 edificios gubernamentales. Estadísticas sobre el uso de los sistemas de aislamiento en Japón (Martelli, 2005) indicaron que en el mes de Octubre del 2003 existían aproximadamente 1700 edificios con sistemas de aislamiento sísmico, dicho número se incrementó a 2700 en Junio del 2005.

Como se observa, desde hace más de 20 años, los dispositivos de aislamiento sísmico en Japón ya se han extendido a viviendas situación que, lo caracteriza, respecto al uso de la técnica, con relación a otros países sísmicos del mundo.

En Sudamérica el país que más fuertemente ha trabajado en aislamiento sísmico ha sido Chile. Entre las aplicaciones más importantes pueden citarse: Un edificio para viviendas económicas que consta de dos departamentos de 50 m² cada uno por piso, una altura de cuatro niveles con aisladores elastoméricos a base de láminas de caucho reforzado con acero (Sarrazin et al, 1989 y Moroni et al, 1995); un puente de longitud 383 metros (Marga-Marga), conformado por un único tablero continuo apoyado en 36 aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero (Boroscheck et al, 1997); un tramo elevado de 5 á 8 metros de la línea 5 del metro de Santiago (Sarrazin et al, 1995).

Un edificio destinado a Hospital (Hospital Militar), ubicado en la comuna de La Reina en Santiago de Chile, el mismo consta de una superficie aproximada a 50.000 m² y posee cuatro niveles por encima del sistema de aislamiento. En dicho edificio se utilizaron 164 aisladores elastoméricos reforzados con placas de aceros con diámetros de 70 y 90 cm.. El edificio representa la estructura aislada de mayores dimensiones en América Latina (Stagno et al, 2001).

Otras obras con dispositivos de aislamiento son, el centro médico San Carlos de Apoquindo de la Universidad Católica de Chile construido durante el año 2000, de aproximadamente 8000 m² distribuidos en seis pisos, y estructurado en base a pórticos dúctiles de hormigón armado. El edificio se encuentra aislado al nivel de losa del subsuelo con 52 aisladores de alto amortiguamiento, 22 de los cuales cuentan con corazón de plomo.

Los edificios contiguos San Agustín (2002) y Hernán Briones (2003) de la Escuela de Ingeniería en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica, cuenta con 42 aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento y 14 aisladores friccionales. El edificio, de una planta de 6000 m² aproximadamente el primero y 1900 m² el segundo, ambos estructurados en base a un sistema dual de tabiques de hormigón armado y pórticos. El sistema de aislación se ubica

en este caso directamente sobre las fundaciones. Los aisladores de todos estos edificios fueron fabricados en Chile por la empresa VULCO S.A.

En Argentina y particularmente en la región oeste, zona de mayor peligro sísmico del país existen dos aplicaciones. La primera es el edificio de la Residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional, ver Figura 2.3 (Tornello et. al, 2003; 2004 y 2005). El complejo está compuesto por tres edificios de idénticas características arquitectónicas y estructurales, destinados a dormitorios, de los cuales, uno de ellos es el que se encuentra con los dispositivos de protección. Los edificios presentan tres niveles, de planta rectangular de 8.20 por 7.60 metros. En cada nivel del edificio se ubican por separado dos ambientes destinados a dormitorios y desayunador, dos baños y dos kitchenettes.

El sistema aislamiento sísmico del edificio se logra por la acción combinada de aisladores de resortes helicoidales de acero y amortiguadores visco elásticos. Se dispusieron cuatro aisladores y cuatro amortiguadores, un par en cada vértice del edificio (Figura 2.3).

El proyecto se encuentra actualmente terminado e instrumentado y los resultados obtenidos hasta la fecha sobre la respuesta del edificio aislado son sumamente alentadoras (Tornello et. al, 2007 y 2008), motivo por el cual se entiende que la técnica de aislamiento resulta ser una estrategia altamente conveniente para proteger las construcciones civiles.



Figura 2.3. Residencia Universitaria FRM-UTN.

El otro antecedente existente en el país es el edificio para el Instituto de Histología y Embriología Molecular de la Universidad Nacional de Cuyo, una fotografía de la fachada y los aisladores utilizados se muestra en la Figura 2.4. Se trata de un bloque con un primer nivel para estacionamiento y servicios, y cuatro niveles superiores para laboratorios, gabinetes, salas para seminarios, y locales complementarios. El bloque tiene 72,4 m de largo y 18,6 m de ancho. El edificio cuenta con una estructura mixta de acero-hormigón. El sistema de aislación es mixto, está compuesto por aisladores elastoméricos y apoyos deslizantes. Esta tecnología

debió importarse y sus tiempos de fabricación fueron lentos situación que llevó a discutir con los proveedores de los sistemas de apoyo una solución que minimizara los atrasos en la obra.



Figura 2.4. Instituto de Histología y Embriología Molecular de la UNC.

El desarrollo del proyecto de la Residencia de estudiantes puede considerarse como una obra que marcó el inicio de líneas de investigación en técnicas no tradicionales de protección sísmica en el país. Todos esos trabajos se desarrollaron en el marco institucional de la FRM de la UTN. El proyecto de la presente tesis pretende darle continuidad institucional a la citada línea de investigación con la idea de realizar un desarrollo tecnológico.

2.3. Base teórica del aislamiento sísmico

El sistema de aislamiento sísmico más simple es aquel en el cual la masa m se encuentra soportada por un dispositivo de baja rigidez a los desplazamientos horizontales x , el cual cumple la función de aislar a la masa de la excitación externa. La acción exterior del terremoto puede representarse por un desplazamiento del suelo con variación sinusoidal u_g . Ver Figura 2.5 (Kelly, 1993, 1996).

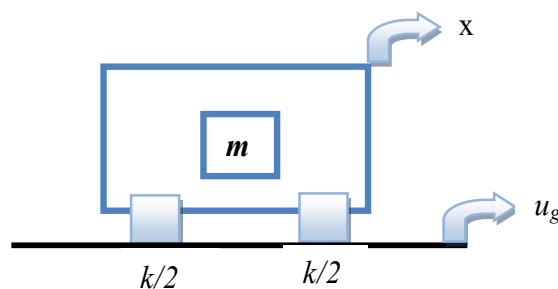


Figura 2.5. Esquema básico del aislamiento sísmico.

La efectividad del aislamiento sísmico para proporcionar una protección de las vibraciones de la masa m , se cuantifica mediante el concepto de transmisibilidad (T) (ecuación 2.3.; 2.6) y se

define como la relación entre el valor máximo de los desplazamiento absolutos de la masa y del suelo. La variación de los desplazamientos en el tiempo de la excitación exterior, se admite del tipo sinusoidal (ecuación 2.1) como también la respuesta en términos de desplazamientos de la masa m (ecuación 2.2).

$$u_g = \bar{u}_g e^{i\omega t} \quad 2.1$$

$$x = \bar{x} e^{i\omega t} \quad 2.2$$

$$T = \frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} \quad 2.3$$

Donde: \bar{x} = Máximo desplazamiento de la masa.

\bar{u}_g = Desplazamiento máximo absoluto del terreno.

ω = Frecuencia de la excitación exterior.

La transmisibilidad puede definirse también en término de una relación de aceleraciones absolutas, es decir:

$$\ddot{u}_g = \bar{a}_g e^{i\omega t} \quad 2.4$$

$$\ddot{x} = \bar{a} e^{i\omega t} \quad 2.5$$

$$T = \frac{\bar{a}}{\bar{a}_g} \quad 2.6$$

\bar{a} = Máximo aceleración de la masa.

\bar{a}_g = Aceleración máxima absoluta del terreno.

La ecuación de movimiento de la masa, sujeta a la acción del movimiento del suelo, se expresa mediante la ecuación (2.7). Luego si se define la razón de amortiguamiento crítico por la (2.8) y la frecuencia natural con (2.9), la ecuación de movimiento queda expresada con la forma indicada en la (2.10).

$$m \ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{u}_g) - k(x - u_g) \quad 2.7$$

$$\beta = \frac{c}{2\omega_o m} = \frac{c}{2\sqrt{k m}} \quad 2.8$$

$$\omega_o^2 = \frac{k}{m} \quad 2.9$$

$$\ddot{x} = -2\omega_o \beta (\dot{x} - \dot{u}_g) - \omega_o^2 (x - u_g) \quad 2.10$$

Los valores de u_g y x han sido definidos por las ecuaciones (2.1) y (2.2) respectivamente, por lo tanto la expresión de amplitud de transmisibilidad queda:

$$\frac{\bar{x}}{\bar{u}_g} = \frac{1 + 2i\beta\Omega}{1 + 2i\beta\Omega - \Omega^2} \quad 2.11$$

Donde: $\Omega = \frac{\omega}{\omega_o}$

ω = frecuencia de la excitación exterior.

ω_o = frecuencia propia del sistema.

El cociente de la suma de complejos tiene solución en el campo real, por lo que la expresión de la amplitud de la transmisibilidad queda expresada por la ecuación (2.12):

$$T = \left[\frac{1 + 4\beta^2\Omega^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2} \right]^{1/2} \quad 2.12$$

Si se analiza la ecuación (2.12) se observa que cuando $\Omega=0$ el valor de $T = 1$. Cuando $\Omega=1$ $T=(1+4\beta^2)^{1/2} / 2\beta$. Cuando β es pequeño, $T \approx 1/2\beta$. Por otro lado cuando $T = 1$, $\Omega^2=2$, independientemente del valor de β , por lo tanto T es siempre menor que uno cuando $\Omega > \sqrt{2}$. Ver Tabla 2.1.

La variación de la transmisibilidad T para un vibrador de un grado de libertad, en función de la relación de frecuencias y para distintos valores de β , se observa en la Figura 2.4.

La medición de la transmisibilidad suele realizarse en “decibeles” ($decibeles=20\log_{10} T$), por lo tanto es habitual que la representación se realice en escala logarítmica para el eje de las abscisas (Kelly, 1993, 1996). En la Figura 2.6 puede observarse que el valor de T decrece para valores altos de Ω . Es decir que para valores elevados de Ω , el valor de T disminuye con la relación: $T \approx 2\beta/\Omega$, por lo tanto valores altos de amortiguamiento tienden a reducir la efectividad del sistema de aislamiento para altas frecuencias, sin embargo el amortiguamiento es esencial para limitar la respuesta en el intervalo de la resonancia ($\Omega=1$).

Tabla 2.1. Valores límites de la función de transmisibilidad T para amortiguamiento viscoso.

Relación de frecuencias cuando tiende a...	Función de transmisibilidad (T) para amortiguamiento viscoso
$\Omega \rightarrow 0$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow 1$	$T \rightarrow \frac{\sqrt{1+4\beta^2}}{2\beta} \approx \frac{1}{2\beta}$
$\Omega \rightarrow \sqrt{2}$	$T \rightarrow 1$
$\Omega \rightarrow \infty$	$T \rightarrow \frac{2\beta}{\Omega}$

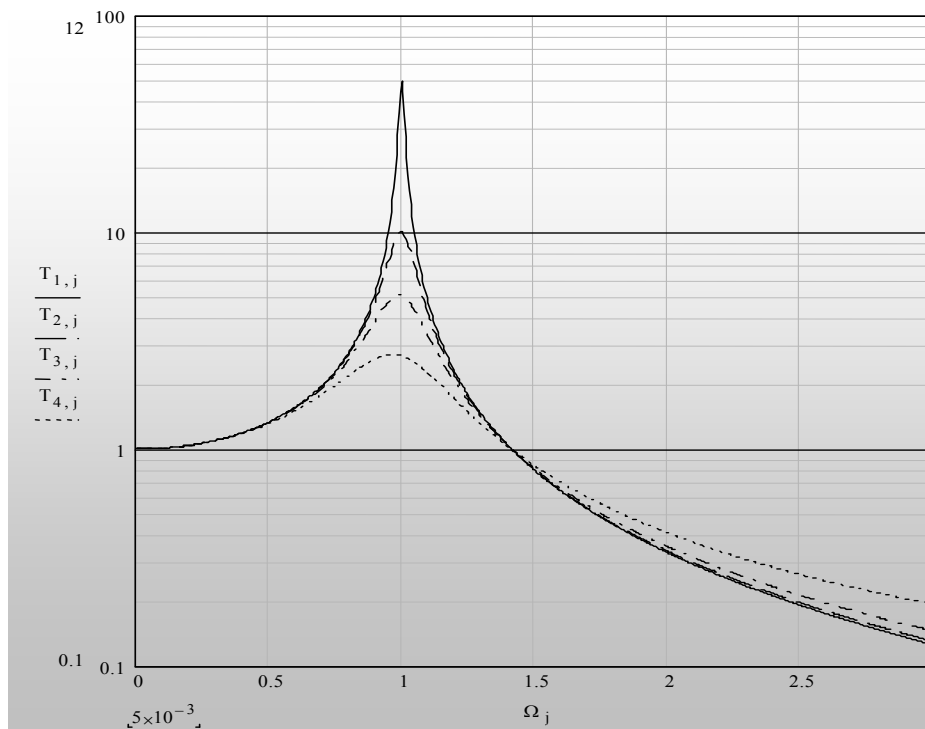


Figura. 2.6. Variación de la transmisibilidad T de un vibrador de un grado de libertad para amortiguamiento viscoso.

Un modelo de viscosidad lineal no sería adecuado para representar el comportamiento de ciertos tipos de aisladores (por ejemplo los elastoméricos) (Kelly, 1993, 1996), por lo que se hace necesario evaluar las funciones de transmisibilidad con amortiguamiento histerético. Las funciones de transmisibilidad, para ambos tipos de amortiguamiento, son muy parecidas en su forma, sin embargo presentan diferencias, respecto al amortiguamiento viscoso y para valores de Ω tendiendo a uno e infinito.

Para el caso particular de estructuras con aislamiento sísmico es conveniente utilizar procedimientos de cálculos no lineales (método paso a paso o historia de la respuesta en el dominio del tiempo) sin embargo para ciertos tipos de aisladores (elastoméricos), es posible, mediante una linealización de las ecuaciones de movimiento, plantear un sistema lineal equivalente (Kelly, 1991). Existen otros tipos de aisladores (friccionales) en los cuales es complejo linealizar las ecuaciones de movimiento aunque en algunos casos se han propuestos modelos no lineales de un grado de libertad (Bozzo et al, 1990).

La teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, se basa en considerar dos masas, la m_s que representa la masa de la superestructura y la m_b que considera la masa de la estructura de fundación que se encuentra por encima del sistema de aislamiento incluido el mismo, ver Figura. 2.7. (Naeim et al, 1999).

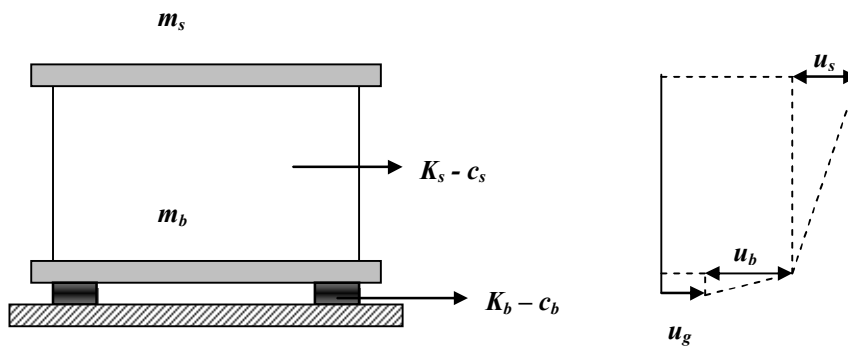


Figura 2.7. Modelo de 2 GDL para representar la estructura aislada.

En la figura precedente se representa con K_b y K_s , las rigideces del sistema de aislamiento y de la superestructura respectivamente, con c_b y c_s los coeficientes de amortiguamiento viscoso de los dos niveles considerados, u_g , el desplazamiento absoluto del terreno, u_b , el desplazamiento relativo del sistema de aislamiento con respecto al suelo y u_s , el desplazamiento relativo de la superestructura con respecto a la fundación.

Se define:

$$M_t = m_b + m_s \tag{2.13}$$

La ecuación del movimiento del modelo de dos grados de libertad se expresa como:

$$(m_s + m_b)\ddot{u}_b + m_s\ddot{u}_s + c_b\dot{u}_b + k_b u_b = -(m_s + m_b)\ddot{u}_g \tag{2.14}$$

$$m_s\ddot{u}_b + m_s\ddot{u}_s + c_s\dot{u}_s + k_s u_s = -m_s\ddot{u}_g \tag{2.15}$$

Tratándose de un sistema de dos grados de libertad, es posible explicitar la ecuación (2.15) mediante una notación matricial (2.16), expresada sintéticamente mediante la (2.17):

$$\begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_t & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad 2.16$$

$$M_t \ddot{u} + C \dot{u} + K u = - M_t j \ddot{u}_g \quad 2.17$$

En la última ecuación j es el vector que vincula el grado de libertad correspondiente al movimiento del suelo. La solución de la ecuación (2.17) está asociada a un problema de valores y vectores propios del tipo:

$$(K - \omega^2 M_t) \varphi = 0 \quad 2.18$$

En la ecuación (2.18) el valor de ω representa la frecuencia del sistema y φ su correspondiente forma modal. La ecuación característica para la frecuencia puede explicitarse de la siguiente forma:

$$\omega^4 (1 - \gamma_m) - \omega^2 \left(\frac{K_b}{m_s + m_b} + \frac{K_s}{m_s} \right) + \frac{K_s}{m_s} \frac{K_b}{(m_b + m_s)} = 0 \quad 2.19$$

El factor γ_m define la relación de masas:

$$\gamma_m = \frac{m_s}{(m_s + m_b)} = \frac{m_s}{M_t} \quad 2.20$$

La solución de la ecuación (2.19) proporciona dos frecuencias naturales, asociadas a los dos grados de libertad del sistema. Si se define la frecuencia de la estructura y la del sistema de aislamiento, respectivamente como:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K_s}{m_s}} \quad 2.21$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{K_b}{m_b + m_s}} \quad 2.22$$

La solución de la ecuación (2.19) resulta:

$$\omega_{1-2}^2 = \frac{\omega_b^2 + \omega_s^2}{2(1 + \gamma_m)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1 - \gamma_m)}{(1 + \varepsilon)}} \right] \quad 2.23$$

El coeficiente ε de la ecuación (2.23) representa la relación entre las frecuencias naturales.

$$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$$

2.24

Si se explicita las raíces de la ecuación (2.23), los valores de las frecuencias naturales pueden expresarse como:

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 (1 - \gamma_m \varepsilon) \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma_m)} (1 + \gamma_m \varepsilon) \quad 2.25$$

La rigidez de estructura K_s , es muy alta comparada con la rigidez del sistema de aislamiento K_b , por lo tanto el factor ε tiene un valor pequeño. En general desde un punto de vista práctico es habitual tomar el valor ($\varepsilon = 0.01$) (Kelly, 1991). En consecuencia el cuadrado de dicho valor es muy próximo a cero, el término $(1+\varepsilon)^2 \cong 1$ y la ecuación 2.25 queda reducida a las siguientes expresiones.

$$\omega_1^2 \cong \omega_b^2 \quad \omega_2^2 \cong \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma_m)} \quad 2.26$$

El valor de ω_1 representa la frecuencia modificada del sistema de aislamiento y la ω_2 la frecuencia modificada de la estructura. De la observación de las anteriores ecuaciones se concluye que el período de una estructura con aislamiento sísmico es similar al período del sistema de aislamiento. Conocidos los valores propios de las frecuencias ω_1 y ω_2 , es posible expresar los vectores propios que permiten resolver el sistema lineal dado por la ecuación (2.18):

$$\varphi_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\varepsilon \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \varphi_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma_m} \end{bmatrix} \quad 2.27$$

El vector propio correspondiente al primer modo de vibración indica que la totalidad del movimiento lateral de la estructura, se concentra en la base y el desplazamiento relativo entre los restantes pisos es una variable de segundo orden, por lo tanto, es posible considerar que el comportamiento estructural de edificios aislados sísmicamente es similar al de un sólido rígido con desplazamiento lateral concentrado en la base (Bozzo et al., 1990).

Si se utilizan los procedimientos clásicos de la dinámica estructural, los vectores propios (2.27), permiten desacoplar las ecuaciones del movimiento dadas por las expresiones (2.16. y 2.17). Dicho procedimiento conduce a los factores de amortiguamiento modal β y los de participación modal L :

$$\beta_1 = \beta_b (1 - 1.5 \gamma \varepsilon) \cong \beta_b$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}}{(1-\gamma)^{1/2}} \left(1 - \frac{\gamma \varepsilon}{2}\right) \cong \frac{1}{(1-\gamma)^{1/2}} (\beta_s + \gamma \beta_b \varepsilon^{1/2}) \quad 2.28$$

$$L_1 = 1 - \gamma \varepsilon \cong 1 \quad L_2 = \gamma \varepsilon \quad 2.29$$

Los factores de amortiguamiento de la estructura y del sistema de aislamiento incluidos en las ecuaciones (2.28) pueden expresarse como:

$$2 \omega_b \beta_b = \frac{c_b}{m_s + m_b} \Rightarrow \beta_b = \frac{c_b}{2 \omega_b (m_s + m_b)}$$

$$2 \omega_s \beta_s = \frac{c_s}{m_s} \Rightarrow \beta_s = \frac{c_s}{2 \omega_s m_s} \quad 2.30$$

El valor de γ_m es siempre menor que la unidad y el ε , como se citó anteriormente es aproximadamente 0.01, por lo tanto el factor de participación del segundo modo es mucho menor que el del primer modo. Esta situación permite controlar los desplazamientos relativos de piso para estructuras que eventualmente se encuentren vibrando en el segundo modo. Por otro lado, es posible que la excitación sísmica tenga un contenido de frecuencias con un periodo predominante similar al primer modo de la estructura, es decir que la respuesta puede no ser favorable debido a que su valor máximo está condicionado por el coeficiente de amortiguamiento del sistema de aislamiento β_b (2.30).

Para diseñar estructuras con aislamiento sísmico es importante tener presente el contenido de frecuencias de los terremotos del lugar donde se emplaza la estructura. Los espectros para suelos blandos presentan una tendencia a aumentar la ordenada espectral según se incrementa el periodo de la estructura, por lo tanto no es recomendable el empleo de aisladores elastoméricos en suelos blandos. La dependencia del contenido de frecuencias del terremoto no resulta tan marcada en otros tipos de aisladores, por ejemplo los friccionales (Bozzo et al., 2000). Los análisis de las respuestas de estructuras con aislamiento sísmico de base se realizan, muchas veces, en el ámbito de la no linealidad de las ecuaciones de movimiento y para ello se utilizan distintos procedimientos. En el Anexo I se completa un breve comentario con relación a estos procedimientos.

La extensión de la teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad, tratada en los puntos precedentes, a varios grados de libertad fue formulada por Kelly J. (1993) donde el modelo analítico es similar al de dos grados de libertad. Si se utiliza los mismos conceptos planteados en los puntos precedentes, el planteo matemático puede realizarse en forma

matricial. En el Anexo I se realiza una síntesis del planteo general de las ecuaciones bajo un formato de álgebra matricial.

El amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento y por ende del sistema de aislamiento tiene una importante incidencia en la respuesta de las estructuras aisladas. Investigaciones previas (Naeim et al., 1999; Tornello et al., 2008) indicaron que la cantidad de amortiguamiento del sistema de aislamiento en relación al amortiguamiento crítico depende de las características de los terremotos que puede esperarse en la zona de emplazamiento de la estructura con aislamiento sísmico. Por otro lado valores altos de amortiguamiento del sistema de aislamiento puede anular los beneficios de la técnica del aislamiento. En el Anexo I se realiza un resumen del estado del arte en relación a los posibles tipos de amortiguamiento atendiendo al hecho de que los dispositivos que trata la presente tesis, el parámetro amortiguamiento, forma parte del diseño de los propios dispositivos.

2.4. Clasificación de los sistemas de control en la respuesta sísmica

Los sistemas de protección sísmica para estructuras utilizados en la actualidad incluyen diseños relativamente simples hasta avanzados sistemas totalmente automatizados. Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: Sistemas activos, sistemas semi-activos y sistemas pasivos.

2.4.1. Sistemas activos

Los sistemas activos de protección sísmica son sistemas más complejos que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. La Figura 2.8 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica activos. Estos sistemas monitorean la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, detectando movimientos y aplicando las fuerzas necesarias para contrarrestar los efectos sísmicos.

El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura son medidas 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. Las fuerzas que estos sistemas utilizan son, generalmente, aplicadas por actuadores que actúan sobre determinadas masas.

Una de las principales desventajas de los sistemas activos de protección sísmica, 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 ir modificando la respuesta de los dispositivos en tiempo real, lo que implica un mejor comportamiento de la estructura durante el sismo.

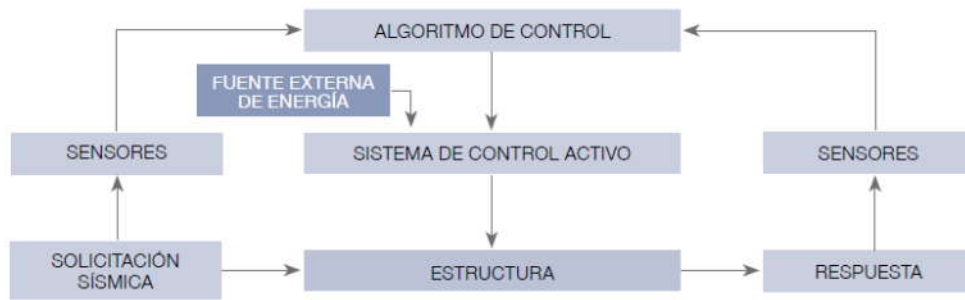


Figura 2.8. Esquema mecanismo de operación de sistemas activos.

Los sistemas de protección sísmica activos han sido desarrollados por Estados Unidos y Japón. Han sido aplicados principalmente en Japón, donde las restricciones de espacio de las grandes urbes, han detonado la construcción de estructuras de gran esbeltez. La Figura 2.9 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistemas activos. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

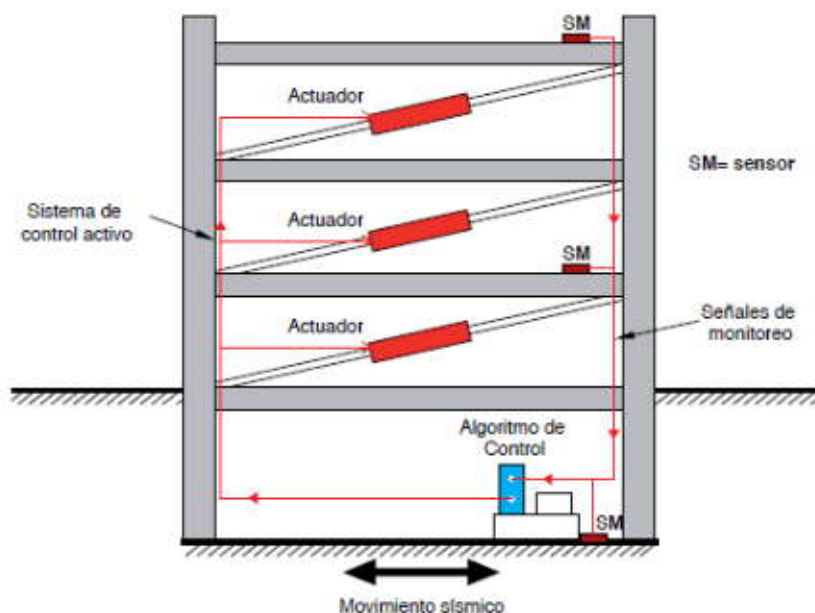


Figura 2.9. Esquema de estructura con sistema de control activo.

2.4.2. Sistemas semi-activos

Los sistemas semi-activos de protección sísmica, 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. Los sistemas semi-activos actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semiactivos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro- o magneto-reológicos. La Figura 2.10 muestra esquemáticamente una estructura protegida con sistema semi-activo. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

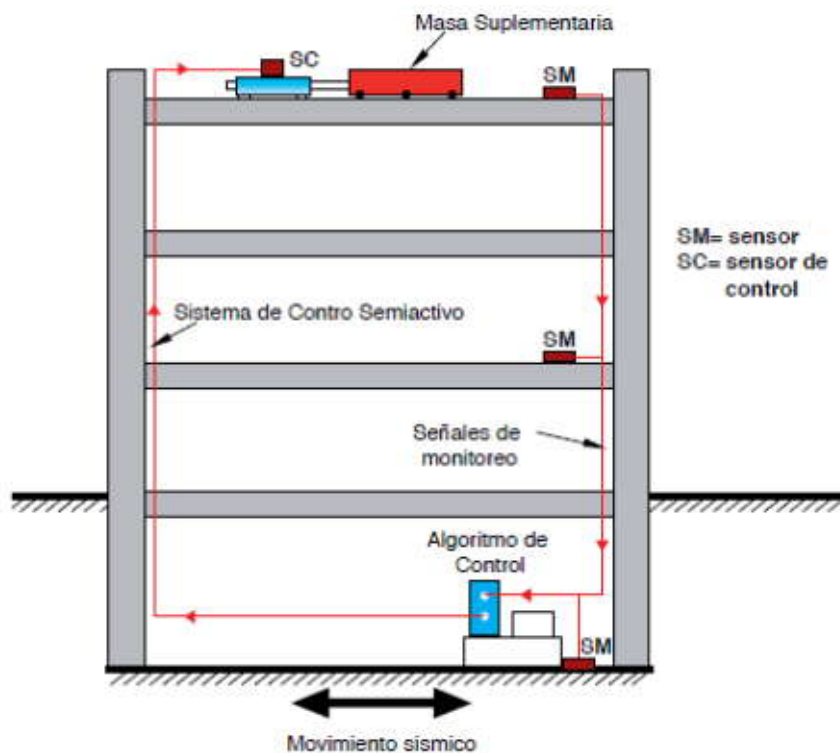


Figura 2.10. Esquema de estructura con sistema de control semi-activo.

2.4.3. Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislamiento sísmico de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de dispositivos mecánicos especialmente diseñados para disipar energía. Dado que dichos dispositivos son más comúnmente utilizados, en comparación a los sistemas activos y semi-activos, es que serán tratados con mayor detalle en los próximos apartados de la tesis. La Figura 2.11 muestra el diagrama de flujo del mecanismo de operación de los sistemas de protección sísmica pasivos.



Figura 2.11. Esquema mecanismo de operación de sistemas pasivos.

2.4.3.1. Disipación de energía

Los disipadores de energía, a diferencia de los aisladores sísmicos, no evitan que las fuerzas y movimientos sísmicos se transfieran desde el suelo a la estructura. Estos dispositivos son diseñados para disipar la energía entregada por terremotos, fenómenos de viento fuerte u otras solicitaciones de origen dinámico, protegiendo y reduciendo los daños en elementos estructurales y no estructurales. Estos dispositivos permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la estructura. En la Figura 2.12 se observa el comportamiento de un edificio sin y con disipadores, sometido a un movimiento sísmico. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

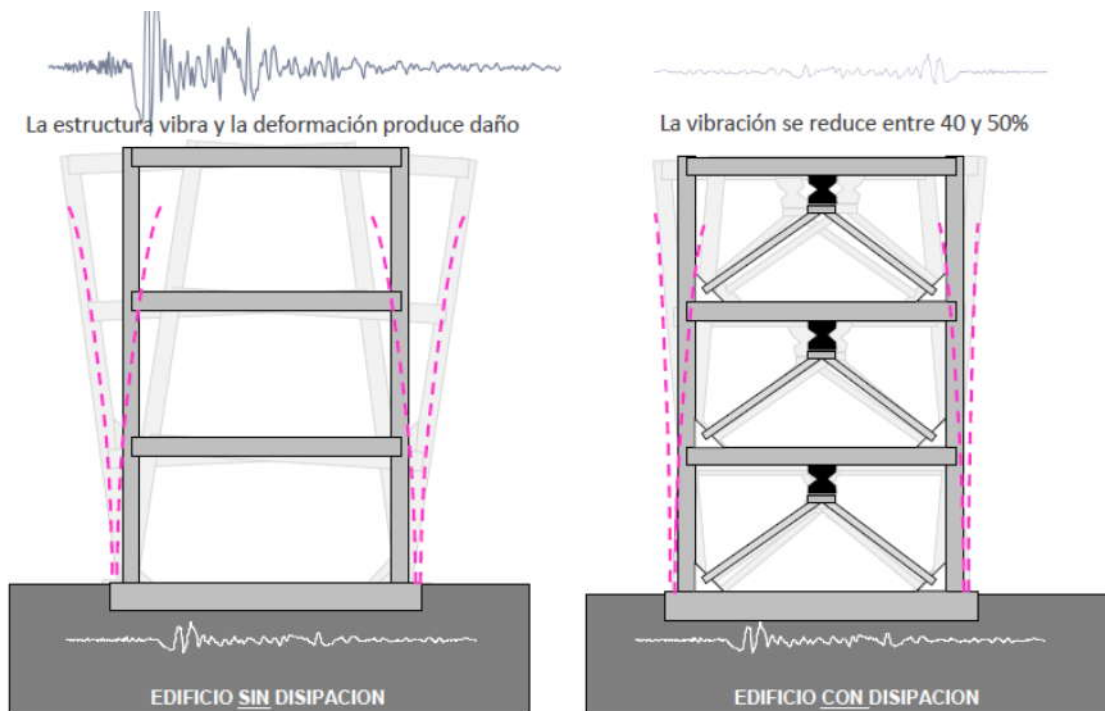


Figura 2.12. Esquema de edificio con y sin disipadores sometido a un movimiento sísmico.

Un caso particular de dispositivo de disipación de energía, corresponde a los amortiguadores de masa sintonizada. Estos dispositivos, ubicados en puntos estratégicos de las estructuras, permiten reducir la respuesta estructural. En la Figura 2.13 se observa el comportamiento de

un edificio sin y con amortiguadores de masa sintonizada (AMS), sometido a un movimiento sísmico. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

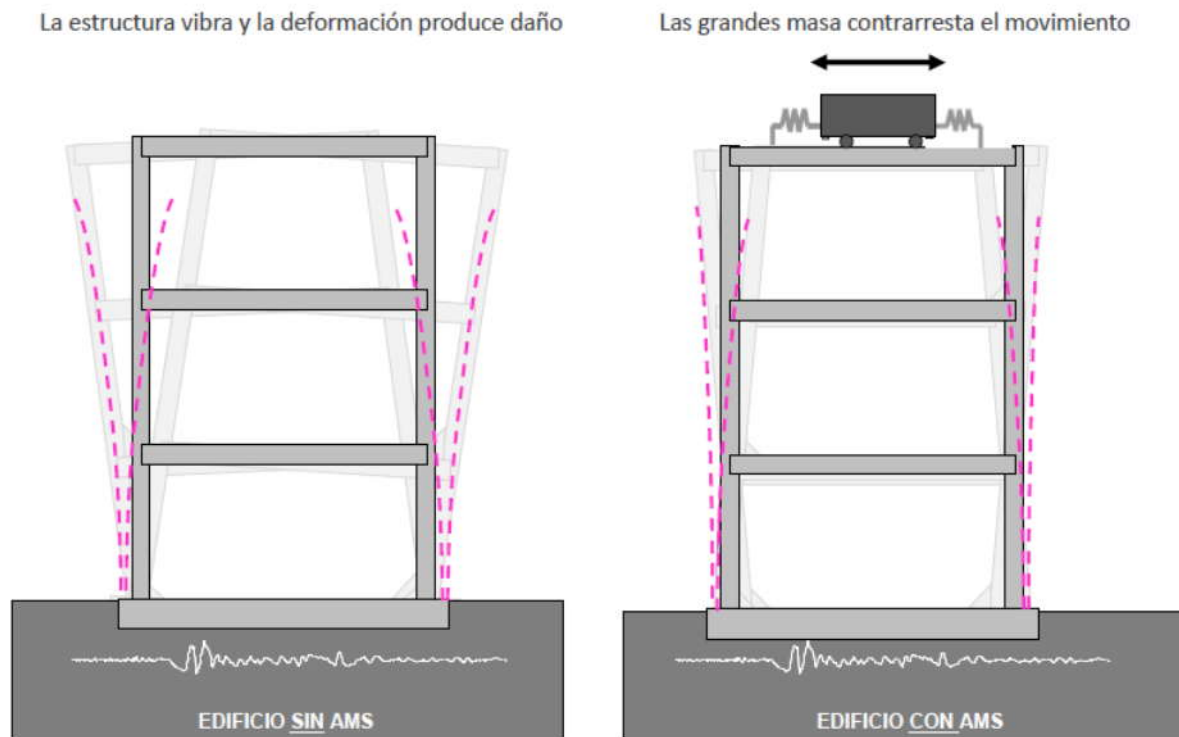


Figura 2.13. Esquema de edificio con y sin AMS sometido a un movimiento sísmico.

2.4.3.2. Aislamiento sísmico

El diseño de estructuras con aislamiento sísmico se fundamenta en el principio de separar la superestructura (componentes del edificio ubicados por sobre la interfaz de aislación) de los movimientos del suelo o de la subestructura, a través de dispositivos flexibles en la dirección horizontal, generalmente ubicados entre la estructura y su fundación o a nivel del entrepiso del subsuelo (subestructura). Sin embargo, existen casos donde se han colocado aisladores en pisos superiores. La incorporación de aisladores sísmicos permite incrementar el periodo y el amortiguamiento de la estructura aislada. En la Figura 2.14 se observa el comportamiento de un edificio sin y con aislamiento sísmico de base, sometido a un movimiento sísmico. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

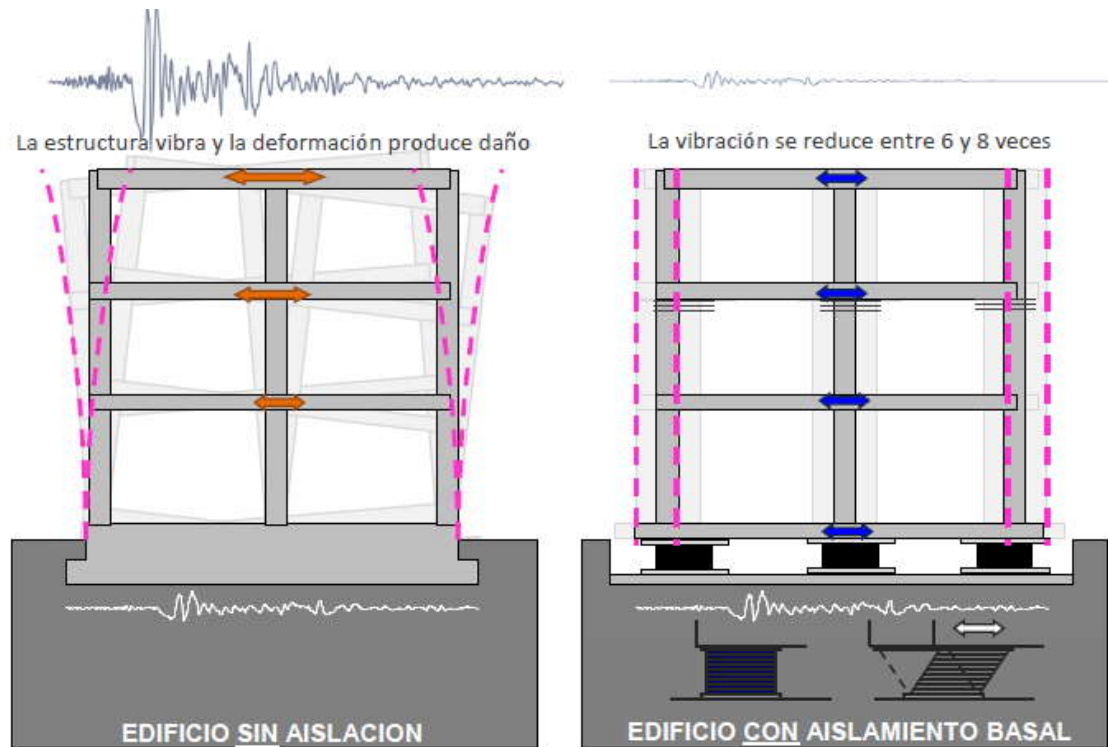


Figura 2.14. Esquema de edificio con y sin aislamiento sometido a un movimiento sísmico.

El aislamiento sísmico es utilizado para la protección sísmica de diversos tipos de estructuras, tanto nuevas como estructuras existentes que requieren un refuerzo estructural o bien una rehabilitación. Cabe aclarar que el uso sobre estructuras existentes no es muy común debido al costo y complejidad que ello implica. A diferencia de las técnicas convencionales de refuerzo estructural, el aislamiento sísmico busca reducir los esfuerzos a niveles que puedan ser resistidos por la estructura existente.

2.5. Dispositivos más frecuentemente utilizados en proyectos de aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico de base es uno de los procedimientos más eficiente para la protección sísmica de estructuras relativamente bajas o rígidas. Los aisladores sísmicos más desarrollados y utilizados en la actualidad son los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (con o sin núcleo de plomo) y los deslizantes o friccionales. Atento a los objetivos de la tesis, a continuación se detallan brevemente las características generales de distintos dispositivos de aislamiento sísmico.

2.5.1. Aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos son uno de los dispositivos más utilizados actualmente en el diseño de estructuras aisladas. Están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero.

Durante su construcción, las láminas de acero y goma se intercalan horizontalmente dentro de un molde de acero que da la forma geométrica al aislador, que por lo general, presentan una sección circular o cuadrada. Una vez colocadas estas láminas en el molde, se coloca el aislador bajo una prensa y se le aplica presión y temperatura de 140°C por un tiempo que dependerá de la sección del aislador. Durante este proceso la goma se vulcaniza y adquiere su propiedad elástica. Además, el calor aplicado produce la reacción del pegamento epóxico con que han sido cubiertas las láminas de goma y acero. La adherencia debe ser más resistente que la goma misma y la falla por cizalle de un aislador debe ocurrir por deformación en la goma antes que por una falla del pegamento goma-acero. El conjunto de láminas de goma y placas de acero está cubierto en sus extremos superior e inferior por dos placas de acero, en las cuales se conecta con la superestructura en su parte superior y la fundación en su parte inferior.

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 apoyos elastoméricos, entre ellos se encuentran los apoyos de goma natural (NRB, Natural Rubber Bearing), los apoyos de goma de bajo amortiguamiento (LDRB, Low-Damping Rubber Bearing) y alto amortiguamiento (HDRB, High-Damping Rubber Bearing), y los apoyos de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead-plug Rubber Bearing).

2.5.1.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)

Este tipo de dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos. Los aisladores tipo LDRB presentan bajo amortiguamiento (2-5% como máximo), por lo que generalmente se utilizan en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema. Estos dispositivos presentan la ventaja de ser fáciles de fabricar. La

respuesta de sistemas de aislamiento sísmico conformados por estos tipos de aisladores está influenciada por el valor del amortiguamiento y la rigidez equivalente del aislador (Kelly, 1993, 1996). La Figura 2.15 muestra la vista de un corte de un aislador elastomérico junto a sus principales características.



Figura 2.15. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB).

2.5.1.2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo (LRB) son aisladores elastoméricos similares a los LDRB pero poseen un núcleo de plomo, ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 15%, lo que admite reducir los desplazamientos horizontales y mejorar la disipación de energía (Naeim et al., 1999). Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un terremoto, 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. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico. La Figura 2.16 muestra los componentes de un aislador elastomérico tipo LRB.

Alejar el período fundamental de un edificio del período predominante de un terremoto no garantiza plenamente la protección de la estructura, debido a una posible resonancia con otras frecuencias naturales más altas (Bozzo et al., 2000). Por lo general diversos terremotos no muestran un período predominante claramente definido y es posible que la presencia de distintos picos espectrales conduzca a amplificaciones dinámicas. Para controlar dichas amplificaciones es oportuna la adición de amortiguamiento, parámetro que permite, de una manera más eficiente, la disipación de energía (Ver Anexo I).

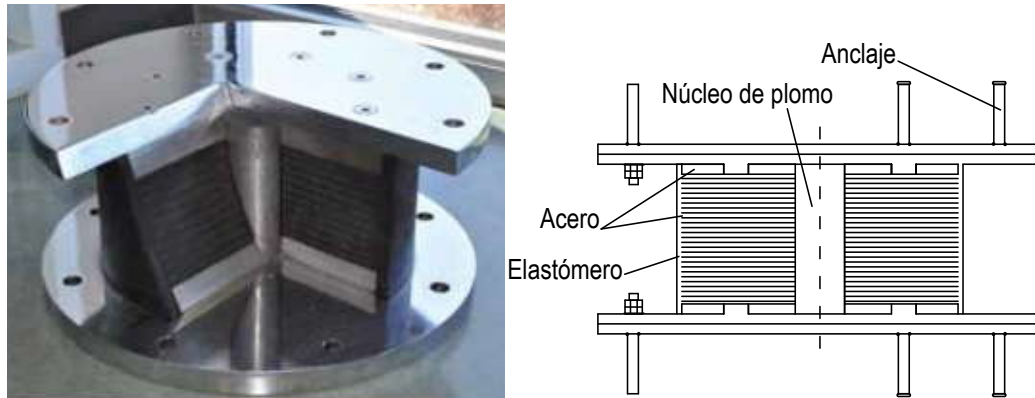


Figura 2.16. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

La relación fuerza- desplazamiento puede modelarse mediante el modelo histerético indicado en la Figura 2.17.

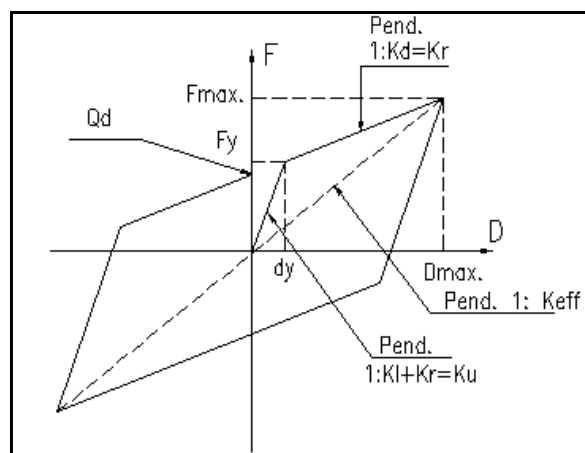


Figura 2.17. Constitutiva no lineal del aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

2.5.1.3. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Los HDRB son aisladores elastoméricos cuyas láminas de elastómeros son fabricados adicionando elementos como carbón, aceites y resinas, con el fin de aumentar el amortiguamiento de la goma hasta niveles cercanos al 10-15%. Los aisladores tipo HDRB presentan mayor sensibilidad a cambios de temperatura y frecuencia que los aisladores tipo LDRB y LRB. A su vez, los aisladores HDRB presentan una mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabiliza luego del tercer ciclo de carga. Estos dispositivos, 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.

El desarrollo de la goma con alto amortiguamiento fue obtenido en 1982 por *Malaysian Rubber Producers' Research Association (MRPRA)* y dicha característica permite diseñar sistemas de aislamiento sin la adición de mecanismos que provean un amortiguamiento

adicional. El amortiguamiento puede ser incrementado a valores comprendidos entre un 10 y un 15% con el 100% del esfuerzo de corte (Naeim et al., 1999).

El amortiguamiento que provee el aislador de goma de alto amortiguamiento no es viscoso ni tampoco histerético, su respuesta se encuentra entre ambos. Para un amortiguamiento viscoso lineal la disipación de energía es función del cuadrado del desplazamiento, mientras que para amortiguamiento histerético tiende a ser lineal con el desplazamiento (Ver Anexo I).

2.5.2. 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) más conocido como teflón, sobre la que se soporta la estructura. La superficie de deslizamiento permite el movimiento horizontal de la estructura de manera independiente del suelo. Este sistema de aislación sísmica permite disipar energía por medio de las fuerzas de rozamiento que se generan durante un terremoto. 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. Los aisladores deslizantes planos generalmente deben ser acompañados por mecanismos o sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo) que restituyan la estructura a su posición original luego del terremoto. Adicionalmente, estos dispositivos requieren de mayor mantenimiento y cuidado, ya que cualquier modificación en las superficies deslizantes puede modificar los parámetros de diseño de los dispositivos.

La empresa *Earthquake Protection Systems (EPS)* fue quien patentó el aislador FPS. La misma le ha dado un gran impulso y se han instalado una importante cantidad de dispositivos a nivel mundial. El desarrollo tecnológico y el buen resultado obtenido con estos dispositivos han permitido contar actualmente con tres generaciones de aisladores friccionales. A los de primera generación se los conoce como de simple péndulo de fricción y a los de tercera generación, se los identifica como de triple péndulo de fricción. Los aisladores friccionales poseen algunas ventajas y desventajas con relación a los aisladores elastoméricos.

Entre las principales ventajas pueden citarse: i) menores alturas; ii) la separación entre el sistema de transmisión de carga vertical y el sistema de resistencia lateral (restitución); iii) posibilidad de limitar el nivel de corte basal máximo de la estructura a un valor preciso; iv) simplicidad del mecanismo de disipación y bajo costo; v) los aisladores friccionares son más adecuados para estructuras livianas, vi) insensible al contenido de frecuencias del input; vii)

se logra una frecuencia fundamental exacta; viii) es independiente de la masa; xix) Fuerza friccional proporcional al peso y eso minimiza los efectos de torsión (en el sistema de aislación, no en la superestructura).

Entre las desventajas se pueden mencionar: a) el control de las fuerzas normales en la interface de aislación; b) necesidad de proveer un mecanismo paralelo de restitución; c) mayor incertidumbre en la variación del coeficiente de fricción (μ), con el envejecimiento, abrasión y uso; d) incertidumbre en las propiedades de presión y velocidad; e) posibilidad de levantamiento.

Dentro de los aisladores friccionales existen distintos dispositivos, de los cuales los más importantes son:

2.5.2.1. Aisladores friccionales

Los aisladores friccionales o apoyos deslizantes planos son los dispositivos más simples. Consisten básicamente en dos superficies, una adherida a la estructura y la otra a la fundación; poseen un bajo coeficiente de rozamiento, situación que permite los movimientos horizontales y también el hecho de resistir las cargas verticales.

Por lo general, las superficies deslizantes son de acero inoxidable pulidas al espejo y de un material polimérico de baja fricción. 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 2.18 muestra un esquema de un apoyo deslizante plano.

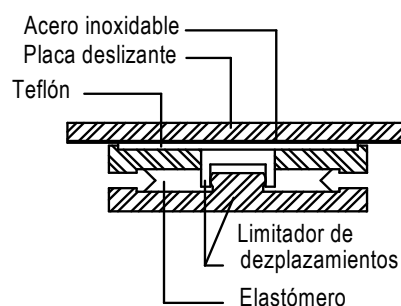


Figura 2.18. Esquema de un dispositivo aislador sísmico de base del tipo deslizante plano.

El comportamiento y la respuesta estructural de estos sistemas han sido estudiados por distintos autores (Constantinou et al., 1984, Bozzo et al., 1990, Tsopelas et al., 1994). El principio de los aisladores friccionales se basa en la ley de fricción de Coulomb dada por la ecuación (2.31).

$$F_f = \mu N_n \quad 2.31$$

Donde:

N_n = Fuerza normal en la interfase de aislación.

$\mu = \tan(\phi)$, coeficiente de fricción.

ϕ = Ángulo de roce medido entre la normal a la superficie y la dirección de la reacción sobre el cono de fricción.

En la interfase es necesario un material con una superficie muy pulida, para ello se utiliza el acero inoxidable. Por otro lado es necesario contar con un material de bajo coeficiente de fricción, entre ellos el teflón (polytetrafluoroetileno PTFE) presenta dicha propiedad debido a que se pueden lograr coeficientes entre $0.02 < \mu < 0.12$, valores menores que los que presentan otros materiales (De la Llera et al., 1998).

En la interfase teflón-acero, el coeficiente de fricción depende de la velocidad de deformación y de la presión de contacto. Dicho coeficiente aumenta con la velocidad y tiende a estabilizarse para valores de aproximadamente 10 cm/seg. (De la Llera et al., 1998)

Para estos dispositivos la disipación de energía se realiza a través del amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco (2.31), el cual es proporcional al coeficiente cinético de fricción, a la carga normal y a la amplitud el movimiento. El coeficiente de fricción es función de la naturaleza de la superficie de deslizamiento, velocidad relativa y de la presión de contacto, esto puede variar con el tiempo. Investigaciones realizadas sobre dicho coeficiente de fricción (Mokha et al., 1988; Constantinou et al., 1990) concluyeron que la variación del coeficiente puede modelarse de acuerdo a la ecuación (2.32).

$$\mu_{(t)} = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-b_f |\dot{x}_b|) \quad 2.32$$

μ_{\max} = Coeficiente de fricción a velocidades altas.

μ_{\min} = Coeficiente de fricción a velocidades cercanas a cero.

b_f = Parámetro que controla la variación del coeficiente de fricción en función de la velocidad.

\dot{x}_b = Velocidad de deslizamiento.

Los dispositivos son fabricados con coeficientes de fricción que varían entre 0.10 y 0.30 y el mismo se representa como una función monótonamente creciente con la velocidad de deslizamiento (Bozzo et al., 2000).

2.5.2.2. Simple Péndulo de friccionales (FPS, Friction Pendulum System)

El aislador de simple péndulo de fricción cuenta con un deslizador articulado ubicado sobre una superficie cóncava. Los FPS, 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. En la Figura 2.19 se presenta el esquema de una aislador friccional de simple péndulo, al cual se le han asignado dimensiones geométricas para poder expresar las características geométricas de los mismos.

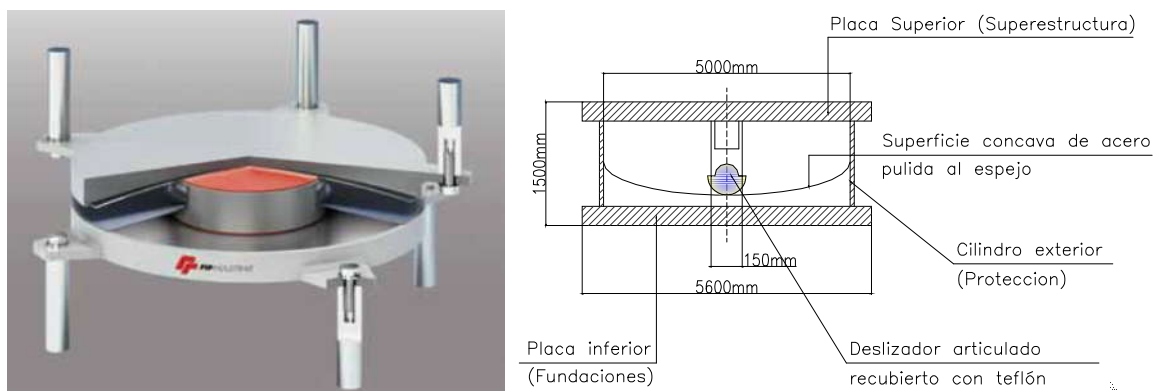


Figura 2.19. Esquema genérico y fotografía aislador friccional de simple péndulo (FPS).

El dispositivo emplea el peso propio de la estructura para recentrar el edificio, minimizando los desplazamientos finales permanentes (Mokha et al., 1990). Los materiales que se utilizan son los mismos que los del aislador anterior (acero inoxidable y PTFE), la superficie esférica es de acero inoxidable y el patín de teflón de alta resistencia. Este último se articula de manera que se adapte adecuadamente a la superficie esférica una vez desplazado.

Condiciones de equilibrio indican que la fuerza (F) actuando sobre el patín cuando el mismo se desplaza puede ser determinada por la ecuación (2.33) (De la Llera et al., 1998).

$$F = \left(\frac{W}{R_e} \right) \delta + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{\delta}) \quad 2.33$$

Donde: W = Fuerza normal sobre el patín del aislador.

R_e = Radio de la superficie esférica.

μ = Coeficiente de fricción.

δ = Desplazamiento del patín del aislador.

El período secante del aislador pendular friccional se aproxima al período de un péndulo de radio R_e , oscilando en torno a un punto fijo.

$$T_{sec} = 2\pi \sqrt{\frac{R_e \delta o}{g(\delta o + \mu R_e)}} \rightarrow \left(2\pi \sqrt{\frac{R_e}{g}} \right)_{\delta o \rightarrow \infty} \tag{2.34}$$

Donde: δo = Deformación máxima.

Por lo tanto si se dan valores a R_e es posible determinar en forma simple valores de periodo secante del aislador. Las ecuaciones propuestas son suficientes a los fines prácticos de diseño de los aisladores. El aislador de péndulo de fricción tiene una ley constitutiva con valores de rigideces estables en los distintos pasos histeréticos. En la Figura 2.20, se muestra los resultados de un ensayo realizado sobre un aislador pendular friccional (De la Llera et al., 1998).

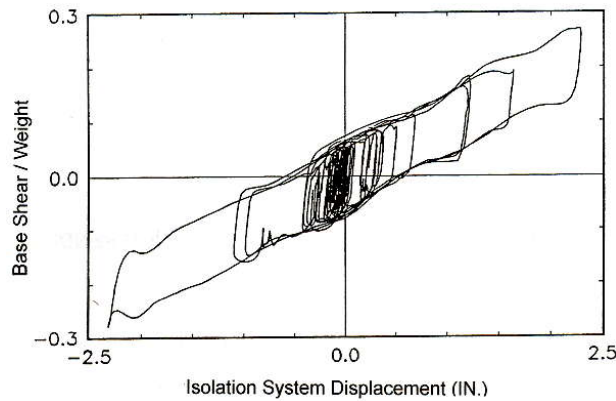


Figura 2.20. Ensayo de un aislador pendular friccional realizado en mesa vibradora.

Por lo tanto la ley constitutiva que se utiliza para modelar el aislador friccional de simple péndulo es la que muestra la Figura 2.21.

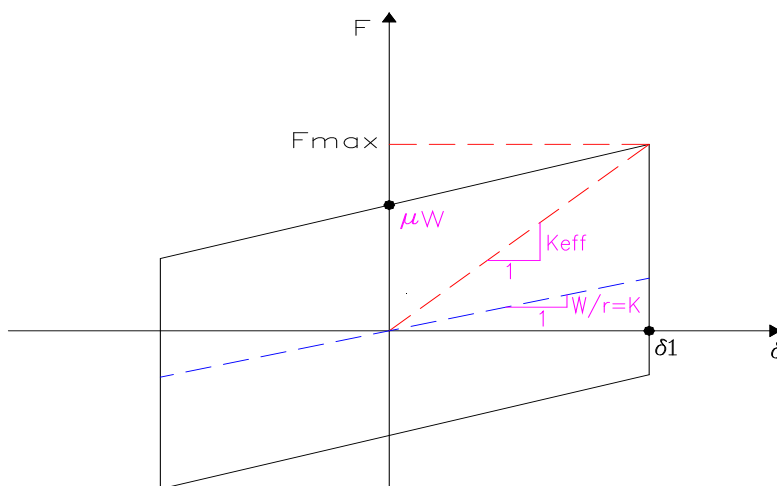


Figura 2.21. Constitutiva de un aislador friccional de simple péndulo.

Debido al movimiento aleatorio de un terremoto, el deslizador se mueve sobre la superficie cóncava en las dos direcciones siguiendo también movimientos aleatorios sin embargo, el

planteo matemático del problema puede realizarse descomponiendo el movimiento en las direcciones principales. En rigor el deslizador no se desplaza sobre una línea cóncava sino sobre una superficie que tiene la forma de un casquete esférico invertido (Figura 2.22).

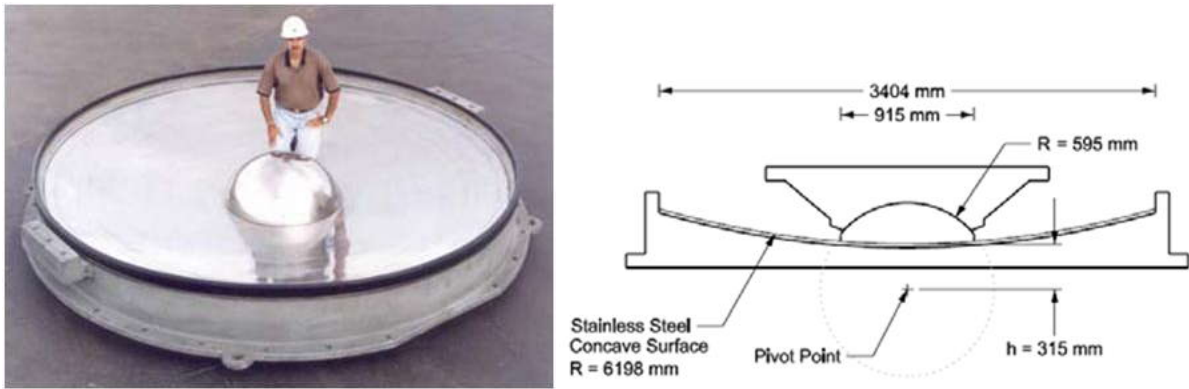


Figura 2.22. Deslizador y superficie cóncava de deslizamiento.

2.5.2.2. Aisladores de triple péndulo de Fricción (FP)

El aislador de triple péndulo de fricción posee, en relación al de simple péndulo de fricción, importantes diferencias con relación a la rigidez, amortiguamiento y amplitud de desplazamientos. La constitutiva de fuerza versus desplazamientos es compleja y muestra distintos puntos de transición que dependen de las propiedades geométricas y friccionales de los aisladores. En la Figura 2.23 se muestra la geometría de un aislador de triple péndulo de fricción (FP). (Fenz et al., 2008).

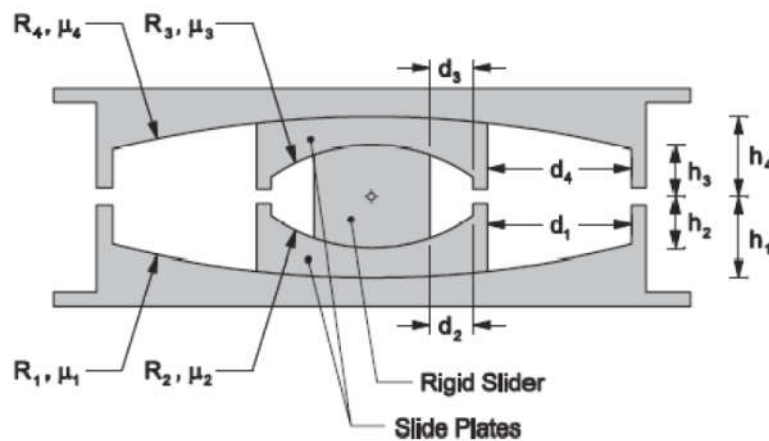


Figura 2.23. Geometría y características generales de un aislador de triple péndulo de fricción.

La respuesta de los aisladores de triple péndulo de fricción es función de los siguientes parámetros: radios R_1 , R_2 , R_3 y R_4 (normalmente $R_1=R_4$ y $R_2=R_3$); alturas h_1 , h_2 , h_3 y h_4 (normalmente $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$); distancias que definen la capacidad de desplazamientos d_1 , d_2 , d_3 y d_4 (normalmente $d_2=d_3$ y $d_1=d_4$) y de los coeficientes de fricción μ_1 , μ_2 , μ_3 y μ_4

(normalmente $\mu_2 = \mu_3$). La capacidad de desplazamiento en cada interfase de deslizamiento puede determinarse con la expresión siguiente:

$$d_i^* = \frac{R_{eff\ i}}{R_i} d_i; \quad i = 1, \dots, 4 \quad 2.35$$

Donde $R_{eff\ i}$, es el radio efectivo para la superficie “i”, el cual se puede determinar con la expresión siguiente:

$$R_{eff\ i} = R_i - h_i \quad i = 1, \dots, 4 \quad 2.36$$

La relación fuerza lateral versus desplazamientos del aislador de triple péndulo de fricción se muestra en la Figura 2.24. La misma muestran cinco ciclos (“loops”) diferentes que definen, a su vez, cinco regímenes de desplazamientos diferentes. Los aisladores de triple péndulo de fricción son normalmente diseñados para trabajar entre el régimen I y IV. El régimen V, se reserva como parámetro para restringir el desplazamiento del dispositivo. En régimen V el dispositivo consume la capacidad de desplazamiento d_1 y d_4 , deslizando solo las superficies 2 y 3 (Figura 2.23). (Fenz et al., 2008).

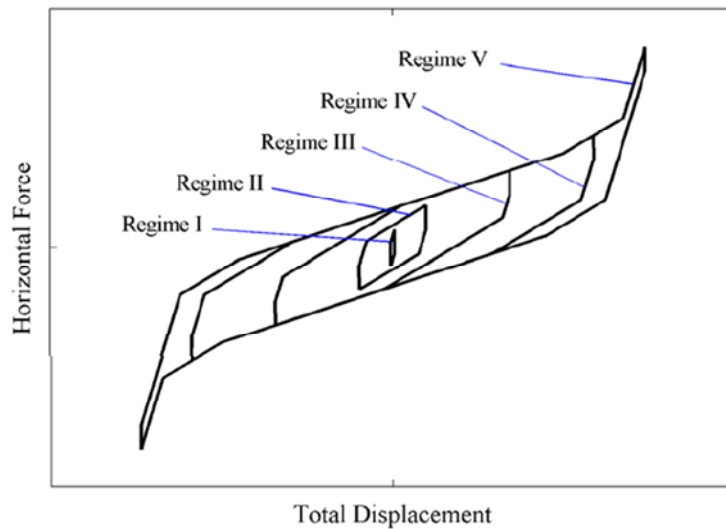


Figura 2.24. Relación “Fuerza lateral versus desplazamientos” de un aislador de triple péndulo de fricción.

La constitutiva, fuerza versus desplazamiento, del aislador de triple péndulo de fricción se muestra en la Figura 2.25. La misma representa el caso particular que citan el grupo de igualdades (2.37). (Fenz et al., 2008).

$$R_{eff1} = R_{eff4}; R_{eff2} = R_{eff3}; d_1^* = d_4^*; d_2^* = d_3^*; \mu_1 = \mu_4; \mu_2 = \mu_3 \quad 2.37$$

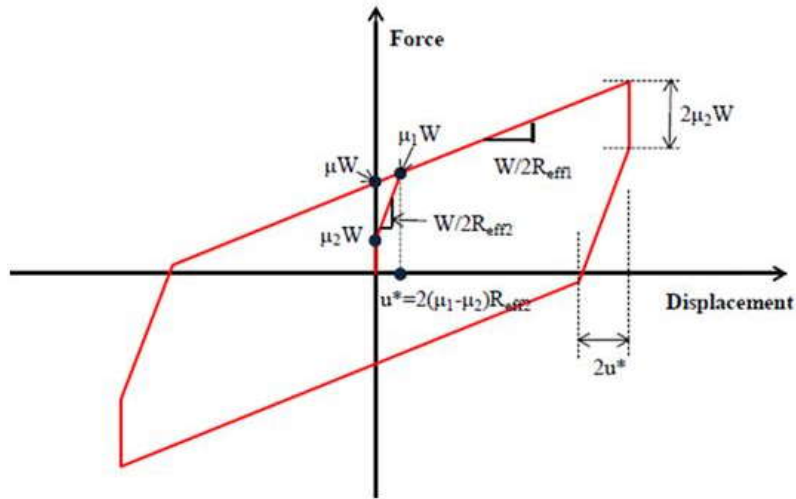


Figura 2.25. Relación “Fuerza-Desplazamiento” para un caso especial del aislador de triple péndulo de fricción.

La relación Fuerza-Desplazamiento que describe la Figura 2.25 puede determinarse con la expresión siguiente:

$$F = \frac{W}{2R_{eff1}}u + \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right] W \quad 2.38$$

La relación dada por la ecuación (2.38) es válida hasta que la fuerza lateral y el desplazamiento alcanzan los valores dados por las ecuaciones siguientes:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}}d_1^* + F_{f1} \quad 2.39$$

$$u = u^* + 2d_1^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + 2d_1^* \quad 2.40$$

$$u^* = u^{**} = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad 2.41$$

La fuerza para desplazamiento cero se determina con la expresión (2.42):

$$\mu W = \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right] W \quad 2.42$$

2.5.3. Sistemas basados en resortes metálicos helicoidales

Originalmente desarrollados para aplicarse en máquinas de pequeño porte, luego se extendió a fundaciones de máquinas pesadas e instalaciones industriales de importancia, como ejemplo una platea de fundación de turbogeneradores (Stuardi et al., 2005). Sin embargo en los últimos años se han realizado estudios sobre la respuesta de estructuras aisladas utilizando

dichos sistemas cuando las estructuras se encuentran sujetas a la acción de los terremotos. Un claro ejemplo es el edificio de la Residencia Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, el cual fue construido con este sistema de aislamiento. Desde su inauguración ha sido permanentemente monitoreado y su comportamiento, frente acciones sísmicas ha sido muy bueno. (Tornello et al., 2003, 2004, 2005).

Posee la ventaja de que el comportamiento es conocido y controlado, es adecuado a las altas temperaturas (por lo tanto para su fabricación se utilizan determinadas aleaciones), no presenta fluencia ni tampoco desplazamiento residuales.

Comparativamente con otros sistemas es de menor costo, presenta la desventaja de que el resorte sólo, posee bajo amortiguamiento (cerca del 2%) por lo tanto es necesario utilizarlo con otros dispositivos que permitan aumentar dichos valores. Para soportar elevadas cargas deben utilizarse paquetes de resortes debido a que la capacidad de carga de un único resorte, relacionado con las dimensiones y diámetro del espiral tecnológicamente viable de fabricación, es baja.

Los aisladores elastoméricos o friccionales, en sus distintos modelos, son habitualmente utilizados para suministrar aislamiento horizontal. Los sistemas basados en resortes metálicos han sido utilizados en viviendas para proveer aislamiento en las tres direcciones (Farzad et al., 1999).

Los dispositivos GCS (GERB Control System®, quien posee las patentes de los dispositivos) fueron originalmente diseñados, para controlar las vibraciones que generaban las turbinas en plantas hidroeléctricas. El sistema está conformado por paquetes de resortes con baja rigidez en sentido horizontal y vertical. Para aumentar el amortiguamiento del sistema de aislamiento se instalan junto con amortiguadores viscosos (Visco®), ver Figura 2.26.



Figura 2.26. Paquete de resortes metálicos GERB y Amortiguadores viscoelásticos GERB (Visco®).

El amortiguador viscoso (Figura 2.26) está compuesto por una carcasa inferior que contiene una masa viscosa. El pistón de la carcasa superior penetra en una masa viscosa y genera una fuerza, también viscosa, en las tres direcciones ortogonales. Un manguito de protección cierra

herméticamente ambas carcasas para evitar que ingresen elementos extraños de tal manera de impedir la contaminación de la masa viscosa.

El sistema presenta un fuerte acoplamiento entre el movimiento horizontal y el pendular debido a que el centro de gravedad de la estructura aislada se encuentra por encima del centro de rigidez del mismo (Figura 2.27), por lo tanto el sistema es práctico en situaciones donde el centro de gravedad y el centro de rigidez se encuentran en el mismo nivel (caso que se presenta con mucha frecuencia en el reactor de una planta nuclear (Farzad et al., 1999).

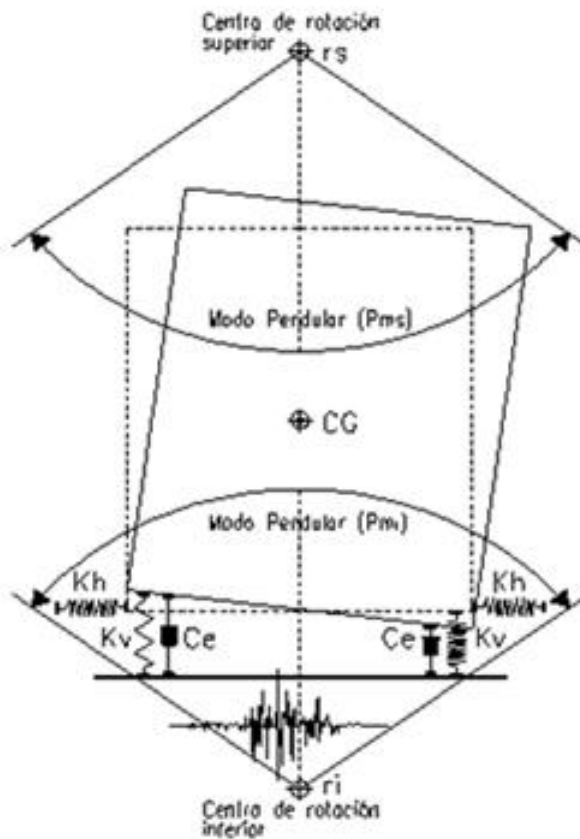


Figura 2.27. Esquema general de los polos de rotación del sistema de aislamiento GERB para los modos pendulares.

La rigidez vertical del resorte puede evaluarse con la ecuación (2.43) mientras que la lateral se encuentra influenciada por un efecto combinado de la flexión y torsión y puede ser evaluado con la ecuación (2.44).

$$k_v = \frac{G d_e^4}{8 n_e D^3} \tag{2.43}$$

$$k_l = \frac{1.13 \cdot 10^6 d_e^4}{n_e D (0.204 h_s^2 + 0.256 D^2)} [N * m] \tag{2.44}$$

Donde: $G =$ Módulo de corte del material del resorte.

$d_e =$ Diámetro de la espira que conforma el resorte.

$n_e =$ Número de espiras activas.

$h_s =$ Altura libre del resorte.

El sistema (aisladores de resortes helicoidales más amortiguador viscoso) instalado en la Residencia de estudiantes de la Facultad Regional Mendoza de la UTN, presentan como característica una rigidez lineal, tanto horizontal como vertical y un amortiguamiento cuyo comportamiento se aproxima al lineal viscoso (Figura 2.28).

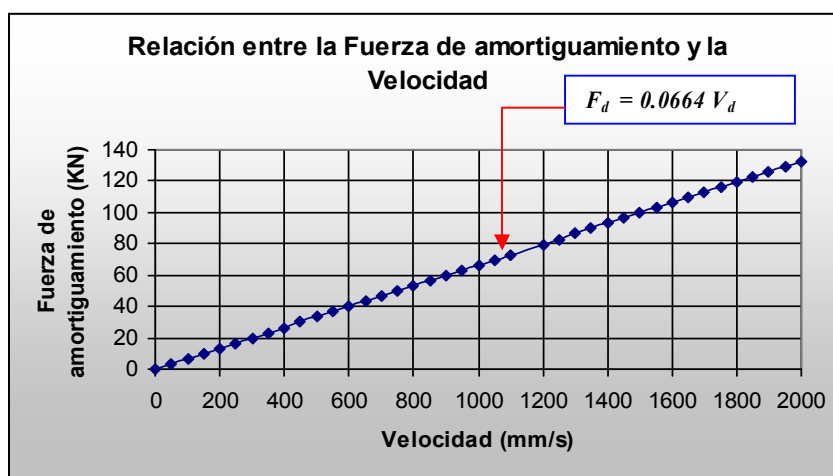


Figura 2.28. Relación lineal entre la fuerza máxima de amortiguamiento y el valor máximo de la velocidad.

2.6. Dispositivos utilizados en estructuras de mediana y baja carga axial

Con relación a los estudios previos realizados en sistemas de aislamiento sísmico para obras de mediano y bajo peso podemos mencionar los dispositivos de aislamiento elastoméricos que utilizan placas de refuerzo de fibras en reemplazo de las placas de acero, con la intención de reducir los costos del aislador. Otro beneficio de usar refuerzo de fibra es que se pueden fabricar aisladores en tiras longitudinales, los cuales presentan una aplicación más sencilla en viviendas con estructuras de muros de hormigón o mampostería, que los aisladores cuadrados o circulares. En la Figura 2.29 se muestra el diseño de un sistema de aisladores elastoméricos en tiras longitudinales (Kelly et al., 2010).

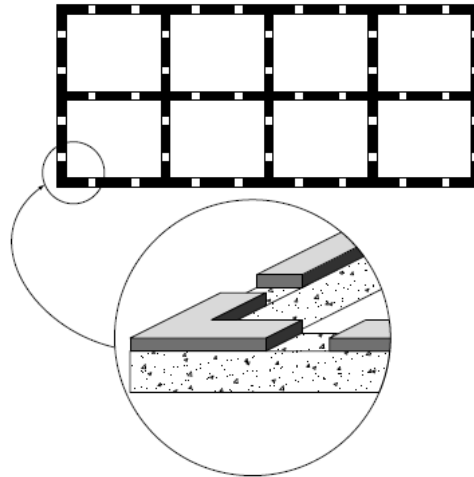


Figura 2.29. Sistema de aisladores elastoméricos en tiras longitudinales para muros.

Otro tipo de aisladores desarrollado como una alternativa para ser utilizado en construcciones de peso ligero y de bajo costo es el sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) (Besa et al, 2010).

Este sistema se utilizó en la construcción de una vivienda en el vecino país de Chile, en el año 2009. La misma está edificada sobre una losa flotante, la cual se apoya sobre los aisladores tipo biela de hormigón armado y en dos aisladores elastoméricos, estos últimos tienen por función regresar la vivienda a su posición original. En la Figura 2.30 se observan una fotografía de la losa por encima del sistema de aislación al momento de su construcción y una fotografía de la vivienda terminada. En la Figura 2.31 se muestran el sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) y el aislador elastomérico (Revista BIT, 2010).

Esta alternativa propone el empleo de aisladores elastoméricos, para materializar la fuerza restitutiva, los cuales son de uso y fabricación normal. De este modo se genera una situación que no redunde en un beneficio económico para el tipo de construcción en la cual se lo utiliza y por lo tanto no se logra independencia tecnológica.



Figura 2.30. Vivienda con sistema de aislamiento sísmico construida en Chile en el año 2009.



Figura 2.31. Sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) y aislador elastomérico.

En Ecuador se han construido y ensayados prototipos de aisladores elastoméricos de bajo costo para ser utilizados en viviendas, los resultados obtenidos, si bien son positivos, indican un bajo factor amortiguamiento. Para la fabricación de los mismos se reciclaron neumáticos en desuso, generando un aporte al medio ambiente y abaratando costos, una fotografía de los prototipos se muestra en la Figura 2.32. (Auqui et al., 2010; Aguiar et al., 2008).



Figura 2.32. Prototipos de aisladores elastoméricos fabricados en Ecuador.

De la evaluación de los antecedentes se deducen escasos estudios y aplicaciones de la técnica de aislamiento sísmico en estructuras con bajo peso y donde se halla generado nueva tecnología que permita reducir la incidencia de los dispositivos de aislamiento en el costo final de la estructura aislada.

En conclusión, la importancia del estudio se apoya en los principios básicos de las técnicas de protección sísmica hoy ampliamente difundidas a nivel mundial a excepción de nuestro país, es decir, entre los más importantes, asegurar la operatividad de las construcciones y de sus contenidos ante la ocurrencia de terremotos importantes, evitando las pérdidas de vidas

humanas y económicas junto al retraso socio-económico que produce la ocurrencia de un terremoto destructivo. Si se mantiene dicha filosofía de diseño y se acepta que la técnica de aislamiento debe ser también extendida a construcciones de bajo y mediano peso, el resultado que pretende desarrollar la tesis resulta un aporte importante a la técnica de protección sísmica, basada en la filosofía del aislamiento.

2.7. Reglamentos para el diseño de estructuras aisladas

La eficiencia de los dispositivos de aislamiento, al igual que otras técnicas de protección sísmica, tales como la disipación de energía, han sido verificadas en distintas regiones sísmicas del mundo, por tal motivo, en las últimas dos décadas distintos países han comenzado a redactar reglamentos que permitan el diseño de las estructuras con aislamiento sísmico. Por otro lado se ha avanzado en la formulación analítica de la técnica de protección y se tienen además importantes resultados de las respuestas de los distintos dispositivos que han sido tratados en el punto anterior, situación que ha permitido contar con la información necesaria para la formulación y redacción de los códigos que rigen el diseño de estructuras protegidas sísmicamente.

El capítulo 13 del FEMA 450 (Federal Emergency Management Agency, 2003) define los requerimientos de diseño de las estructuras con aislamiento sísmico. En el mismo se precisan distintos parámetros del diseño, entre los cuales se distinguen: desplazamiento total de diseño, desplazamiento total máximo incluidos los efectos de la torsión accidental del sistema. Se definen, además, los espectros de diseño y los aspectos reglamentarios a tener en cuenta en la evaluación de la respuesta en el dominio del tiempo, sobre todo las relacionadas con los parámetros de los terremotos utilizados en el análisis.

Los métodos de análisis que especifica son: fuerzas laterales equivalentes (restringido a ciertos tipos de construcciones: clase, altura, periodo de la estructura aislada, etc), métodos dinámicos (sin limitaciones), espectros de respuesta (restringidas a construcciones clasificadas en una determinada clase) y métodos que tengan en cuenta las variaciones de las propiedades de los materiales de los aisladores. El código precisa además, los requerimientos de inspección y reemplazo de componentes ubicados en la interfase del aislamiento, los valores mínimos de las fuerzas laterales a considerar en la estructura con aislamiento y su distribución en altura (FEMA 450).

Por último el citado código indica los ensayos a realizar sobre los sistemas a utilizar en el aislamiento sísmico (número de elementos a ensayar, número de ciclos, cargas verticales que se deben aplicar, etc.), los parámetros a individualizar de los ensayos para definir el amortiguamiento efectivo (β_{eff}) y la rigidez efectiva tanto en su valor máximo como en el mínimo (K_{Dmax} , K_{Dmin}) (FEMA 450).

En el Reglamento: *American Society Of Civil Engineers. Asce Standart* (Asce/Sei 7-10) el tema se trata en el Capítulo 17 bajo el título: *Seismic Design Requirements for Seismically isolated Structures*. El Capítulo se inicia con una introducción, definiciones, notaciones, requisitos generales de diseño, espectros de diseño para estructuras aisladas y la selección del método de análisis. El reglamento define cuatro métodos de análisis, i) Fuerza lateral equivalente; ii) Dinámico, iii) espectro de respuesta, iv) Historia de la respuesta en el tiempo (Response-History).

Otro código utilizado en Estados Unidos es: *Guide Specifications For Seismic Isolation Design. American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO – July 2010). El cuerpo del reglamento está formado por dieciocho capítulos y dos anexos. Los seis primeros capítulos están destinados a la caracterización de la acción sísmica en función del lugar de emplazamiento de la construcción. En el capítulo 2 se define la notación que utiliza el reglamento. El Capítulo 7 define cinco métodos de análisis: Método simplificado; Método espectral para el modo fundamental, Método espectral para n modos; Método de la historia de la respuesta (time-history). En el Capítulo 14 el reglamento desarrolla las ecuaciones para verificar el diseño de los dispositivos elastoméricos es decir, en función de las características geométricas y mecánicas de los dispositivos se verifica el estado tensional del mismo y su capacidad de deformación. En el Capítulo 16 el reglamento desarrolla las recomendaciones para la fabricación de los dispositivos friccionales (materiales, espesores mínimos, terminación de las superficies, capacidad de desplazamiento y presiones de contacto).

En 1994 la Comisión Europea de Energía atómica y ENEA (*Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energía e l'Ambiente*), publican una guía para el diseño de plantas nucleares con sistemas de aislamiento sísmico (Forni et al. 1994). Dichas guías abarcan una amplia gama de recomendaciones a tener en cuenta en los sistemas de aislamiento sísmico en general y en particular para las plantas nucleares. La guía consta de 15 capítulos los cuales tratan: definición de los terremotos para realizar un análisis de la respuesta en el tiempo, requerimientos de diseños y métodos de análisis de los sistemas de aislamiento, especímenes

a ser ensayados, grado y margen de seguridad del sistema de aislamiento conjuntamente con el monitoreo a realizar en el tiempo.

El Eurocode 8 (EC8) contiene dos capítulos destinado a sistemas de aislamiento sísmico, uno para edificios y el otro para puentes y viaductos (Martelli, 2005). El reglamento contiene aspectos que permite un diseño consistente no lineal de los sistemas de aislamiento. Otros capítulos contemplan el uso de estrategias de disipación de energía y de ellos, criterios generales y métodos de análisis para el diseño. De esta manera los sistemas de aislamiento sísmico no requieren (a partir de mayo de 2003) permisos especiales para ser utilizados.

El reglamento EC8 es menos restrictivo que los reglamentos utilizados en Estados Unidos de Norteamérica debido a que acepta utilizar ampliamente las ventajas y beneficios del aislamiento. Ello permite reducir, en forma importante, las aceleraciones y fuerzas en la superestructura en la medida que se acepte desarrollar el mecanismo de bloque rígido del edificio ubicado por encima de los aisladores. El reglamento permite, mediante un diseño apropiado del sistema de aislamiento, controlar los efectos de asimetría del edificio y con ello minimizar los efectos de torsión del edificio aislado.

Los diseños de sistemas de aislamiento sísmico en Japón, hasta el año 2000, requerían, como en otros países, la aprobación de una comisión especial. Con la formulación del nuevo código en el año 2001, dicha aprobación no es requerida a excepción de los grandes edificios, lo cual también se requiere para el caso de que el mismo sea de base fija.

El reglamento de México está conformado por el Manual de Diseño de Obras Civiles (MOC-2008), en su sección “C” trata el tema de Estructuras, mientras que el Diseño por sismo está reglamentado en su Capítulo 3. La sección 3.13 del Reglamento trata el tema de aislamiento sísmico y disipación de energía. Previo a definir los criterios de diseño el reglamento desarrolla una serie de recomendaciones entre las que se destacan, por ejemplo, las características deseables del sistema de aislamiento. A diferencia de los reglamentos tratados precedentemente, el código mexicano provee características de los principales dispositivos de aislamiento utilizados en la práctica profesional. En él se considera cuatro tipos de análisis para evaluar la respuesta de las estructuras aisladas: i) Análisis estático lineal; ii) Análisis dinámico modal; iii) Análisis estático no lineal y iv) Análisis paso a paso. En los métodos estático y dinámico modal, los aisladores de base pueden representarse mediante propiedades lineales equivalentes según las indicaciones que al respecto provee el propio reglamento.

Dentro de la región, Chile posee un código para el análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmico designado como NCh2745. Of. 2003. El reglamento desarrolla catorce

capítulos entre los cuales se trata por ejemplo los criterios de selección de los sistemas de aislamiento, los procedimientos de análisis, requisitos de detallado, estructuras que no forman parte de las edificaciones, fundaciones, ensayos requeridos para el sistema de aislamiento, etc. Paralelamente a los aspectos reglamentarios el código desarrolla de manera amplia los comentarios a las prescripciones del reglamento junto a una detallada teoría clásica del aislamiento sísmico. El mismo ha sido diseñado siguiendo una estructura muy didáctica en cuanto al tema de aislamiento sísmico debido a que dedica buena parte de su estructura a explicar los propósitos del código. En el mismo se definen los procedimientos de análisis a utilizarse: métodos estáticos (restrictivos al emplazamiento de la estructura con relación a su distancia a la falla, tipo de suelo, altura, periodo efectivo de la estructura aislada, configuración de la estructura, etc.), métodos dinámicos y entre ellos el análisis espectral (restrictivos a estructuras emplazadas en un determinado tipo de suelo); análisis de la historia de la respuesta en el tiempo (sin restricciones) y análisis utilizando espectros de diseños específicos del lugar (para suelos muy blando o con proximidad a la falla menores a 10 Km. de distancia).

El reglamento muestra algunas leyes constitutivas clásicas para aisladores de goma de bajo amortiguamiento, con núcleo de plomo y de alto amortiguamiento junto a las expresiones para evaluar la resistencia característica (Q), el módulo efectivo secante (G_{ef}), la rigidez vertical de los aisladores (K_z) y la de posfluencia (K_p). El mismo esquema se presenta para los aisladores friccionales y sistemas híbridos. (NCh 2745, 2003).

Para los análisis dinámicos define las características de los terremotos a considerar en el mismo e indica las condiciones de inspección y reemplazo de elementos que conforman el sistema de aislamiento sísmico; precisa los ensayos requeridos para el sistema de aislamiento (números de ensayos, número de ciclos y aprobación del sistema) (NCh 2745, 2003).

Los dos códigos en uso en la Provincia de Mendoza, Código de Construcciones Sismorresistente (CCSR, 1987) e INPRES – CIRSOC 103 (2013), no incluyen dentro de sus contenidos, sistemas de disipación de energía ni tampoco de aislamiento sísmico. Dicha falta pone en evidencia el retraso que manifiesta Argentina respecto a países avanzados y de otros de la región (Chile). En consecuencia es necesaria e importante una inmediata revisión de los actuales reglamentos con el objeto de contar con un marco normativo que permita desarrollar las mencionadas técnicas en las prácticas habituales de la ingeniería. Los resultados y conclusiones de la presente tesis tienen como objeto, en parte, contar con material de apoyo para utilizarlo en aspectos normativos sobre sistemas de aislamiento sísmico.

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO

3.1. Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo realizar el diseño del aislador sísmico que se trata en la tesis. Se realiza un pre diseño del aislador elastomérico y para ello se siguen los lineamientos indicados para el método estático del código de Chile (NCh2745, 2003) atento a que en Argentina todavía no cuenta con una normativa específica para el tema que trata el presente estudio. Las características de la goma, que se utilizaron en los aisladores, están en función de los compuestos utilizados en la fabricación de los mismos. Según las cantidades relativas de dichos componentes (Neopreno, Óxido de Zinc, Ácido Esteárico, Negro de humo, Dutrex, Vulcanox, Antilux, Azufre, PVI, etc.) es posible obtener diferentes características mecánicas de la goma (Araya Acle et al., 1994).

Se tuvo en cuenta las especificaciones recomendadas para que un compuesto base sea utilizado en la fabricación de aisladores sísmicos. Los valores son: Dureza: 60 +/- 10 [shore]; Tensión máxima: > 17 [MPa]; Elongación máxima: > 400 %; Amortiguamiento: > 8 %; Módulo de corte: $0,7 < G < 0,8$ [MPa] (Naeim et al., 1999; Auqui et al., 2010).

Las características geométricas de los aisladores elastoméricos a estudiar se muestran en la Figura 3.1. El prototipo está conformado por dos pletinas de acero de conexión, inferior y superior, y por un taco de goma de 200 mm de altura y 180 mm de diámetro.

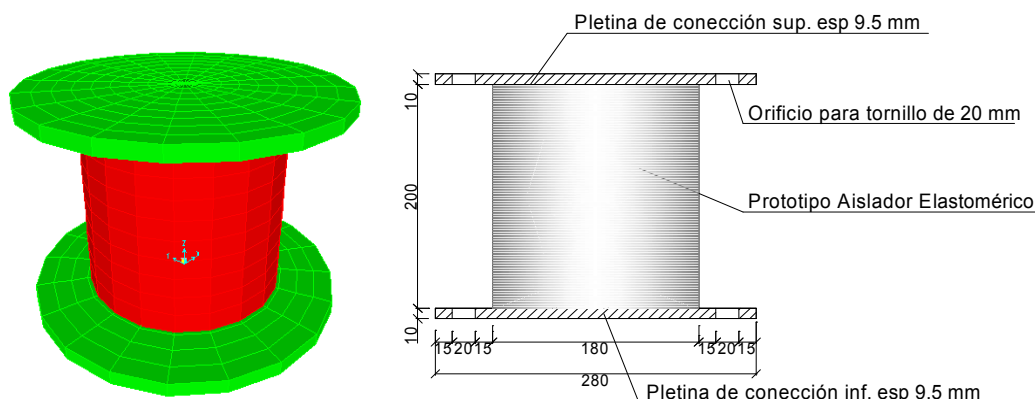


Figura 3.1. Características del aislador estudiado (Dimensiones en mm).

Los dispositivos de aislamiento estudiados poseen dos diferencias características en relación a los que habitualmente se utilizan a nivel mundial. La primera es que no poseen las planchas de acero intermedias vulcanizadas a las capas de goma, situación que le confiere las siguientes características: i) se reducen notablemente los costos de fabricación, ii) se reduce su

capacidad a carga axial y iii) se reduce la rigidez efectiva de los dispositivos. La segunda característica está centrada en el núcleo del dispositivo de aislamiento. Mientras que los dispositivos más frecuentemente utilizados a nivel mundial utilizan en algunos casos núcleos de plomo, los aisladores desarrollados en la tesis poseen un núcleo de elastómero confinado con un tubo de acero o bien con láminas de fibras (*tela cord*). Dicha característica también permite una reducción de los costos de fabricación y además plantea un desarrollo tecnológico diferente al conocido en la actualidad. En el próximo capítulo se muestran los detalles de fabricación de los prototipos.

3.2. Procedimientos para el diseño de aisladores

En el diseño de una estructura aislada se tienen como objetivos el control del esfuerzo de corte basal y la deformación máxima de los aisladores. La reducción del corte basal implica un aumento en la demanda de deformación que debe ser acomodada por los aisladores. Las variables de control son la rigidez lateral y el amortiguamiento del sistema de aislación, el cual, dependiendo del sistema utilizado, puede o no ser variado independientemente de la rigidez del sistema de aislación. En los apartados siguientes se sintetiza el proceso de diseño de distintos tipos de aisladores relacionados con el prototipo motivo del presente estudio (Gioacchini et al., 2003).

3.2.1 Aisladores elastoméricos

El diseño de aisladores elastoméricos se realiza a través de un proceso iterativo. Este proceso considera las siguientes etapas:

- 1- Escoger el período efectivo al cual se quiere llevar a la estructura T_{ef} de acuerdo con las características de los sismos en el lugar de emplazamiento de la estructura y de las condiciones locales de suelo.
- 2- Determinar la rigidez lateral efectiva del aislador $K_{ef} = \omega^2 m = (2\pi / T_{ef})^2 m$.
- 3- Estimar la demanda de deformación sobre los aisladores asumiendo un cierto nivel efectivo de amortiguamiento ε_{ef} en el sistema de aislación. Esta estimación puede hacerse en forma estática o dinámica utilizando espectros de diseño establecidos por los códigos.
- 4- Corregir el valor de ε_{ef} e iterar con el paso anterior hasta converger a la deformación de diseño δ . En aisladores de alto amortiguamiento este valor es esencialmente constante por lo que esta iteración no es necesaria o a lo más se hace una sola vez. En el inusual caso en que la deformación δ obtenida o bien los esfuerzos y deformaciones en los elementos de la

superestructura sean excesivos de acuerdo al desempeño buscado es necesario volver al punto 1 y probar otro período.

- 5- Determinar el valor del módulo de corte asociado a la deformación G (δ) calculada en el paso anterior y con ella determinar la altura de goma H_r necesaria.
- 6- Diseñar las placas intermedias de acero para resistir en forma elástica la carga vertical.
- 7- Verificar las condiciones límites de deformación, volcamiento (si corresponde a un aislador con llave de corte), y pandeo bajo condiciones de servicio y últimas.
- 8- Verificar el diseño para un conjunto de registros utilizando una representación adecuada de la curva de histéresis del aislador. En caso de existir alguna deficiencia significativa con el diseño se requiere volver al punto 4 e iterar.

3.2.2 Aisladores de goma con núcleo de plomo

Si bien no es el caso tratado en la presente tesis, se aclara, solo a título de contribuir al estado del arte que el diseño de un aislador de goma con corazón de plomo sigue pasos análogos a los indicados en el diseño de aisladores elastoméricos. La determinación del valor efectivo de rigidez y amortiguamiento se realiza típicamente a través de las siguientes expresiones:

$$K_{ef} = \frac{Q_d}{\delta} + k_d \quad 3.1$$

$$\xi_{ef} = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad 3.2$$

Donde: W_d : es la energía disipada por ciclo al nivel de deformación δ . $W_s = 1/2 K_{ef} \delta$, es la energía elástica máxima asociada a ese nivel de deformación. Q_d : Fuerza máxima para deformación cero en la constitutiva de carga – deformación (Ver Figura 2.17). δ : desplazamiento máximo. k_d : rigidez posflurncia.

Claramente entonces el proceso de diseño expuesto es iterativo ya que tanto la rigidez como el amortiguamiento dependen del nivel de deformación, el cual se desconoce a priori.

3.3. Parámetros a considerar en el diseño del aislador

Los parámetros mecánicos del aislador elastomérico dependen del valor del módulo de corte del elastómero (G) el cual, en general, se determina mediante ensayos. Para un material de comportamiento no lineal, como es la goma de alto amortiguamiento, el valor del módulo de corte tiene una incidencia importante sobre las características del aislador.

$$G50\% = 0.50 \text{ MPa} \quad G20\% = 1.10 \text{ Mpa}$$

$$\text{Dureza} = 65 \text{ [Shore]} \quad k = 0.598 \text{ [s/u]} \text{ (factor que depende de la dureza)}$$

El valor del módulo de corte que se utiliza habitualmente para el diseño corresponde al 50% (G50%) de la deformación última (Kelly, 1991). Los ensayos realizados en estudios anteriores, demuestran que a partir de dicho punto el valor del módulo de corte permanece casi constante. (Araya Acle et al., 1994)

Debido a que las estructuras a la que está dirigido el presente trabajo son de baja carga axial, la carga normal máxima estimada para el diseño del aislador es: $N_i = 62.500 \text{ N}$. Las magnitudes de las cargas dinámicas sobre cada aislador deben ser evaluadas mediante una corrida computacional de un modelo espacial en 3D utilizando un análisis de historia en el tiempo para acelerogramas de distintos terremotos.

Para el presente análisis las cargas dinámicas han sido adoptadas a partir de la carga normal estática máxima del aislador, teniendo en cuenta que para el diseño del prototipo no se analiza una construcción en particular si no genérica. Estas son: carga normal dinámica máxima impuesta sobre cada aislador: $N_{i-m\acute{a}x} = 90.000 \text{ N}$ y carga normal dinámica mínima impuesta sobre cada aislador: $N_{i-m\acute{i}n} = 30.000 \text{ N}$. Es decir que se supone la no presencia de fuerzas de tracción sobre el dispositivo de aislamiento sísmico.

La técnica del aislamiento sísmico utiliza básicamente dos estrategias fundamentales para reducir las demandas sísmicas sobre las estructuras ubicadas por encima de ellas: aumentar el periodo y el amortiguamiento. Con relación al valor del periodo no existe un valor óptimo del mismo sobre todo porque valores altos implicarían importantes desplazamientos del sistema de aislamiento lo cual redundaría en dimensiones a veces no admisibles para el proyecto, por el contrario, con valores bajos de periodo no es posible satisfacer las estrategias que plantea la técnica del aislamiento. Estos desplazamientos pueden ser controlados si se introduce un amortiguamiento adicional al sistema de aislamiento.

Un criterio aceptado dentro de la especialidad es trabajar con valores de periodos que estén alejados de los plafones de máximas aceleraciones de los terremotos que pueden esperarse en una región. (Tornello, 2007). Debido a que el diseño de un sistema de aislamiento conformado por aisladores elastoméricos requiere un proceso iterativo en el cual también se valora el periodo del conjunto aislado, es posible asumir, para iniciar dicho proceso iterativo, un valor inicial de 2,00 s.

3.4. Rigidez lateral requerida

Del valor del periodo buscado para el conjunto aislado es posible determinar la rigidez lateral del sistema de aislamiento. Para ello se supone un sistema de aislamiento compuesto por 8 aisladores con un peso de la construcción (W_e) de 500.000 N (62.500 N x 8), situación que corresponde aproximadamente a una vivienda de un nivel, y un período objetivo de 2,00 s:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W_e}{K_{\min} g}} \Rightarrow K = \left(\frac{2\pi}{T_i}\right)^2 \frac{W_e}{g} \quad 3.3$$

$$K = \left(\frac{2\pi}{2s}\right)^2 \frac{500.000 N}{9.810 mm/s^2} = 594,75 \frac{N}{mm}$$

Por lo tanto la rigidez lateral máxima de un aislador será:

$$K_i = \frac{594,75 N/mm}{8} = 74,34 \frac{N}{mm}$$

3.5. Dimensionamiento del aislador

Para determinar las dimensiones del aislador se utilizan las siguientes ecuaciones (3.4) y (3.5):

$$\sigma_c = \frac{N}{\frac{\pi * D^2}{4}} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 * N}{\pi * \sigma_c}} \quad 3.4$$

$$k_h = G * \frac{A}{H_g} = 0,5 MPa * \frac{25.400 mm^2}{200 mm} = 63,50 N/mm \quad 3.5$$

Donde:

N : carga actuante sobre el aislador (62.500 N)

G : módulo de elasticidad transversal del aislador (0,5 MPa).

A : área de la sección transversal del aislador (mm²).

H_g : altura del aislador (mm).

σ_c : Tensión de compresión de la goma del aislador (6 MPa).

K_h : rigidez horizontal del aislador (N/mm).

Se adopta: $D = 180$ mm

Por lo tanto el área de la sección transversal será: $A = 25.400$ mm²

Se adopta una altura para el aislador de: $H_g = 200$ mm

La rigidez horizontal del aislador será: $K_h = 63,50$ N/mm

La rigidez horizontal total que aportan 8 aisladores de estas dimensiones será:

$$K_{h(total)} = 8 * 63,50 \text{ N/mm} = 508,00 \text{ N/mm}$$

Considerando a la estructura aislada como un sistema de un grado de libertad traslacional, el período fundamental de vibración de la estructura aislada aproximado será:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W_e}{K_{h(total)} g}} = 2\pi \sqrt{\frac{500.000 \text{ N}}{508 \text{ N/mm} \cdot 9.810 \text{ mm/s}^2}} = 1,99 \text{ s} \cong 2 \text{ s}$$

3.6. Estimación del desplazamiento de diseño

El código NCh2745 define el desplazamiento de diseño D_D con la expresión siguiente (3.6):

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} = 182,5 \text{ mm.} \quad 3.6$$

$C_D = 200 * Z$ (mm) (Valor para suelo tipo I y $T_D > 2$ s)

$Z = 1,25$ (Para zona de mayor riesgo sísmico)

$B_D = 1,37$ (Para amortiguamiento efectivos del $\beta_D = 10\%$. Según Tabla 2 de la NCh2745)

El desplazamiento máximo viene dado por la ecuación (3.7):

$$D_M = \frac{C_M}{B_M} = 219 \text{ mm} \quad 3.7$$

$C_M = 200 * M_M * Z$ (mm) (Valor para suelo tipo I y $T_D > 2$ s)

$M_M = 1,20$ $Z = 1,25$ (Para zona de mayor riesgo sísmico)

$B_M = 1,37$ (Para amortiguamiento efectivos del $\beta_D = 10\%$. Según Tabla 2 de la NCh2745)

El coeficiente de reducción por amortiguamiento utilizado B_D se ha determinado a partir de las razones entre valores espectrales calculados para registros compatibles chilenos y distintos niveles de la razón de amortiguamiento.

Los valores de desplazamientos evaluados con la (D_D) y (D_M) deben incrementarse debido a la torsión natural y accidental del sistema de aislamiento. En la presente etapa de diseño es suficiente evaluarlos con las siguientes expresiones (3.8) y (3.9):

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y_i \frac{12e}{a_i^2 + b_i^2} \right] \quad 3.8$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y_i \frac{12e}{a_i^2 + b_i^2} \right] \quad 3.9$$

Para el presente estudio y atento a que los dispositivos objeto de la presente tesis pueden ser utilizados en estructuras con destinos diversos que aporten niveles bajos de carga axial sobre los aisladores, se supondrá que la planta de la estructura a aislar posee las siguientes dimensiones horizontales a_i y b_i , donde x_i y y_i son las coordenadas del centro de masas para un sistema de ejes cartesianos con origen en el vértice inferior izquierdo:

$$a_i = 10,0 \text{ mm} \quad b_i = 10,0 \quad x_i = 5,0 \text{ mm} \quad y_i = 5,000 \text{ mm}$$

Nótese que en el capítulo donde se estudian las respuestas de viviendas de interés social, habitualmente construidas en la región, las longitudes de las plantas de dichas viviendas son menores a las que se suponen en el presente estudio por lo tanto los resultados que se obtienen en este apartado resultan ser conservadores.

El valor de la excentricidad e (ecuaciones 3.8 y 3.9) es la distancia medida en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento (e_s), más la excentricidad accidental, igual a un 5% de la dimensión máxima de la planta medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica considerada.

$$e_{(a)} = e_s + 0,05 * 10,0 \text{ mm} = 500 \text{ mm}$$

$$e_{(b)} = e_s + 0,05 * 10,0 \text{ mm} = 500 \text{ mm}$$

El valor e_s se admite nulo suponiendo una simetría en la disposición del sistema de aislamiento y una simetría de la superestructura. Es habitual en la disposición de los dispositivos de aislamiento que se utilice el criterio de no provocar excentricidades adicionales atribuibles al sistema de aislamiento por una distribución asimétrica de los mismos en planta.

Finalmente el factor de amplificación de los desplazamientos en cada una de las direcciones principales del edificio resulta:

$$[X] = 1,15 \quad [Y] = 1,15$$

Por lo tanto los valores totales de desplazamientos, para la situación más desfavorable, de hecho conservador por lo explicado en los párrafos precedentes, resultan:

$$D_{TD} = 182,5 \text{ mm} * 1,15 = 210 \text{ mm}$$

$$D_{TM} = 219,0 \text{ mm} * 1,15 = 250 \text{ mm}$$

3.7. Rigidez vertical del aislador

La rigidez vertical del aislador puede determinarse por la ecuación (3.10):

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad 3.10$$

Donde: $E_c = (f_1 + f_2) E$

E (Módulo de compresión confinado) = Módulo de elasticidad longitudinal de la goma valor que se toma igual a: $E = 5,90 \text{ MPa}$ (Fuente: Table 2: Physical constants of Vulcanised natural rubber, Wood, et al., 1964)

Los valores de f_1 y f_2 , se obtienen de tabla para aisladores circulares (Gent et al, 1970):

$$f_1 = 1 \quad f_2 = \frac{r^2}{2 * t_r^2} = \frac{D^2}{4 * 2 * t_r^2} = \frac{D^2}{8 * t_r^2} = 2 * \frac{D^2}{16 * t_r^2} = 2 * s^2$$

Donde s es el factor de forma para un aislador de goma multicapas y se define como la razón entre el área de la cara cargada y el área libre de pandeo.

$$s = \frac{\text{Area Cargada}}{\text{Area Libre para Deformar}} = \frac{\pi * D^2}{4 * \pi * D * t_r} = \frac{D}{4 * t_r} = \frac{180 \text{ mm}}{4 * 200 \text{ mm}} = 0,225$$

Diámetro del aislador: $D = 180 \text{ mm}$.

Espesor placas de goma: $t_r = 200 \text{ mm}$ (para nuestro caso es una sola placa de goma)

$$E_c = (1 + 2 * 0,225^2) 5,90 \text{ MPa} = 6,49 \text{ MPa}$$

Si se reemplaza los valores encontrados en la ecuación la rigidez vertical resulta:

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} = \frac{6,49 \text{ Mpa} * 25.400 \text{ mm}^2}{200 \text{ mm}} = 824,23 \text{ MPa}$$

Los valores de tensiones en el aislador se determinan con la teoría elástica, teniendo en cuenta los valores a cargas normales estáticas y dinámicas mencionadas precedentemente:

Carga normal estática máxima impuesta sobre cada aislador: $N_i = 62.500 \text{ N}$

Carga normal dinámica máxima impuesta sobre cada aislador: $N_{i-máx.} = 90.000 \text{ N}$

Carga normal dinámica mínima impuesta sobre cada aislador: $N_{i-min} = 30.000 \text{ N}$

$$\sigma_{c(est)} = \frac{62.500 N}{25.400 mm^2} = 2,46 MPa \quad \varepsilon_{c(est)} = \frac{2,46 MPa}{6,49 MPa} = 0,37$$

$$\sigma_{c(din)} = \frac{90.000 N}{25.4000 mm^2} = 3,54 MPa \quad \varepsilon_{c(din)} = \frac{3,54 MPa}{6,49 MPa} = 0,54$$

3.8. Verificación de las deformaciones límites

La verificación de las deformaciones límites se realiza mediante la ecuación (3.11):

$$(\gamma_c)_o + (\gamma_s)_o + (\gamma_b)_o \leq f * \varepsilon_u \quad 3.11$$

Donde: $(\gamma_c)_o$ = Distorsión angular máxima asociada a la compresión

$(\gamma_s)_o$ = Distorsión angular máxima asociada al corte

$(\gamma_b)_o$ = Distorsión angular máxima asociada a la flexión

En cuanto a los valores de $f \Rightarrow f = 1/3$ Para estado de servicio

$f = 1/2$ Para el terremoto de diseño

$f = 9/10$ Para terremoto máximo esperado

Para las deformaciones últimas se aceptan valores entre 5 y 6 (500 y 600 %, respecto de la relación D/t_r). En el presente estudio se supone un valor de $\varepsilon_u = 6,00$ (600%). Por lo tanto los valores límites quedan (UBC, 1997):

En estado de servicio $\Rightarrow f = 1/3 * 6,00 = 2,00$ (200 %)

Para el terremoto de diseño $\Rightarrow f = 1/2 * 6,00 = 3,00$ (300 %)

Para el terremoto máximo esperado $\Rightarrow f = 9/10 * 6,00 = 5,40$ (540 %)

Se determinan los valores de distorsiones máximas que indica la ecuación (3.11).

3.8.1. Distorsión angular máxima asociada a la compresión

El valor correspondiente a dicho esfuerzo se determina con la expresión (3.12).

$$(\gamma_c)_o = 6 * \varepsilon_c * s = 6 * \varepsilon_c * \frac{D}{4 * t_r} = \frac{3 * \varepsilon_c * D}{2 * t_r} \quad 3.12$$

$$(\gamma_c)_{o(est)} = \frac{3 * 0,37 * 180 mm}{2 * 200 mm} = 0,499$$

$$(\gamma_c)_{o(din)} = \frac{3 * 0,54 * 180 mm}{2 * 200 mm} = 0,729$$

3.8.2. Distorsión angular máxima asociada al corte

El valor correspondiente a corte se determina con la expresión (3.13) y (3.14). Se verifican dos situaciones:

Para el terremoto de diseño:

$$(\gamma_s)_o = \frac{D_D}{H_r} = \frac{182,5mm}{200mm} = 0,91$$

3.13

Para el terremoto máximo esperado:

$$(\gamma_s)_o = \frac{D_M}{H_r} = \frac{219mm}{200mm} = 1,09 \quad 3.14$$

Donde H_r es la altura total de las láminas de goma, para nuestro caso $H_r = H_g$

La distorsión angular máxima debido a flexión es nula debido a que la superestructura no transfiere momentos flectores al sistema de aislamiento. En consecuencia el control de deformación, para las dos situaciones verificadas resulta:

Para el terremoto de diseño:

$$(\gamma_c)_o + (\gamma_s)_o + (\gamma_b)_o = 0,499 + 0,91 = 1,41 = 141 \% < 300 \%$$

Para el terremoto máximo esperado:

$$(\gamma_c)_o + (\gamma_s)_o + (\gamma_b)_o = 0,729 + 1,09 = 1,81 = 181 \% < 540 \%$$

3.8.3. Incremento de desplazamiento por torsión

El desplazamiento adicional por torsión se evalúa con las expresiones ya vistas 3.8 y 3.9:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y_i \frac{12e}{a_i^2 + b_i^2} \right]$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y_i \frac{12e}{a_i^2 + b_i^2} \right]$$

Los valores ya fueron desarrollados en apartados anteriores. Los mismos son:

$$a_i = 10,0 \text{ mm} \quad b_i = 10,0 \text{ mm} \quad x_i = 5,0 \text{ m} \quad y_i = 5,0 \text{ m}$$

$$e_{(a)} = e_s + 0,05 * 10,0mm = 500 \text{ mm}$$

$$e_{(b)} = e_s + 0,05 * 10,0 \text{ mm} = 500 \text{ mm}$$

El valor e_s se admite nulo dada la simetría en la disposición del sistema de aislamiento y la simetría de la superestructura. Por lo tanto el factor de amplificación de los desplazamientos en cada una de las direcciones principales del edificio resulta:

$$[X] = 1,15 \quad [Y] = 1,15$$

Por lo tanto los valores totales de desplazamientos, para la situación más desfavorable, resultan:

$$D_{TD} = 182,5 \text{ mm} * 1,15 = 210 \text{ mm}$$

$$D_{TM} = 219,0 \text{ mm} * 1,15 = 250 \text{ mm}$$

Los valores de desplazamientos obtenidos se consideran adecuados para las dimensiones de la planta de la vivienda adoptada y las dimensiones de los dispositivos de aislamiento propuestos, sin embargo estos valores serán verificados en apartado siguiente.

3.9. Verificación del aislador al vuelco

Para realizar esta verificación se sigue el procedimiento de la Referencia (Naeim, et al, 1999). En el proceso de verificación se admite un comportamiento lineal del aislador elastomérico.

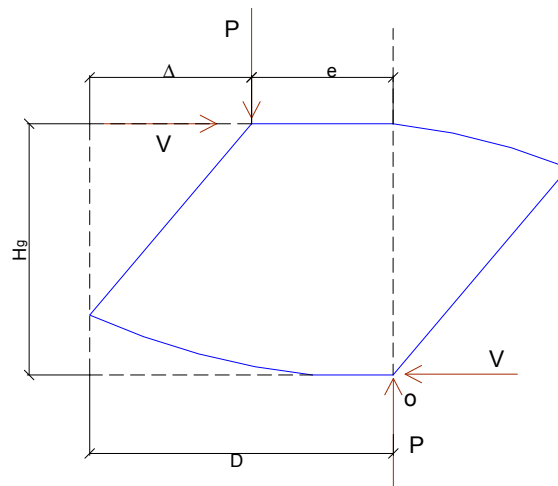


Figura 3.2. Desplazamiento lateral y acciones sobre el aislador.

La situación límite se produce cuando no es posible un incremento mayor que el valor Δ , en ese momento la carga P se encontrará aplicada en el borde del aislador, instante en el cual se produce el vuelco. El momento producido por los cortes actuando sobre el aislador debe ser resistido por un desplazamiento de la fuerza axial entre las caras superior e inferior del aislador. Si se admite un aislador con comportamiento lineal dicho equilibrio se expresa en la ecuación (3.15).

$$P * e = V * H_g \quad 3.15$$

$$e_{\text{lim}} = D - \Delta \quad \text{y} \quad V = K_h * \Delta$$

Si se reemplaza valores:

$$P(D - \Delta) = K_h * \Delta * H_g$$

Si se trabaja con la última ecuación es posible encontrar una expresión para la capacidad de desplazamiento lateral del aislador (3.16). Se verifican las dos situaciones posibles, carga normal estática y carga normal dinámica máxima.

$$\Delta = \frac{P * D}{K_h * H_g + P} \quad 3.16$$

Para carga normal estática $P = 62.500 \text{ N}$:

$$\Delta = \frac{62.500 \text{ N} * 180 \text{ mm}}{63,5 \text{ N/mm} * 200 \text{ mm} + 62.500} = 149,6 \text{ mm}$$

$$D_{TD} (\text{esperado}) = 210 \text{ mm} > \Delta = 149,6 \text{ mm} \Rightarrow \mathbf{D_{TD} = 149,6 \text{ mm}}$$

Para carga normal dinámica máxima $P = 90.000 \text{ N}$:

$$\Delta = \frac{90.000 \text{ N} * 180 \text{ mm}}{63,5 \text{ N/mm} * 200 \text{ mm} + 90.000} = 157,7 \text{ mm}$$

$$D_{TM} (\text{esperado}) = 250 \text{ mm} > \Delta = 157,7 \text{ mm} \Rightarrow \mathbf{D_{TM} = 157,7 \text{ mm}}$$

Las condiciones geométricas de los dispositivos no verifican los desplazamientos impuestos por las acciones sísmicas de la normativa de aplicación. En tal sentido es posible aplicar algunas de las siguientes medidas correctivas: i) modificar las dimensiones geométricas de los dispositivos con el objeto de aumentar su capacidad de desplazamiento lateral, ii) disponer en obra de controladores de desplazamiento lateral del sistema aislado que limiten el desplazamiento total a los valores de Δ .

En función de los resultados obtenidos en el presente análisis preliminar de las dimensiones del aislador y los objetivos del trabajo, se adoptan las dimensiones de los prototipos mencionadas y eventualmente de ser necesario se dispondrá de controladores de desplazamientos lateral para sus aplicaciones concretas.

3.10. Verificación del aislador al pandeo

Frente a acciones sísmicas, en el aislador predomina la deformación por corte, por lo tanto, el dispositivo de aislamiento es susceptible que en estado deformado sufra efectos de pandeo. Por otro lado la misma deformación provoca una reducción del área efectiva que resiste la carga normal situación que también debe verificarse.

La verificación al pandeo puede realizarse mediante la expresión 3.17 o 3.18 (Naeim et al, 1999).

$$P_{cr} = \frac{R}{2} \left[\left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{R}} \right) - 1 \right] \quad 3.17$$

$$\text{Cuando } P \gg R \Rightarrow P_{cr} = \sqrt{P_E * R} \quad 3.18$$

Donde:

$$R = K_h * H_g \quad (\text{Resistencia lateral unitaria del aislador})$$

$$R = 63,5 \text{ N/mm} * 200 \text{ mm} = 12.700 \text{ N}$$

$$P_E = \frac{\pi^2 T_\theta}{H_g^2} \quad (\text{Carga euleriana del aislador})$$

$$T_\theta = K_\theta * H_r \quad (\text{Rigidez flexional unitaria del aislador})$$

$$K_\theta = E_b * \frac{I}{H_r}$$

Si se compara el módulo efectivo a flexión E_b , con el módulo de compresión E_c , se puede deducir que $E_c \cong 3 E_b$. Por lo tanto:

$$E_b = \frac{E_c}{3} = \frac{6,49 \text{ MPa}}{3} = 2,16 \text{ MPa}$$

$$\text{El momento de inercia del aislador: } I = \frac{\pi D^4}{64} = 51.529.900 \text{ mm}^4$$

$$K_\theta = E_b * \frac{I}{H_r} = 2,16 \text{ MPa} * \frac{51.529.900 \text{ mm}^4}{200 \text{ mm}} = 557.812 \text{ Nmm}$$

$$T_\theta = K_\theta * H_r = 557.812 \text{ Nmm} * 200 \text{ mm} = 111.562.400 \text{ Nmm}^2$$

$$P_E = \frac{\pi^2 T_\theta}{H_g^2} = \frac{\pi^2 111.562.400 Nmm^2}{200^2 mm^2} = 27.527 N$$

Si se reemplaza en la ecuación 3.17:

$$P_{cr} = \frac{R}{2} \left[\left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{R}} \right) - 1 \right] = \frac{12.700 N}{2} \left[\left(\sqrt{1 + 4 \frac{27.527 N}{12.700 N}} \right) - 1 \right] = 13.396,3 N$$

$$P_{cr} = 13.396,3 N$$

Si se utiliza la ecuación 3.18, se obtienen valores similares de la carga crítica.

$$P_{cr} = \sqrt{P_E * R} = \sqrt{27.527 N * 12.700 N} = 18.697 N$$

La ecuación (3.18) es de uso habitual en la práctica, sin embargo la misma no considera la reducción de la capacidad del aislador debido a las deformaciones laterales del mismo cuando está solicitado a compresión. Este efecto se considera en forma aproximada modificando el valor final de la carga crítica. Para ello se multiplica la misma por un factor que tiene en cuenta el área efectiva en compresión y el área total de la sección del aislador (Figura 3.3).

Por lo tanto la carga crítica efectiva puede determinarse con la ecuación 3.19. (Naeim et al., 1999).

$$P_{cr} (eff) = P_{cr} * \frac{A_{eff}}{A}$$

3.19

Para la determinación del área efectiva se utilizan parámetros definidos por (Naeim et al., 1999). Que se pueden observar en la Tabla 3.1.

Para ello se define:

$$d = \frac{D}{2r} \qquad a = \frac{A_{eff}}{\pi r^2}$$

Donde:

d = Parámetro para ingresar en la tabla.

D = Desplazamiento para el cual se verifica.

r = Radio del aislador.

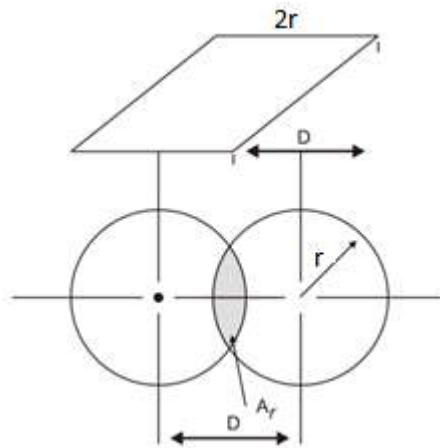


Figura 3.3. Reducción del área transversal del aislador en compresión.

Tabla 3.1. Coeficientes de reducción.

$d = D / 2R$	a
0.10	0.873
0.20	0.747
0.30	0.624
0.40	0.505
0.50	0.391
0.60	0.285
0.70	0.188
0.80	0.1044
0.85	0.0683
0.90	0.0374
0.95	0.0136

Se verifica para capacidad de desplazamiento lateral del aislador $D = 100 \text{ mm}$.

$$d = \frac{100 \text{ mm}}{2 * 90 \text{ mm}} \cong 0,50 \Rightarrow a = 0,391$$

$$A_{eff} = a \pi r^2 = 9.950 \text{ mm}^2$$

$$P_{cr}(eff) = P_{cr} * \frac{A_{eff}}{A} = 18917 \text{ Nt} \frac{9.950 \text{ mm}^2}{25.400 \text{ mm}^2} = 7.396 \text{ N}$$

Si se tiene en cuenta la carga normal estática máxima sobre el aislador ($N_{est}=62.500\text{N}$) y la carga dinámica máxima sobre el mismo ($N_{din}=90.000\text{N}$), como las dos situaciones más desfavorables, se observa que la carga crítica obtenida es menor por lo que el diámetro del aislador no es adecuado para un desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de 100 mm.

Cabe aclarar que estas verificaciones se han realizado para los prototipos de goma sin ningún tipo de placas de acero de refuerzo (como son fabricados los dispositivos elastoméricos tradicionales). Las futuras investigaciones deberán orientarse en mejorar las características geométricas y mecánicas del aislador para optimizar los parámetros de diseño y respuesta de los mismos, principalmente los relacionados con la carga crítica. Los valores encontrados de rigidez lateral y vertical, desplazamientos y deformaciones laterales, son aceptables para las dimensiones propuestas del dispositivo (diámetro de 180 mm y la altura de 200 mm).

3.11. Recomendaciones para la modelación

Distintas metodologías de distintos grados de complejidad pueden ser utilizadas para modelar la respuesta de estructuras aisladas, desde modelos simplificados hasta modelos tridimensionales no-lineales del edificio completo. El nivel de sofisticación del modelo debe ser coherente con el grado de complejidad de la estructura. En general, superestructuras flexibles, irregulares en planta y altura requerirán de modelos más sofisticados. (NCh2745, 2003)

El modelo estructural del sistema de aislación y de la superestructura cumple dos funciones primordiales:

- 1- Cálculo de la respuesta y diseño de la superestructura para el terremoto de diseño.
- 2- Cálculo de la demanda de desplazamientos y verificación de la estabilidad del sistema de aislación para el terremoto máximo posible.

3.11.1. Modelo del sistema de aislación

El modelo estructural del sistema de aislación debe ser capaz de representar efectos de la respuesta tridimensional del sistema, como por ejemplo la torsión en planta, la correcta distribución de cargas verticales en los aisladores, interacción bidireccional, e interacción lateral-vertical (aislador de péndulo friccional). Además el análisis del modelo estructural debe considerar la variabilidad de las propiedades de los aisladores, debe considerar la mayor rigidez del sistema de aislación en la determinación de las fuerzas de diseño de la superestructura y la menor rigidez posible en la determinación de la deformación del sistema de aislación.

Si el sistema de aislación permite el levantamiento de la estructura, el modelo debe ser capaz de representar este levantamiento y el impacto en el contacto entre estructura y dispositivo. El levantamiento es un fenómeno no-lineal y requiere modelación explícita (aunque ocurre en

estructuras aisladas como no aisladas), por ejemplo, a través de un elemento tipo "gap" que impone cero fuerza en el momento de levantamiento libre de la estructura. La importancia de que el modelo del aislador permita el levantamiento en caso de ocurrir, es determinar en forma adecuada la redistribución de esfuerzos y deformaciones que ocurre en la estructura una vez que el vínculo del aislador desaparece.

Otro aspecto importante es la consideración del efecto $P-\Delta$ a través del aislador. Este efecto crea un momento significativo sobre la estructura bajo y sobre el aislador. Dependiendo del sistema de anclaje del dispositivo, este momento puede variar entre P veces $\Delta/2$ y P veces Δ , donde P es la carga axial sobre el aislador y Δ su desplazamiento. Este momento es en adición al momento flector debido al corte a través del aislador. (NCh2745, 2003)

3.11.2. Modelación de aisladores

Uno de los objetivos primordiales del modelo estructural debe ser acotar las posibles variaciones observadas en las propiedades mecánicas de los aisladores como resultado de variaciones de la carga vertical, la velocidad de carga, movimiento bidireccional, temperatura, y envejecimiento del aislador. (NCh2745, 2003)

Modelos lineales: El sistema de aislación puede ser representado por un modelo lineal equivalente. Las propiedades de este modelo son la rigidez secante del aislador (o también confusamente denominada como efectiva), k_{ef} (ecuación 3.20), (NCh2745, 2003).

$$k_{ef} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad 3.20$$

Y la razón de amortiguamiento lineal viscoso equivalente β_{ef} se determina con la ecuación 3.21, (NCh2745, 2003):

$$\beta_{ef} = \frac{W_d}{4\pi W_s} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{di}}{K_{sec} D^2} \right] \quad 3.21$$

Donde $\sum E_{di}$ es la suma de las energías disipadas por todos los aisladores en un ciclo y K_{sec} es la rigidez secante de todos los aisladores del sistema de aislación. Todas las cantidades se determinan en base a ciclos de amplitud máxima D .

Los modelos lineales equivalentes se deben utilizar sólo en el diseño de aisladores elastoméricos cuyas propiedades no son altamente dependientes de la carga axial. En el caso de aisladores friccionales se recomienda adicionalmente verificar el diseño de estos

dispositivos mediante un análisis no lineal de historia de respuesta del sistema usando por ejemplo una herramienta como SAP2000, ETABS, etc.

Modelos no-lineales: Para evaluar la respuesta no-lineal de la estructura con aisladores sísmicos se requiere utilizar un modelo que sea representativo de la ley constitutiva no-lineal del dispositivo. De acuerdo con lo descrito anteriormente, este modelo es esencialmente independiente de la velocidad de deformación en el caso de aisladores elastoméricos, pero dependiente de ella en el caso de aisladores friccionales (Bozzo, 2000).

Debido a que la respuesta dinámica de la estructura completa queda controlada por el comportamiento del sistema de aislación, es admisible que el modelo utilizado durante el diseño del sistema de aislación sea simple e ignore por ejemplo la flexibilidad de la superestructura. Esto permite ahorrar gran tiempo en el cálculo de las historias de respuesta y conduce por lo general a resultados muy precisos. Sin embargo una vez concluido el proceso de diseño es recomendable verificar, con un modelo no-lineal de los aisladores y tridimensional de la superestructura, el comportamiento del sistema completo para un conjunto de sismos esperados en la zona de emplazamiento.

El hecho de que la no-linealidad del sistema se localice en el sistema de aislación, conduce a que los análisis no-lineales descritos sean de bajo costo computacional en relación a lo que sería un análisis no-lineal de una estructura convencional. Además, la interpretación de las respuestas medidas durante sismos en estructuras aisladas muestra que es posible predecir con gran nivel de precisión (error menor al 10%) el verdadero comportamiento no-lineal de estas estructuras (NCh2745, 2003).

Modelo de la superestructura: En general, la superestructura debe ser modelada con igual detalle que para un edificio convencional, sin embargo, es un hecho que la incertidumbre en la respuesta del modelo de la superestructura se reduce gracias al sistema de aislación. El nivel de detalle del modelo de la superestructura debe ser tal que permita evaluar correctamente la distribución de esfuerzos y deformaciones en sus elementos.

Es importante recordar que la superestructura será diseñada para permanecer elástica esencialmente y por lo tanto su rigidez y resistencia deben ser consistentes con este comportamiento. De no ser así, se perdería el gran beneficio del sistema de aislación en cuanto al control del daño de la estructura y sus contenidos. Se define que la superestructura permanece esencialmente elástica durante el sismo si el requerimiento nominal de ductilidad sobre las componentes del sistema de resistencia lateral del edificio es pequeño ($R = 2$). Este

requerimiento de ductilidad no impide que algún elemento entre en el rango inelástico, sin embargo, el sistema resistente lateral de la estructura como un todo no cambia su característica apreciablemente. (NCh2745, 2003)

Procedimiento de análisis: Es posible utilizar modelos lineales o no-lineales para el análisis de estructuras aisladas sísmicamente. El análisis estático con modelos lineales establece valores mínimos del desplazamiento de diseño para el sistema de aislación y puede ser utilizado en una clase muy limitada de estructuras. Este procedimiento es recomendado para un diseño preliminar de la estructura y provee un mecanismo de verificación simple de modelos más sofisticados.

El análisis de respuesta espectral es recomendado para estructuras que tienen:

- Superestructura flexible.
- Superestructura de planta irregular.
- Aisladores con una relación constitutiva fuerza-deformación que puede ser adecuadamente representada por un modelo lineal equivalente.

La mayor ventaja de un análisis de respuesta espectral con superestructura flexible es que permite calcular en forma simple la distribución de fuerzas y deformaciones en los elementos.

Los procedimientos de análisis no lineal incluyen en general Análisis Estático No-lineal (AENL), también conocido como *pushover*, y Análisis Dinámico No-lineal (ADNL) o de respuesta en el tiempo. El modelo no-lineal incluye a los aisladores y puede incluir o no a la superestructura dependiendo de su importancia, sin embargo, es relevante insistir en que el objetivo de la aislación sísmica es que la no-linealidad de la superestructura sea pequeña.

El análisis no-lineal de respuesta en el tiempo se debe utilizar en los siguientes casos:

- Sistemas con una razón de amortiguamiento modal mayor a un 30%.
- Sistemas sin capacidad autocentrantes.
- Sistemas cuya deformación se espera excedan la distancia disponible de separación con estructuras adyacentes.
- Sistemas que son dependientes de la velocidad de deformación.
- Sistemas que experimentan levantamiento e impacto.

En el ADNL, la superestructura puede ser modelada como lineal, siempre que se demuestre que su respuesta se mantiene en el rango elástico durante el SMP (NCh2745, 2003).

CAPÍTULO IV: FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO

En el presente capítulo se realiza una descripción de las características principales de los materiales componentes de un aislador elastomérico. Se detalla el compuesto de goma elegido para los prototipos que se fabrican al objeto de la tesis. También se describen los ensayos realizados a los compuestos de goma, y finalmente se desarrolla el proceso de fabricación de los prototipos de aisladores sísmicos en función de las dimensiones descritas en el capítulo anterior.

4.1. Características principales de los materiales componentes de un aislador elastomérico

Los cauchos son sustancias pertenecientes a la clase de polímeros altos, tal como lo son la celulosa, la seda, las resinas, y los plásticos, y su característica es la gran longitud de las cadenas moleculares. La fórmula química de la goma natural es $(C_5H_8)_n$ donde n es aproximadamente 10000, y C_5H_8 es el monómero conocido como isopreno. El látex es la sustancia natural que da origen a la goma y se encuentra bajo la corteza de ciertos árboles que son cultivados en varios países tropicales, principalmente Malasia. Este látex se coagula y procesa en bloques, láminas, y suelas para su exportación. La goma cruda es de poco uso debido a que fluye en forma irrecuperable bajo carga, se cristaliza a temperaturas bajo cero, y se transforma en una sustancia pegajosa y blanda a altas temperaturas. Para que la goma pueda utilizarse en la práctica tiene que ser sometida a un proceso de vulcanización.

La palabra “elastómero” abarca materiales que pueden ser identificados por sus propiedades, tales como la capacidad de sufrir grandes deformaciones y recuperarse casi por completo, liberándose rápidamente las fuerzas que provocan la deformación. La propiedad de alta elasticidad no es característica de una sustancia química particular, pero deriva de una estructura molecular especial.

Las características químicas para que un material sea un elastómero, son las siguientes:

- Las moléculas deben ser muy largas y capaces de rotar libremente en torno a las uniones de los bordes de las unidades moleculares.
- Las moléculas deben estar unidas por una cantidad de enlaces, formando una malla tridimensional, ya sea por uniones químicas o por enrejados mecánicos.
- Las moléculas deben ser capaces de moverse fácilmente de un lado a otro, en otras palabras las atracciones intermoleculares deben ser pequeñas.

La goma es un material muy versátil y adaptable. Las propiedades físicas tales como elongación, tracción, módulo de corte y amortiguamiento, pueden ser mejoradas en un amplio rango mediante aditivos, niveles de vulcanización, cantidades de reforzante o “carga” y agentes de protección.

4.2. Propiedades físicas de la goma

Las propiedades físicas de la goma, son especialmente de interés para los objetivos de la tesis, en particular su módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, resistencia, relación tensión-deformación específica, amortiguamiento, fluencia y relajación, dureza, resistencia a la temperatura y durabilidad. Para pequeñas deformaciones la relación constitutiva fuerza-deformación de la goma es aproximadamente lineal, para este rango los valores del módulo de Young E , y módulo de corte G se presentan en la Tabla 4.1 y son similares en tracción y compresión.

El módulo de corte está aproximadamente entre un tercio y un cuarto del módulo de Young E . El módulo de corte G de la goma decrece a medida que la deformación aumenta hasta valores menores a 200%. Para valores mayores de deformación la rigidez de la goma aumenta nuevamente debido a un proceso de cristalización por deformación, en el cual los cristales se alinean con la dirección de deformación. Ésta cristalización se debe a la alta resistencia a la tracción σ de la goma que oscila entre 14 y 28 MPa. La resistencia en compresión de la goma puede superar los 160 MPa. La goma es un material esencialmente incompresible con un módulo de Poisson $\nu=0,4997$ y su módulo de compresibilidad volumétrica varía entre 1.000 y 2.000 MPa. Esto implica que la goma esencialmente no cambia de volumen cuando es sometida a deformación.

La dureza es el parámetro que se utiliza para caracterizar una goma. La misma se mide a través de la deformación elástica que un aparato estándar produce bajo una carga conocida. Por lo tanto está directamente relacionada con el módulo de Young. Los valores entregados en grados de la escala Internacional Rubber Hardness ($HDRB$) varían típicamente entre 35 y 75.

La histéresis de un compuesto de goma aumenta con el incremento de las cargas. Para deformaciones grandes (600%) los ciclos de histéresis son mucho mayores como resultado de la cristalización por deformación que ocurre. Sin embargo, la repetición rápida de estos ciclos a gran deformación genera una cantidad importante de energía histerética que se disipa como calor. El consecuente aumento en temperatura puede resultar en degradación de la goma y por

lo tanto se ha preferido usar en diversas aplicaciones gomas con baja histéresis, lo que implica valores de amortiguamiento bajo (Erman et al., 2013)

Tabla 4.1. Constantes físicas características de la goma natural.

		Goma s/refuerzo	Goma c/refuerzo	Acero
HDRB	Unidades	45	65	100
σ_t	MPa	28	21	420
E	MPa	1,9	5,9	210.000
G	MPa	0,54	1,37	81.000
ν		0,4997	0,4997	0,29
Resiliencia	%	80	60	100

Se aclara que las características que se indican en la columna “Goma s/refuerzo” corresponden solo al material goma, mientras que las descritas en la columna “Goma c/refuerzo” corresponden a un material compuesto por láminas de goma y láminas de acero.

El módulo de corte G de la goma es alterado por la rotura de la estructura de la goma. Esto ocurre durante los primeros ciclos de carga, especialmente en gomas con cargas de refuerzo, donde la estructura del negro de humo se rompe de manera que, en ciclos posteriores, la goma es más blanda. Lo sustancial de este proceso se produce dentro de los primeros ciclos de deformación por lo tanto es necesario precargar la goma a los niveles máximos de operación antes de utilizarla en su aplicación final. Esta es la razón por la cual, las distintas normativas de aplicación sobre aislamiento sísmico exige que todos los aisladores sean sometidos a pruebas de precarga antes de ser colocados en obra.

Tal vez uno de los aspectos más cuestionados de la goma es su duración y estabilidad frente a agentes ambientales. De acuerdo con resultados publicados por la empresa Bridgestone en ensayos de envejecimiento acelerado de su aislador de alto amortiguamiento se encontró que para un período equivalente de 60 años: la deformación de rotura se reduce en el orden de un 10%, el amortiguamiento aumenta ligeramente con el tiempo, el módulo de elasticidad aumenta en un 10%, la resistencia última aumenta en un 5%, y la adherencia de las placas permanece intacta después de varios cientos de ciclos de deformación del 500%. Para controlar la degradación de la superficie de la goma como resultado del ozono, oxígeno, y luz se deben colocar aditivos especiales como cera y antiozonantes en el compuesto, durante la vulcanización. Existen además diversos productos que se utilizan en las superficies expuestas del aislador para mejorar la resistencia al medio ambiente y controlar el envejecimiento de la goma.

La goma tiene las siguientes ventajas sobre muchos otros materiales utilizados en la ingeniería:

- Alta resistencia a la compresión, con un módulo de Poisson de aproximadamente 0.5, que la hace prácticamente incompresible.
- Buena absorción de energía.
- Habilidad para sufrir grandes deformaciones y recuperarse.
- Buena aislación eléctrica.
- Resistencia a la fatiga, erosión y corrosión.
- Permite ser moldeada a gusto.
- Relativamente económica.

4.3. Propiedades generales de los compuestos de goma

4.3.1. Propiedad tensión – deformación

La principal característica es la no linealidad de la curva tensión – deformación en la región de uso típico, de modo que la conducta elástica de la goma no puede ser definida simplemente por el módulo de Young. (Freakley, 2011)

4.3.2. Relación temperatura – deformación

Los movimientos intermoleculares que están involucrados en la deformación de la goma no pueden ocurrir de forma absolutamente instantánea, debido a que las atracciones intermoleculares deben ser superadas por la energía vibracional de los átomos. Si la temperatura desciende, esas vibraciones se hacen menos vigorosas y no se rompen las atracciones intermoleculares tan rápidamente, por lo que la deformación se hace pesada y lenta. A temperaturas bajas la energía es vibracional y totalmente irregular, no superando a las atracciones intermoleculares, transformándose la goma en un sólido rígido. (Freakley, 2011)

4.3.3. Energía de absorción y de disipación

Una consecuencia de las propiedades tensión–deformación de la goma es la habilidad de almacenar grandes cantidades de energía y de liberar menos cantidad que la energía retenida. Por lo tanto el retorno de la curva tensión–deformación nunca coincide con la curva de carga debido a que existe una cierta cantidad de energía disipada por ciclo (histéresis). La histéresis

es una disipación de energía mecánica en forma de calor durante la deformación del material. (Freakley, 2011)

4.3.4. Propiedades térmicas

La goma es un pobre conductor del calor y por lo tanto un muy buen aislante. El coeficiente de expansión de la goma es mucho más alto que el de los metales, característica que debe ser tomada en cuenta en el diseño del molde, donde es vulcanizado el dispositivo. La unidad terminada debe ser aproximadamente 2,5 % más pequeña que el molde, en dimensiones lineales. (Freakley, 2011)

4.3.5. Agentes externos

La goma, al igual que muchos otros materiales, está expuesta a sufrir cambios graduales con el paso del tiempo. La causa principal es la oxidación por el oxígeno atmosférico, la que puede ser agravada por la luz, alta temperatura o indicios de elementos tales como cobre o manganeso. El resultado de esto es la pérdida de tensión, de elongación y de otras propiedades mecánicas de la goma. El efecto de la luz, es por supuesto confinado a la superficie, y si la goma es negra el efecto es generalmente tenue. Un efecto más serio de superficie es el agrietamiento producido por restos de ozono en la goma. La cantidad de ozono en exposición al aire libre (alrededor de una parte en diez millones) puede producir serias grietas si la goma no está especialmente diseñada para resistir este efecto. (Freakley, 2011)

4.4. Tipos de elastómeros

El primer paso en la formulación de una mezcla de goma es la elección del tipo de elastómero a utilizar. Para ello se debe tener en cuenta las propiedades y aplicaciones del elastómero. Los elastómeros se presentan en distintas variedades:

- Caucho natural
- Natural sintético o poliisopreno
- Cloropreno o neopreno
- Butilo
- Butadieno

Si bien las características particulares de cada uno de ellos escapa a los objetivos de la tesis, se realiza una breve descripción de las variedades indicando aquellas características que son de interés para los objetivos de la investigación.

4.4.1. Caucho natural

Aunque existen gran cantidad de elastómeros sintéticos, el caucho natural se mantiene como el más versátil de todos, teniendo buenas propiedades mecánicas, es decir, tensión, elongación y alta elasticidad. Además posee buena resistencia al desgarró, flexión y abrasión, pero es seriamente afectado por la acción del petróleo, benceno y aceites lubricantes. Su resistencia a la oxidación y al ataque del ozono es baja, pero esto puede ser mejorado agregando aditivos a la mezcla más alguna protección a nivel de superficie.

4.4.2. Natural sintético o poliisopreno

El sintético poliisopreno es manufacturado por las petroquímicas, con estructura molecular similar a la del caucho natural y también con propiedades similares. Sin embargo las clases de poliisopreno son realizadas para que tengan una “menor histéresis” que el caucho natural. Las aplicaciones para ambos elastómeros incluyen cubiertas de vehículos, amortiguadores antivibración, recubiertas de rodillos, etc.

4.4.3. Cloropreno

Este tipo de caucho tiene buenas propiedades físicas, muy similares al caucho natural, pero con una mejor resistencia al ataque del ozono y agente externos. En tensión de tracción, elongación y rebote no supera al caucho natural.

4.4.4. Butilo

El caucho butilo es generalmente inferior en propiedades físicas al caucho natural, aunque mediante procesos de altas temperaturas y con aditivos se mejoran las propiedades de tracción, pero le reducen la histéresis a temperatura ambiente. Por otro lado tienen excelente resistencia a la oxidación, al ataque del ozono y a los agentes externos en general.

4.4.5. Butadieno

Las propiedades físicas de estos cauchos son buenas, pero ligeramente inferiores a las del caucho natural. Una característica importante es que tiene una resiliencia muy buena lo que implica una menor histéresis. Se necesita la incorporación de aditivos para obtener mejores propiedades.

En la tabla 4.2 se resumen las propiedades características de los cauchos mencionadas en los puntos precedentes (Araya Acle et al., 1994)

Tabla 4.2. Propiedades de los distintos polímeros.

Polimero base (Nombre Usual)	Caucho natural	Natural sintético	Butadieno	Butilo	Neopreno
Nombre químico	Polisopreno	Polisopreno	Polibutadieno	Isopreno	Cloropeno
Designación ASTM	NR	IR	BR	HR	CR
Peso específico (gr/cm ³)	0.92	0.91	0.91	0.92	1.25
Coef. De dilatación térmica (°C)	66.6	66.6	67.5	57.6	61.2
Adhesión a metales	E	E	E	P-B	E
Rangos de T° de trabajo (°C)	(-20 a 70)	(-20 a 80)	(-20 a 80)	(-15 a 150)	(-10 a 100)
Propiedades físicas generales a temperatura ambiente					
Resistencia a flexión	B/E	B/E	B/E	B	B/E
Rango de dureza (sh)	30 - 100	40 - 80	40 - 90	40 - 90	30 - 95
Resist. a tracción máx. (kg/cm ²)	300	300	200	200	250
Alargamiento a la rotura max. (%)	650	650	650	800	600
Deform. permanente por compresión	E	E	B	P	E
Resiliencia	E	E	E	P	E
Propiedades mecánicas a temperatura ambiente					
Resistencia a la abrasión	E	B	E	P	B/E
Resistencia al desgarró	E	E	B	B	B
Resistencia al impacto	E	E	B	B	B
Propiedades a altas temperatura					
Envejecimiento a 100°C	P/B	P/B	P	B/E	B/E
Elasticidad a 100°C	B	B	B	P	B
Resistencia a la llama	N	N	C	C	E
Propiedades a bajas temperatura					
Temperatura de rigidez (°C)	(-30 a -45)	(-30 a -45)	(-35 a -50)	(-25 a -40)	(-10 a -45)
Punto de vidrio (°C)	(-65)	(-65)	(-75)	(-65)	(-65)
Propiedades ambientales					
Ozono	N	N	N	E	B
Oxidación	B	B	B	E	E
Agua y luz solar	C	N	C	E	B/E

Referencias: E = excelente, B = bueno, P = pobre, C = uso con precaución, N = no recomendable.

4.5. Características de los principales aditivos de un compuesto de goma

4.5.1. Tipo de reforzante

La cantidad y tipo de reforzante (o carga) son usados para controlar la extensibilidad de la mezcla de goma. El tamaño del reforzante es la principal variable, por su efecto, sobre las propiedades físicas del compuesto de goma. Los reforzantes tienen un tamaño extremadamente pequeño.

El negro de humo es el reforzante más utilizado y se emplea en la mayoría de las situaciones donde se requiera reforzar los compuestos de goma. Al negro de humo se lo clasifica de acuerdo al método de manufactura (alto horno o procesos térmicos), tamaño de partículas que van desde $20\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$ y además por su estructura, juntas de uniones de partículas en cadenas cortas o grupos. Las cantidades típicas de negro de humo por mezcla son de 25% al 50%, expresadas en partes por cien de goma en peso.

De la Figura 4.1, se deduce que comenzando con la goma pura, es decir, goma cruda enlazada con la suma de agentes vulcanizantes y aplicación de calor, cuando se aumenta la proporción de negro de humo; las típicas propiedades físicas no son optimizadas todas a un contenido único de negro de humo. El compuesto debe prepararse para obtener los requerimientos finales del producto terminado. (Freakley, 1978)

La elongación de la goma pura puede ser tan alta como un 1000%, pero decrece con el incremento del contenido de negro de humo, aumentando por lo tanto, la rigidez. Además al aumentar la rigidez, la goma se vuelve menos perfectamente elástica y más dura, produciéndose un aumento de la histéresis durante la tensión dinámica.

El negro de humo aumenta la disipación de energía por histéresis en una cantidad que depende del tipo y porcentaje en el compuesto. Como la goma vulcanizada reforzada con negro de humo exhibe bastante histéresis, éste es uno de los aditivos más importantes para el diseño de la goma de alto amortiguamiento.

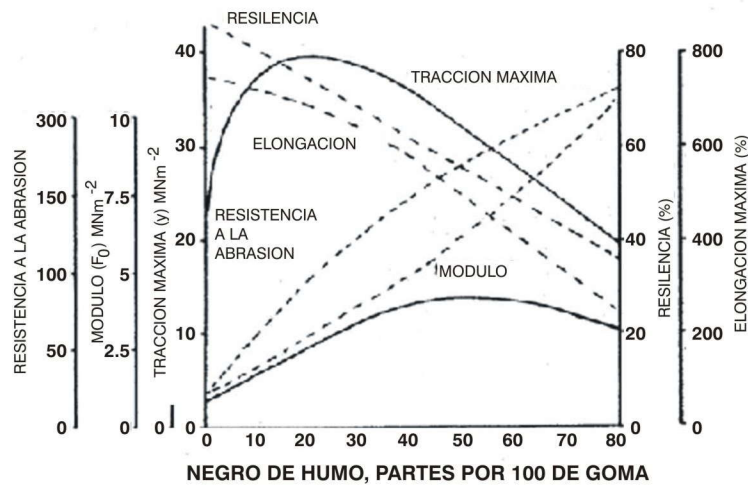


Figura 4.1. Variación de las propiedades de la goma en función de la adición del negro de humo.

4.5.2. Plastificante o aceite

Existen tres tipos de plastificantes derivados del petróleo, que son: Parafínicos, Nafténicos y Aromáticos. Dentro de los Aromáticos están los aromáticos y los altamente aromáticos.

Al utilizar un tipo de aceite en una mezcla de goma, se debe considerar la compatibilidad del aceite con el caucho base de ella. Los aceites parafínicos y nafténicos son compatibles con el caucho butilo, el aromático con el butadieno y con el caucho natural, y por último el altamente aromático con el neopreno.

Los aceites son usados como materiales diluyentes (ayudan al proceso) y también para ajustar el amortiguamiento dentro de un rango limitado. Grandes cantidades de aceites son incorporadas para aumentar la histéresis y la calidad de mezclado. Además, regula el aumento de la rigidez en la goma vulcanizada, causada por una gran cantidad de negro de humo.

El aumento de la cantidad de aceite produce conductas, bajo tensión, más bien viscosas. El tipo y cantidad de aceite causa también sensibilidad a los cambios de temperatura, por ejemplo, el aceite del tipo aromático es sensible a dichos cambios. (Freakley, 1978)

4.5.3. Agentes protectores

Las gomas están expuestas al deterioro por oxígeno y ozono, cuyos resultados son las grietas que exhiben los viejos productos de goma. El agrietamiento es acelerado por el calor y la luz, y depende del modo de deformación de la goma.

El proceso de agrietamiento es la exposición continua de nuevas superficies al ataque del ozono. En una situación no relajada el crecimiento de la grieta continúa hasta que ocurra la

falla. No obstante, para que el crecimiento de la grieta continúe, se necesita que nuevas superficies sean expuestas al ataque del ozono. Esto sólo ocurre en presencia de tensiones de tracción, lo que explica la predominancia de los modos de deformación por compresión y corte de las piezas de goma.

Es posible incorporar antioxidantes y antiozonantes en la mezcla de goma, los cuales pueden actuar, ya sea, por sus recursos químicos o por la formación de una capa resistente en la superficie de la goma. (Freakley, 1978)

4.6. Técnicas de proceso

Antes que los ingredientes se mezclen con el caucho crudo, se someten al proceso de molienda mecánica llamado masticación, con el objeto de lograr un caucho suave, plástico, y viscoso. En tales condiciones, se mezcla más fácilmente y completamente con los diversos fillers, pigmentos, agentes vulcanizantes, y otros ingredientes.

Después del masticador, la próxima máquina en la línea de producción es el mezclador. Las máquinas más usadas son el mezclador interno y los rodillos mezcladores. El mezclador interno produce un fluido completo de los componentes y altas fuerzas de corte, asegurando una dispersión uniforme de los ingredientes y la rotura de las partículas de carga de la mezcla. Una consecuencia de las altas fuerzas de corte es el aumento de la temperatura de la mezcla, la cual alcanza alrededor de 130° C. (Freakley, 2011)

Una vez mezclado los componentes se procede a la expulsión, para ello se utilizan las prensas de expulsión. Estas se usan para forzar el compuesto de goma mediante presión para conformar planchas, tubos o fajas, según sea la comercialización del producto final.

4.7. Vulcanización

El principal propósito de la vulcanización es convertir la goma cruda esencialmente plástica en un material dimensionalmente estable y elástico. Además, con tal procedimiento, se logra que las propiedades físicas sean independientes en un amplio rango de temperaturas.

La mayoría de las gomas son vulcanizadas usando azufre mezclado en el material, en cantidades de 0.25% a 5% normalmente, pero siempre con un sistema de óxido de zinc y ácido esteriático para asegurar una alta eficiencia en la inserción del azufre de enlace, y un sistema de aceleración que reduce el tiempo de vulcanización. (Freakley, 2011)

4.8. Características de la goma de alto amortiguamiento

La característica primordial de este compuesto es su comportamiento no lineal con respecto al módulo elástico de corte y al amortiguamiento versus deformación. Además posee un porcentaje más alto de amortiguamiento que los compuestos de goma comunes. El módulo de corte es grande para pequeñas deformaciones y decrece en forma no lineal a medida que aumenta la deformación. Este es un comportamiento muy deseable ya que provee alta rigidez del aislador para carga de viento y para bajos niveles de excitación sísmica, mientras que su rigidez decrece para grandes sollicitaciones sísmicas, comportamiento buscado en el diseño de aisladores elastoméricos.

Uno de los aditivos más importante que influye en la variación de estos parámetros con la deformación es el negro de humo, en su tipo y cantidad. Un incremento en la cantidad de negro de humo conlleva un aumento de la rigidez y del amortiguamiento. La cantidad usual de este aditivo varía entre el 25% al 50%.

Como se busca un módulo de corte específico y un alto amortiguamiento es posible variar otro aditivo para lograr buenos resultados tales como la cantidad de aceite atento a las propiedades mencionadas anteriormente. (Freakley, 2011).

4.9. Efectos ambientales

4.9.1. Ozono

El ozono ataca los enlaces dobles insaturados de las cadenas moleculares y puede degradar químicamente al elastómero a través de un mecanismo de radical libre. Este mecanismo de degradación produce un incremento de la densidad de enlaces y eventualmente, el elastómero se vuelve más frágil y se agrieta. Los efectos de la degradación debida al ozono se acentúan si el elastómero es sometido a tracción.

Un área de debilidad potencial tiene lugar en el perímetro de las placas de acero, donde los bordes de las capas de caucho están sometidos a concentraciones de tensiones de tracción, debido al cambio de geometría y la abrupta transición entre un material rígido y uno flexible. Estas concentraciones de tensiones sumadas al ozono pueden ocasionar grietas y separaciones en dicha área de contacto.

Para proteger el caucho de los efectos del ozono se utilizan materiales conocidos como antiozonantes. Éstos se incorporan a la mezcla del caucho, ya sea químicamente o formando

una capa resistente al ozono en la superficie de la goma. Dichos materiales permiten reducir la tasa de agrietamiento por un factor de 3 a 5.

Los aisladores con una composición adecuada del elastómero son capaces de resistir al menos 50 años de exposición al ozono sin mayor deterioro. De todos modos, hay acuerdo que el ataque del ozono puede llegar a reducir la vida del aislador bajo carga axial y cíclica de corte. Esto se debe a que pequeñas grietas causadas en la superficie exterior podrían actuar como punto de iniciación de grandes grietas de fatiga que se propagan durante un sismo. Una grieta que se extiende en la región interlaminar podría acelerar el despegue del adhesivo de las placas de acero. (Gioacchini et al, 2003).

4.9.2. Corrosión

Los primeros apoyos de puentes (no sísmicos) fueron hechos sin una capa protectora en la periferia de éste. Como resultado, se produjo la corrosión en las placas reforzantes de acero. Las placas de acero de los apoyos vulcanizados se protegen con una capa de caucho, debido a esto no se conocen problemas de corrosión en apoyos sísmicos.

4.9.3. Temperatura

A temperaturas superiores a 70°C, la mayoría de los elastómeros se degradan mediante un mecanismo de enlazamientos o mediante un mecanismo de ruptura de los enlaces creando radicales libres, los cuales se transforman en estructuras cíclicas. Ambos mecanismos aumentan la dureza y los módulos de compresión y corte del elastómero ocasionando un comportamiento frágil del mismo.

Otra propiedad importante es el comportamiento del caucho a baja temperatura. Las temperaturas de interés son la temperatura de cristalización y la temperatura de transición a vidrio.

La temperatura de cristalización depende de la duración y de la tensión actuante. Cuando ocurre la cristalización se producen cambios en la micro estructura del caucho formándose regiones con macromoléculas ordenadas localmente. En el estado sin tensión, el caucho natural se cristaliza en el rango de +5 °C a -40 °C, donde la tasa máxima de cristalización ocurre a los -25 °C aproximadamente. Sin embargo, dicha temperatura y la tasa de cristalización aumentan cuando el caucho se somete a carga.

Muchas propiedades cambian cuando se alcanza la cristalización, incluyendo un aumento en la dureza y en la rigidez de corte, y una disminución en la capacidad de elongación máxima. Se ha determinado un aumento de más de 15 veces en la rigidez de corte en apoyos no

sísmicos de puentes ensayados en el rango de cristalización. Los efectos de la cristalización se revierten rápidamente cuando el caucho se recalienta.

A temperaturas menores de la de transición a vidrio el módulo de corte puede aumentar en más de dos o tres órdenes de magnitud y la capacidad de elongación máxima se ve fuertemente disminuida. La diferencia entre alcanzar la temperatura de transición a vidrio y la de cristalización radica en que en el primer caso el proceso no depende de la duración y no cambia la microestructura amorfa del caucho, sino que las propiedades mecánicas del caucho cambian repentinamente después de que alcanza la temperatura de transición a vidrio. Sin embargo, al igual que en la cristalización, los efectos son reversibles cuando el caucho se recalienta.

Los elastómeros formulados para utilizarse en dispositivos de aislamiento generalmente tienen baja temperatura de transición a vidrio, menor de -40°C . Sin embargo, dicha temperatura no es una propiedad intrínseca del material, sino que es altamente dependiente de la tasa de carga mecánica, la tasa de enfriamiento y las características de envejecimiento del elastómero. Los procesos de deterioro, como el enlazamiento, aumentan la temperatura de transición a vidrio, por lo tanto no se puede asumir que dicha temperatura esté muy por debajo del rango de temperatura ambiental.

La Figura 4.2 muestra el efecto de la temperatura sobre el módulo de compuestos típicos de goma de alto y de bajo amortiguamiento normalizado al valor del módulo a 30°C . En esta figura se observa que la goma de alto amortiguamiento (con mayor cantidad de negro de humo) es altamente dependiente de la temperatura. (Escandar et al, 2005).

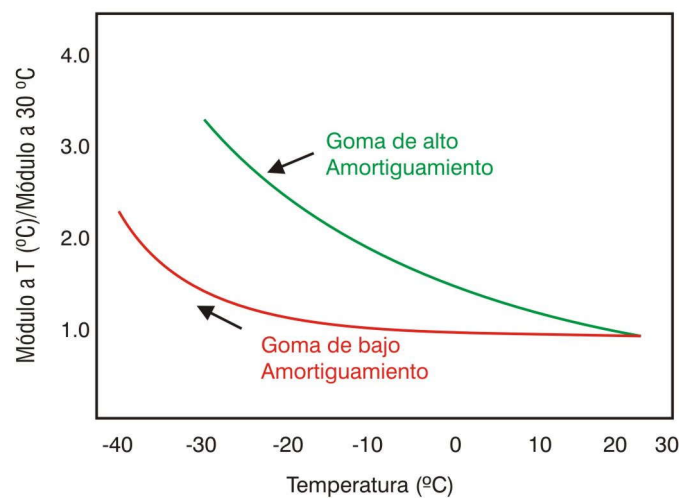


Figura 4.2. Efecto de la temperatura en el módulo de la goma.

Ensayos realizados por la Bridgestone Company en aisladores sísmicos con goma de alto amortiguamiento concluyeron en los valores indicados en la Tabla 4.3. La variación de la rigidez y del amortiguamiento, respecto de la temperatura, están referidas al valor de 20°C. Se observa que tanto la rigidez como el amortiguamiento aumentan a medida que la temperatura disminuye. Además, en estos ensayos se ha observado que la goma de alto amortiguamiento presenta una menor rigidización que la goma común para temperaturas menores a la de cristalización.

Tabla 4.3. Efecto de la temperatura en la rigidez y amortiguamiento.

Temperatura [°C]	Rigidez Relativa $K/K_{T=20^{\circ}\text{C}}$	Amortiguamiento Relativo $\beta/\beta_{T=20^{\circ}\text{C}}$
-15	1.31	1.11
0	1.31	1.05
20	1.00	1.00
40	0.91	0.99

4.10. Factor de forma

El factor de forma s para un aislador de goma multicapas se define como la razón entre el área de la cara cargada y el área libre de pandeo (Ver punto 3.6). Dicho factor es relevante en la rigidez vertical del aislador, según lo ha demostrado J. Kelly (1998, 2008) mediante un análisis elástico aproximado, en que se desprecia la compresibilidad de la goma, y donde propone las siguientes expresiones para calcular el módulo de compresión:

$$\text{Para una faja de goma:} \quad E_c = 4 * G * s^2 \quad 4.1$$

$$\text{Para un aislador circular:} \quad E_c = 6 * G * s^2 \quad 4.2$$

$$\text{Para un aislador cuadrado:} \quad E_c = 4 * G * s^2 \quad 4.3$$

Donde G es el módulo transversal y s es el factor de forma.

Si se considera que el factor de forma usualmente tiene un orden de magnitud de 10, resulta que el módulo de compresión es varios cientos de veces mayor que el módulo transversal. La Figura 4.3 muestra el efecto pronunciado de la deformación en la tensión de compresión en un rango de factor de forma entre 0.25 – 6. Por ejemplo una deformación de sólo el 2% causa una tensión de 6 Mpa para un factor de forma de 6, en cambio para un factor de forma de 0.25 se requiere una deformación de aproximadamente un 38% para producir la misma tensión. (Kelly, 1993).

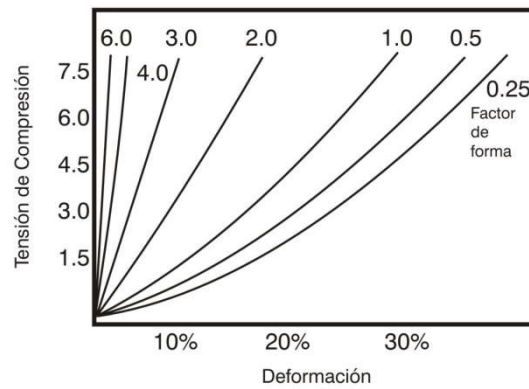


Figura 4.3. Tensión de compresión versus deformación para un rango de factor de forma de 0,25 a 6.

4.11. Propiedades “scragged” (ciclos de ensayos)

Los aisladores que se ensayan dinámicamente por primera vez (*unscragged*), muestran un comportamiento distinto a los aisladores que ya han sido sometidos a ciclos de ensayos (*scragged*). Este resultado se ha observado experimentalmente en una serie de ensayos tendientes a caracterizar los aisladores (Thompson et al., 2000). Para ello se ensaya un prototipo a cargas cíclicas horizontales. A este prototipo, primero se le aplicaron ciclos a desplazamientos pequeños y medianos y luego a desplazamientos de mayores amplitudes. Después de terminado este procedimiento, llamada primera etapa, se realiza la segunda etapa con la misma serie de desplazamientos.

La Figuras 4.4a y 4.4b muestran los ciclos de histéresis en la región de deformaciones pequeñas y medianas, la Figuras 4.5a y 4.5b muestran dichos ciclos en la zona de grandes deformaciones, en la cual las Figuras 4.4a y 4.5a corresponden a la primera etapa y las figuras 4.4b y 4.5b a la segunda etapa. (Thompson et al., 2000)

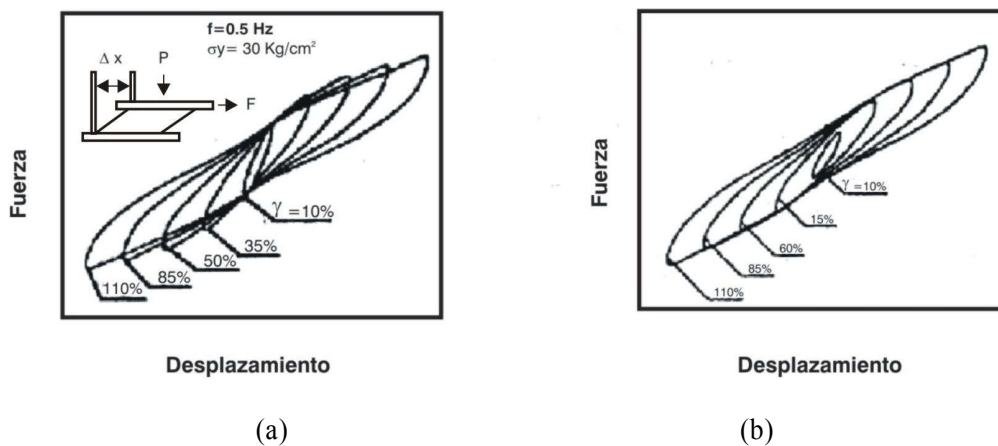


Figura 4.4. (a) Propiedades *unscragged* para pequeños desplazamientos; (b) Propiedades *scragged* para pequeños desplazamientos.

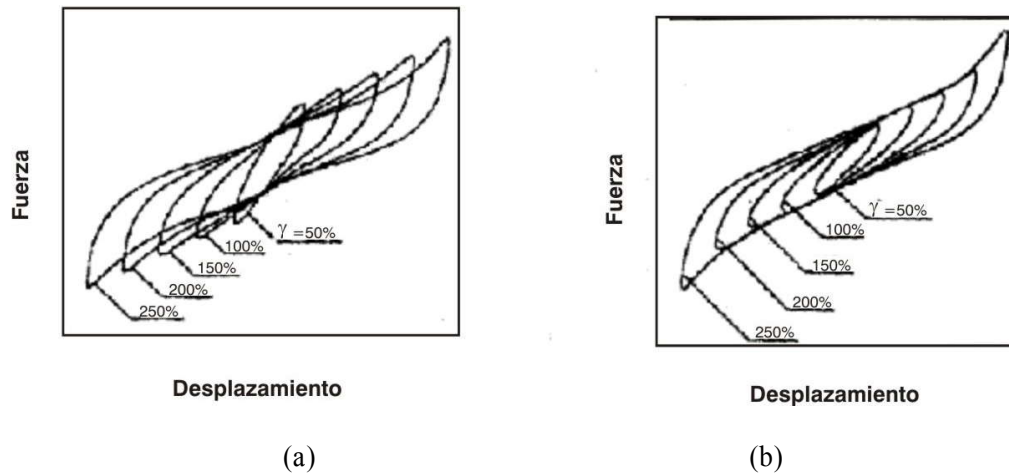


Figura 4.5. (a) Propiedades *unscragged* para grandes desplazamientos; (b) Propiedades *scragged* para grandes desplazamientos.

Para ambos niveles de deformaciones se observa que los ciclos son más suaves y la rigidez es menor en la segunda etapa que en la primera. Además, los ciclos de histéresis para los aisladores *scragged*, quedan dentro de una envolvente que coincide con el ciclo de mayor deformación.

4.12. “Creep” bajo compresión

Es conocido que un *creep* alto puede producir grandes tensiones locales y deformaciones en el interior de la goma, los cuales en un caso extremo pueden causar el colapso de una estructura. Por esta razón, el *creep* es un factor importante a estudiar.

El concepto de “*creep*” es la deformación que se produce en un material en un lapso de tiempo a carga constante. Algunas características indican las siguientes propiedades:

- El *creep* vertical en los aisladores tiene dos componentes: el físico y el químico.
- El *creep* físico varía logarítmicamente con el tiempo.
- El *creep* químico varía linealmente con el tiempo.

De ensayos realizados en la Bridgestone Company a una goma de bajo amortiguamiento y a dos gomas de alto amortiguamiento (una dura y otra blanda) se obtuvo la gráfica que se muestra en la Figura 4.6. Al observar esta figura, se aprecia que las gomas presentan una característica común; el *creep* aumenta gradualmente al principio y linealmente después, alcanzando siempre valores bajos. Los resultados obtenidos fueron medidos con una temperatura constante de $T = 50^{\circ}\text{C}$.

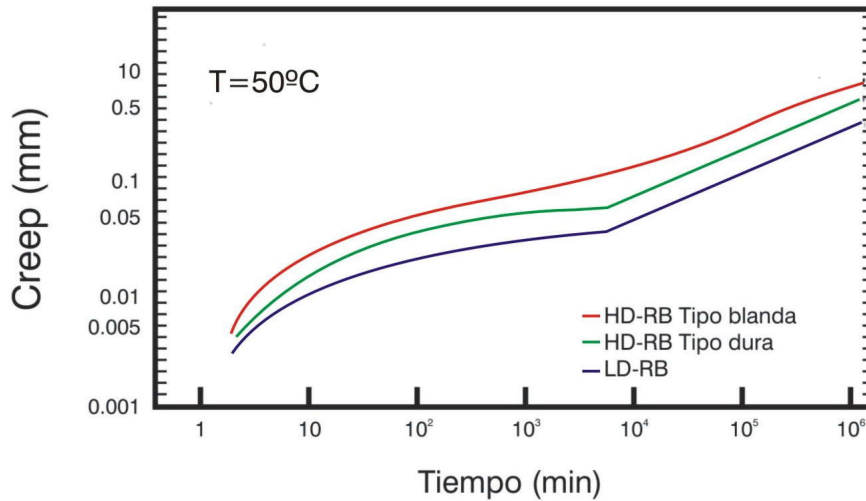


Figura 4.6. Creep de compresión en aisladores.

Por otro lado, durante 7 años se han realizado mediciones del *creep* sobre en aisladores de goma natural bajo un edificio de 1400 toneladas. Sobre la base de estas mediciones, se ha determinado que la tasa de *creep* es aceptable y se espera que el asentamiento del edificio en su fundación demore más de un siglo. (Constantinou et al, 1999).

4.13. Fatiga

Ensayos de fatiga realizados a un aislador sísmico sometido a ciclos de corte, muestran dos etapas, primero se inicia una grieta en el borde de la goma y luego le sigue otra que aparece en el centro.

La Figura 4.7 muestra los resultados de los ensayos, donde se grafica la deformación de corte versus la fatiga para ambas etapas. (Thompson et al., 2000)

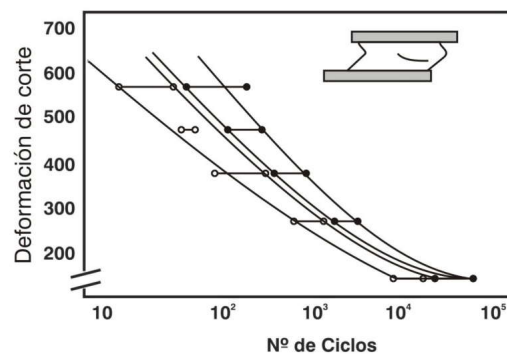


Figura 4.7. Variación de la deformación de corte versus fatiga.

4.14. Envejecimiento y deterioro

El caucho como muchos otros materiales orgánicos está sujeto a sufrir cambios graduales con el paso del tiempo. La principal causa de esto es la oxidación debido al oxígeno atmosférico, la cual se agrava por residuos como cobre o manganeso. El resultado es la pérdida de resistencia y de la capacidad de elongación máxima.

La Bridgestone Company realizó ensayos de deterioro adelantado para establecer la relación entre el deterioro químico y la temperatura de la goma con el objetivo de estimar sus cambios de propiedades bajo condiciones reales. El ensayo consistió en dejar los aisladores un número especificado de horas bajo cargas de compresión a altas temperaturas con el objeto de propiciar un deterioro acelerado de tal manera que se simule las condiciones reales.

En la Figura 4.8 se muestra el cambio de la rigidez y amortiguamiento de los aisladores deteriorados. En estos gráficos se aprecia que la rigidez aumenta al principio y luego disminuye gradualmente, mientras que el amortiguamiento permanece casi sin cambios. A los 60 años la rigidez varía un 20 % de su valor inicial como valor máximo.

Los mismos aisladores posteriormente fueron sometidos a ensayos de elongación última de corte bajo una carga vertical de 5 MPa. En estos ensayos no se aprecia una disminución ni de la tensión ni de la deformación última, bajo la condición de deterioro impuesta y correspondiente a 60 años. (Constantinou et al, 1999).

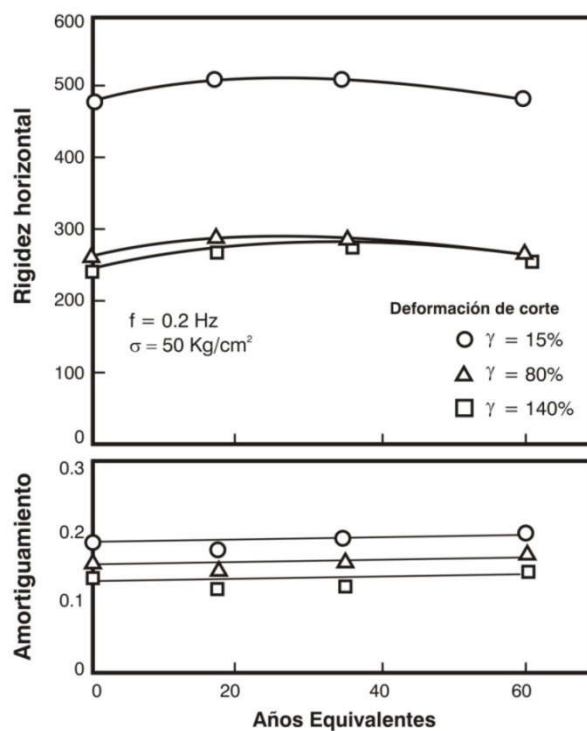


Figura 4.8. Variación en el tiempo de la rigidez y el amortiguamiento para los aisladores.

4.15. Especificaciones y formulación de un compuesto de goma para el dispositivo elastómero objeto de la tesis

Las especificaciones del compuesto de base para la fabricación de aisladores sísmicos pueden resumirse en los siguientes parámetros (Araya Acle et al., 1994):

- Dureza: 60 +/- 10 shore
- Tensión máxima: > 17 MPa
- Elongación máxima: > 500 %
- Amortiguamiento: > 8 %
- Módulo de corte: $0.70 < G < 0.8$ MPa

El compuesto de goma elegido para los prototipos que se diseñan y fabrican al objeto de la tesis es el típico de una goma utilizada para apoyos de puentes, los componentes y sus proporciones se resumen en la Tabla 4.4. (Gioacchini et al., 2015).

Tabla 4.4. Componentes del compuesto de goma utilizado.

Compuesto de goma 8654			
Componentes (base 1kg)		Características – propiedades	Cantidad [kg]
Elastómero	Neopreno W	Elastómero base	0,293
	Caucho Natural		0,245
Cargas	Negro de Humo FEF	Carga negra altamente reforzante de las propiedades físicas	0,234
	Silice Precipitada		0,088
Auxiliares de Proceso		Cumplen la función de ayudar en el proceso de la elaboración de la mezcla	0,033
Activadores		Activantes del sistema de vulcanización	0,065
Antioxidantes y antiozonates		Se utilizan como protectores de la degradación por oxidación y calor	0,027
Catalizadores y Reticulantes		Ejerce propiedades retardantes durante la vulcanización	0,015

4.16. Ensayos realizados en los compuestos de goma

Los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los compuestos que se utilizaron en la fabricación de los prototipos, son los siguientes.

4.16.1. Ensayo de dureza

La dureza de los distintos compuestos se puede determinar según la norma IRAM 113003 o ASTM D2240 (IRAM 113003,1989; ASTM D2240 – 05, 2010). Este método de ensayo se basa en la penetración de un indentador específico en el material. La dureza de indentación es

inversamente proporcional a la penetración, dependiendo del módulo de elasticidad y la conducta viscoelástica del material.

El método de ensayo utiliza dos tipos de durómetros A y D. El durómetro tipo A es usado para medir materiales blandos y el D para materiales duros. El ensayo permite medir la dureza basándose en la indentación inicial o la específica después de un periodo de tiempo.

El instrumento utilizado para ensayar el compuesto fue del tipo A, para gomas blandas. Este medidor de dureza se compone de una sola pieza con un cabezal de medición, un reloj antideslumbrante de 360 ° y un indentador de acero duro con un ángulo de 35°. La probeta en la que fue realizado el ensayo es de una lamina de sección circular de 80mm de diámetro con un espesor de 13.08 mm. El durómetro y la probeta se observan en la Figura 4.9.



Figura 4.9. Durómetro tipo A y probeta del compuesto ensayado.

La dureza obtenida en el ensayo realizado para el compuesto de goma utilizado en la fabricación de los prototipos de aisladores fue de 65 shore.

4.16.2. Ensayo de resistencia a tensión máxima y elongación de rotura

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D412 (ASTM D412 – 06a, 2013). Este método permite medir las propiedades de tracción de un compuesto de goma a diferentes temperaturas. Las propiedades de tracción de la goma dependen del material y las condiciones de ensayo, tales como velocidad, temperatura, humedad y geometría de la probeta.

Para la realización de los ensayos se utilizaron ocho probetas tipo Dumbbell, de las cuales cuatro se ensayaron bajo las condiciones obtenidas del proceso de fabricación y las otras cuatro fueron ensayadas después de ser sometidas a una temperatura de 70°C en un horno durante 72 horas. La máquina utilizada para el ensayo es el dinamómetro. En la Figura 4.10 se muestra la probeta tipo Dumbbell y la máquina dinamómetro en el momento del ensayo.



Figura 4.10. Probeta tipo Dumbbell y la maquina dinamómetro.

Previo al ensayo se midió, para cada probeta, su sección transversal central (sección reducida) y el espesor. Para el ensayo, la probeta se sostuvo en ambos extremos por las mordazas de la máquina dinamométrica. El ensayo consiste en incrementar la tracción aplicada en la probeta en forma paulatina y a una velocidad constante, hasta la rotura, en ese instante se mide la carga y la elongación máxima. En la Tabla 4.5 se muestra los datos obtenidos para ambas series de ensayos.

Tabla 4.5. Valores obtenidos de los ensayos de tracción y elongación.

Ensayo de tracción y elongación							
	Probetas	Espesor mm	Ancho Mm	Area (A) mm ²	Fuerza (F) N	Tensión (s) Mpa	Elongación %
	1	1,80	7,00	12,6	240,00	19,05	440
	2	1,78	7,00	12,46	205,00	16,45	395
	3	1,83	7,00	12,81	215,00	16,78	405
	4	1,70	7,00	11,9	210,00	17,65	430
	Promedio						17,48
a 70°C por 72hs	5	1,69	7,00	11,83	190,00	16,06	340
	6	1,74	7,00	12,18	195,00	16,01	330
	7	1,69	7,00	11,83	185,00	15,64	340
	8	1,83	7,00	12,81	210,00	16,39	350
	Promedio						16,03

4.16.3. Ensayo de compresión residual

Los ensayos se basan en la norma ASTM-D395 (ASTM D395 – 14, 2014). Este ensayo tiene como objetivo medir la capacidad del compuesto de goma a retener sus propiedades elásticas

después de una prolongada compresión. El mismo se realiza en gomas que pueden estar expuestas a tensión de compresión al aire o en medios líquidos.

El ensayo consiste en comprimir un 25% la altura de la probeta, y luego someterla, durante 72 horas a una temperatura de 70°C constante. La deformación residual de la probeta se mide a los 30 minutos de removerla de su dispositivo de compresión. El resultado se obtiene con la siguiente expresión:

$$R_{ec} = \frac{T_0 - T_f}{T_0 - T_s} * 100 \quad 4.4$$

Donde: T_0 = espesor inicial de la probeta.

T_f = espesor final de la probeta.

T_s = altura del espaciador, (25%).

Además, las probetas deben ser ensayadas después de 24 hs de vulcanizadas, pero no más allá de los 60 días, debido a que sus propiedades pueden alterarse. La probeta en la que se ha realizado el ensayo, para definir el material de los dispositivos, objeto de la tesis, consiste en una lámina de sección circular de 80mm de diámetro con un espesor de 13,08 mm, la misma en la que fue realizado el ensayo de dureza (Figura 4.9). El dispositivo de compresión utilizado en el ensayo posee espaciadores de 9,5 mm (3/8"). En la Figura 4.11 se observa el dispositivo de compresión y el horno utilizado para llevar a cabo el ensayo.



Figura 4.11. Dispositivo de compresión y horno utilizado en el ensayo.

El espesor final de la probeta (T_f) medido fue de 12,48 mm, por lo que la compresión set obtenida fue:

$$R_{ec} = \frac{T_0 - T_f}{T_0 - T_s} * 100 = \frac{13,08mm - 12,48mm}{13,08mm - 9,5mm} * 100 = 16,76$$

4.17. Descripción de la fabricación de los prototipos de aisladores sísmicos

La fabricación de los prototipos de aisladores sísmicos fue realizada en la empresa PRA BALDI HNOS S.A, al igual que los ensayos del elastómero base descritos en apartado anterior. Dicha empresa fabrica y comercializa productos moldeados, extrusados e inyectados en goma y PVC, fundada en Mendoza hace más de 60 años, cuenta con todos los elementos técnicos que hacen al desarrollo de piezas y el control de su producción. Las actividades de investigación que se ejecutan en el ámbito de la presente tesis apuntan a desarrollar tecnología local a través de una transferencia de conocimiento a la empresa con el objeto de contar con los instrumentos necesarios para realizar la fabricación de los dispositivos en la provincia de Mendoza.

Los moldes utilizados para la fabricación de los dispositivos de aislamiento, son de acero macizo y se construyeron especialmente para lograr el objetivo de la tesis. Los mismos se diseñan para resistir las presiones y temperatura a las que son sometidos en el momento de vulcanizar la pieza. Como se observa en las Figuras 4.12 y 4.13 los moldes están compuestos por un tubo interior de espesor de pared igual a 54 mm y seccionado a la mitad para permitir el desmolde, y un tubo exterior de 30 mm de espesor de pared que colabora en mantener unidas las piezas interiores.

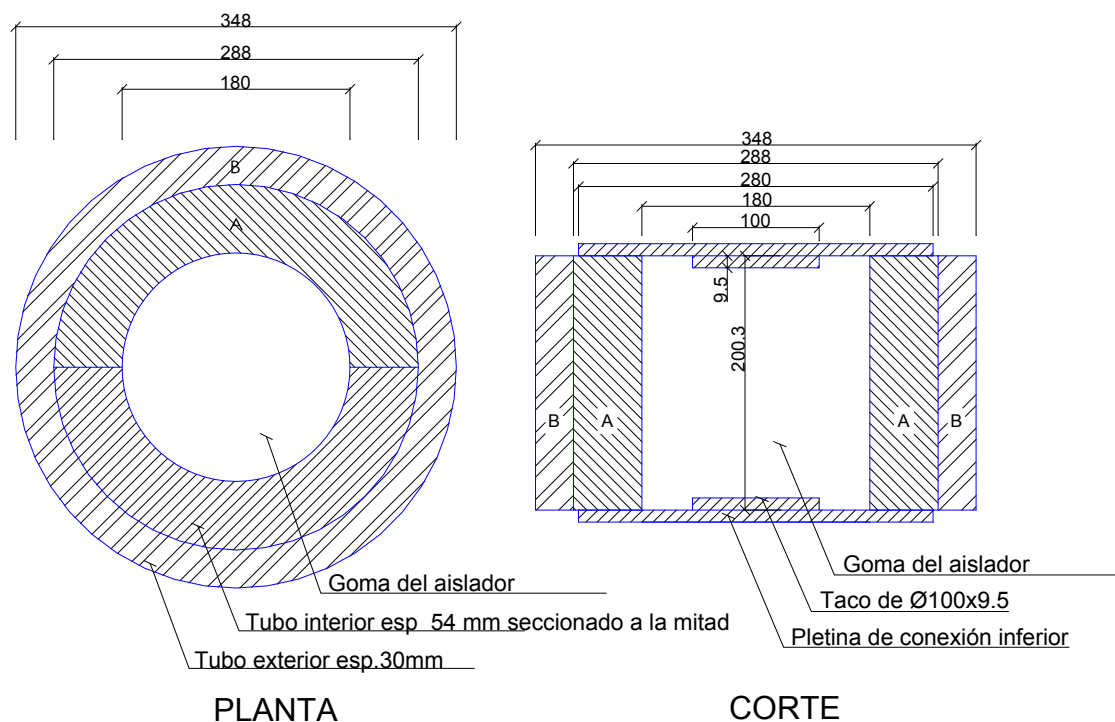


Figura 4.12. Esquema de los moldes utilizados en la fabricación de los prototipos.



Figura 4.13. Fotografía de los moldes utilizados en la fabricación de los prototipos.

Las pletinas de conexión inferior y superior fueron confeccionadas de acero macizo con un espesor de 9,5 mm y un diámetro de 280 mm, poseen un taco de acero en el centro de 100 mm de diámetro y 9,5 mm de espesor, este permite proporcionar una mayor superficie de contacto con el elastómero. También tienen cuatro orificios para tornillos de 20 mm, que permitirán la conexión con la estructura de fundación o la superestructura según corresponda. Para facilitar su posicionamiento fue fabricado un anillo de acero con tres vástagos con pernos, para ser enhebradas en las orejas adheridas al molde, las cuales poseen un orificio. Las pletinas de conexión y el anillo de centrado se pueden observar en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16.

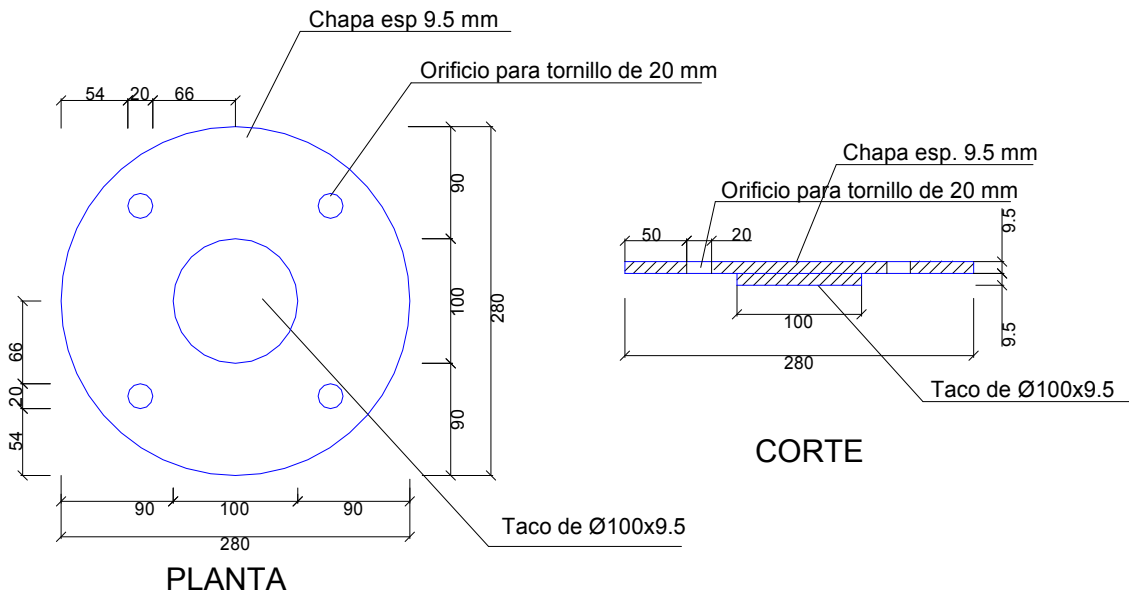


Figura 4.14. Esquema de las pletinas de conexión inferior y superior.



Figura 4.15. Fotografías de una de las pletinas de conexión inferior y superior y el anillo de centrado.



Figura 4.16. Fotografías de los moldes, las pletinas de conexión y el anillo de centrado.

Se fabricaron ocho prototipos de aisladores sísmicos, con cuatro tipos distintos de confinamiento de núcleo.

La primera serie de aisladores (dos prototipos) se fabricaron sin núcleo de confinamiento, a la cual se le ha dado el nombre de aislador sin núcleo confinado (ASNC).

La segunda serie (dos prototipos) corresponden a aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con un tubo de acero ranurado mediante un arrollamiento espiralado de un alambre de sección triangular de diámetro igual a 100 mm y un espesor de 6 mm, a la cual se le ha dado el nombre de aislador con núcleo de acero grueso (ANAG).

La tercera serie (dos prototipos) corresponden a aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con láminas de fibra (*tela cord*) formando un cilindro de diámetro igual a 100 mm, a la cual se le ha dado el nombre de aislador con núcleo de *tela cord* (ANTC).

La cuarta serie (dos prototipos) corresponden a aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con un tubo de acero de chapa perforada de diámetro igual a 100 mm y un espesor de 2 mm, a la cual se le ha dado el nombre de aislador con núcleo de acero fino (ANAF).

En todos los casos el núcleo confinado no abarca toda la altura del aislador, sino que los elementos que se utilizan para confinar poseen una altura de 110 mm por lo que quedan separados de las pletinas de conexión superior e inferior 45 mm. En la Figura 4.17 se muestran fotografías de los núcleos colocados en las series de los prototipos mencionadas.



Figura 4.17. Fotografías de los núcleos colocados en los prototipos ANAG y ANAF.

La producción de las piezas fue principalmente manual, por lo que la participación de los operarios tuvo un efecto importante en el resultado final. El primer paso en la fabricación de los aisladores fue el de combinar los componentes en una mezcladora mecánica. Una vez que el material toma la consistencia deseada es colado en el molde y llevado a la prensa para su vulcanización. Previo a ello, en el interior del molde se aplica un aditivo antiadherente que permite un fácil desmoldado. Para lograr una mejor adherencia entre las pletinas de conexión y el elastómero se pintan las primeras con un adhesivo especial. En la Figura 4.18 se muestran los procesos mencionados.



Figura 4.18. Fotografías de la colocación de aditivos en moldes y adhesivo en las pletinas.

El proceso de vulcanización consiste en someter al compuesto de goma a una presión de 120 toneladas y una temperatura de 150°C por un lapso de tiempo de dos horas, la presión,

temperatura y tiempo dependen de las dimensiones de la pieza a confeccionar. Una vez retirados de la prensa se dejan enfriar y se realiza el desmolde de la probeta. En la Figura 4.19, 4.20 y 4.21 se muestran los prototipos en el momento de su vulcanización y en la Figura 4.22 los mismos dispositivos desmoldados.



Figura 4.19. Fotografías previas al proceso de vulcanizado de los prototipos.



Figura 4.20. Fotografías durante el proceso de vulcanizado de los prototipos.



Figura 4.21. Fotografías durante la colocación de la pletina de conexión superior y vulcanización final.



Figura 4.22. Fotografías de los prototipos posteriores a su desmolde.

De cada serie se fabricaron dos prototipos por lo que en la etapa de fabricación se lograron un total de ocho dispositivos. Si bien, tal cual se comentó previamente, el proceso de fabricación fue artesanal las fallas inherentes a dicha procedimiento fueron irrelevantes. En la Figura 4.22 puede observarse que la calidad, al menos aparente, de los dispositivos fue aceptable. Los ensayos físicos y mecánicos, descritos en los capítulos siguientes, nos ha permitido también verificar la calidad de la fabricación de los dispositivos objeto de la presente tesis.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describe la metodología y se muestran los resultados obtenidos, para los dos tipos de ensayos experimentales realizados a los prototipos fabricados. La primera serie de ensayos realizados a los prototipos descritos en el Capítulo IV fue a carga axial vertical. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructura del INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) en la Provincia de San Juan. La segunda serie de ensayos se efectuaron a solicitaciones verticales constantes y horizontales cíclicas. Los mismos se llevaron a cabo en el laboratorio de estructura del IMERIS (Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

Con los ensayos experimentales se busca determinar los parámetros mecánicos y las leyes constitutivas de los dispositivos de aislamiento fabricados.

5.1. Ensayos de los prototipos de aisladores a cargas verticales

5.1.1. Descripción del ensayo

Los ensayos se realizaron a carga axial vertical controlada, en el laboratorio de estructuras del INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) en la Provincia de San Juan. Se utilizó la máquina universal, marca Shimadzu, con una capacidad de carga de 1000 KN. En la Figura 5.1 se muestran fotografías de la máquina utilizada en los ensayos de los dispositivos.



Figura 5.1. Fotografías de la máquina utilizada en los ensayos a cargas verticales.

Los ensayos se ejecutaron a deformación vertical controlada a un prototipo por serie. Para el caso de las series ASNC (aislador sin núcleo confinado) y ANTC (aislador con núcleo de tela cord) se deformó hasta 50 mm, para la serie ANAG (aislador con núcleo de acero grueso) se aplicó una deformación 15 mm y para la serie ANAF (aislador con núcleo de acero fino) se llegó a una deformación de 100 mm. En todos los casos, excepto el último los prototipos,

permanecieron en el rango elástico, regresando a su posición inicial una vez retirada totalmente la fuerza axial. En el caso de la serie ANAF, quedaron deformaciones permanentes moderadas.

Para la serie ANAG los valores de deformación mencionados, fueron definidos para que las pletinas extremas no entren en contacto con el núcleo de confinamiento. En el caso de la serie ANAF se obtuvo a una deformación de 100 mm debido a que en un ensayo previo de 50 mm se evidenciaron deformaciones permanentes, por lo tanto se descartaría para los ensayos de cargas axiales y horizontales cíclicas. Se aplicó esta metodología para evaluar el comportamiento del aislador a una deformación vertical extrema. Para las demás series el criterio adoptado fue aplicar una deformación controlada para no superar el 25% de la altura del aislador. En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran fotografías de los ensayos a fuerzas axiales verticales para los distintos prototipos.



Figura 5.2. Fotografías del ensayo a fuerza axial vertical al prototipo ASNC-1.



Figura 5.3. Fotografías del ensayo a fuerza axial vertical al prototipo ANAG-1.



Figura 5.4. Fotografías del ensayo a fuerza axial vertical al prototipo ANAF-1.

5.1.2. Resultados

A partir de los datos generados de los ensayos experimentales a sollicitaciones axiales efectuados a los prototipos, se determinó la capacidad y el comportamiento a acciones verticales. A continuación, se muestran los gráficos de las relaciones fuerza – desplazamiento de cada uno de los prototipos.

En la Figura 5.5 se observa la relación fuerza – desplazamiento vertical del prototipo sin núcleo de confinamiento (ASNC-1). Los resultados indican un desplazamiento vertical de 50 mm asociado a una carga vertical de 30.100 N. Este prototipo presenta un comportamiento elástico, en el cual no se producen daños ni alteraciones, situación que indica que los procesos de vulcanizado utilizados durante la fabricación de los mismos fueron los adecuados.

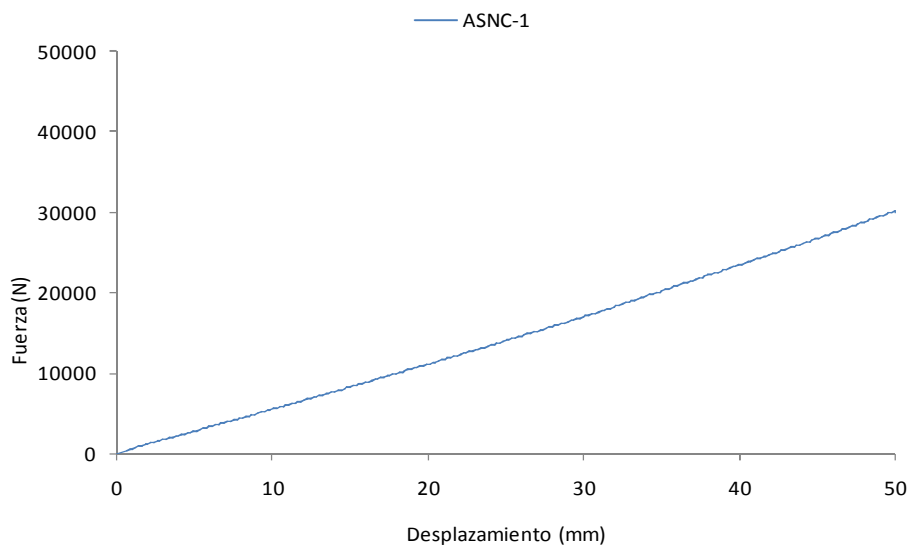


Figura 5.5. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ASNC-1.

En la Figura 5.6 se observa la relación fuerza – desplazamiento vertical del prototipo con núcleo de acero grueso (ANAG-1) donde, para un desplazamiento vertical de 15.5 mm, se

obtiene una carga vertical de 49.500 N. Para los prototipos con su núcleo confinado con el tubo de acero perforado se observa un cambio de pendiente indicando un aumento de la rigidez vertical. Este efecto es atribuible a la influencia del núcleo confinado. No se presentaron daños y el prototipo recuperó su forma y dimensiones iniciales una vez retirada la acción vertical.

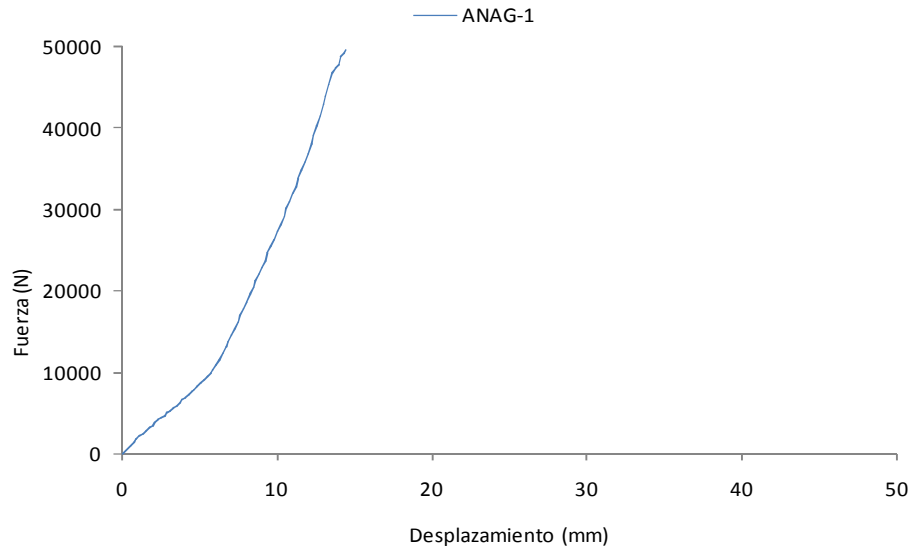


Figura 5.6. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANAG-1.

En la Figura 5.7 se muestra la relación fuerza – desplazamiento vertical del aislador elastómerico con núcleo de *tela cord* (ANTC-1) donde, para un desplazamiento vertical de 51.74 mm, se obtuvo una carga vertical de 50.700 N. Durante el ensayo el prototipo presentó un muy buen desempeño y un comportamiento elástico.

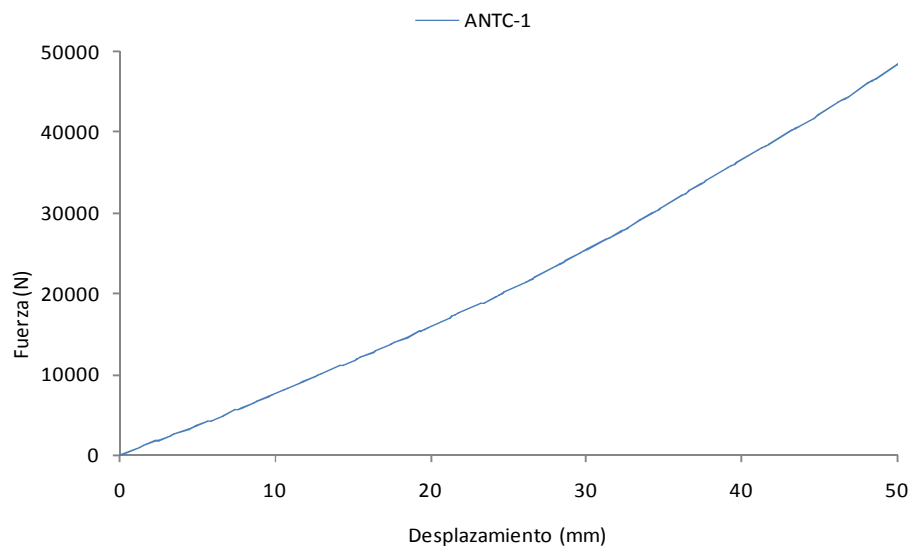


Figura 5.7. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANTC-1.

En la Figura 5.8 se observa la relación fuerza – desplazamiento vertical del prototipo con núcleo de acero fino (ANAF-1) donde, para un desplazamiento vertical de 47.41 mm, se obtuvo una carga vertical de 51.640 N. En la relación fuerza – desplazamiento se muestra que el aislador presenta un cambio en su rigidez debido al acomodamiento del núcleo de tubo de acero de chapa perforada, a partir de ese punto su comportamiento continuo lineal. No se observan ningún tipo de daño en la parte externa del prototipo.

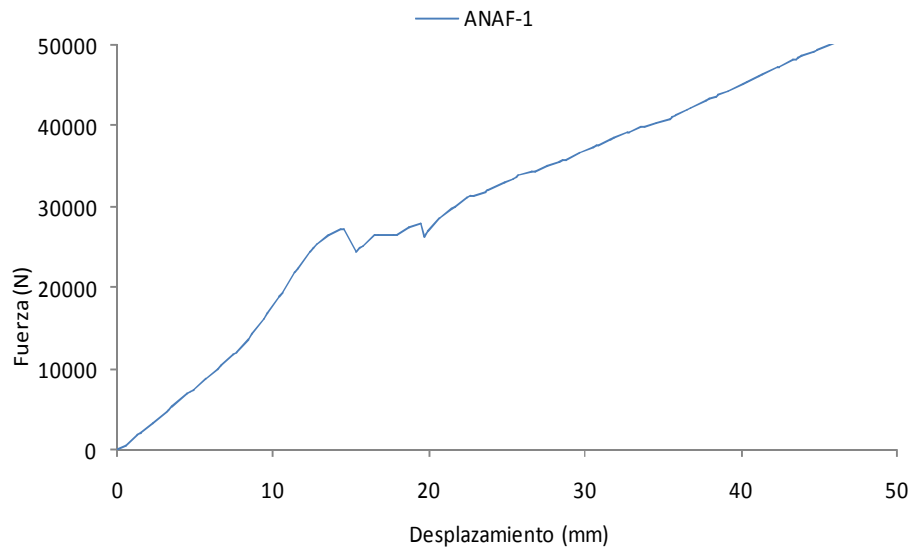


Figura 5.8. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANAF-1.

En la Figura 5.9 se muestra la relación fuerza – desplazamiento superpuesto para los cuatro prototipos ensayados. Se observa que la rigidez vertical es considerablemente mayor en el aislador ANAG-1 con respecto a los otros tres prototipos. Si se compara el prototipo ASNC-1 con el ANTC-1, observamos que para el mismo desplazamiento se obtiene una fuerza vertical en el segundo 1.6 veces mayor, y si lo comparamos con el ANAF-1 es 1.7 veces mayor.

De los ensayos experimentales a cargas verticales se obtiene la rigidez vertical de cada prototipo. Cabe destacar que los prototipos de aisladores sin núcleo confinado, los prototipos con núcleo de *tela cord* y los prototipos con núcleo de acero fino, presentan una rigidez prácticamente constante durante todo el ensayo. Mientras que el prototipo con núcleo de acero grueso muestra una variación de rigidez durante el ensayo, es por ello que este último estará caracterizado por una rigidez vertical inicial y una rigidez vertical final (Ver Figura 5.9)

A continuación, se obtiene la rigidez vertical con ecuación (5.1) para el prototipo de aislador elastomérico sin núcleo de confinamiento.

Rigidez vertical:
$$K_v = \frac{|F^+|}{|\Delta^+|} = 602 \text{ N/mm}$$
 5.1

$F^+ = 30.100 \text{ N}$

$\Delta^+ = 50 \text{ mm}$

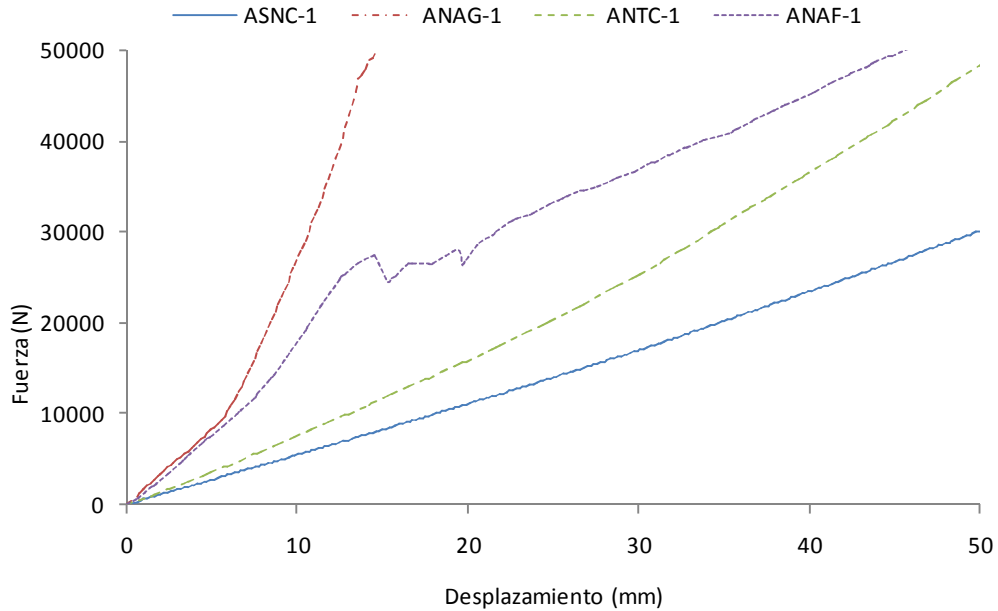


Figura 5.9. Relación fuerza – desplazamiento superpuesto para los cuatro prototipos.

En la Tabla 5.1 se resumen los valores generados, a partir de los ensayos experimentales a cargas verticales, que permiten obtener la rigidez vertical para cada prototipo de aislador. Donde Δ^+ y F^+ son el desplazamiento y la fuerza máxima.

Tabla 5.1. Rigidez vertical de los aisladores, obtenida a partir de los ensayos experimentales.

		PROTOTIPOS DE AISLADORES				
		ASNC-1	ANAG-1		ANTC-1	ANAF-1
			Inicial	Final		
F^+	N	30000	8180	49500	50700	51640
Δ^+	mm	50,00	4,90	14,50	51,74	47,41
k_v	N/mm	600,05	1669,39	3413,79	979,98	1089,18

En la Figura 5.10 se observa la relación fuerza – desplazamiento del prototipo de aislador elastómero con núcleo de acero fino (ANAF-1) para un desplazamiento vertical de 100 mm,

para el cual se obtuvo una carga vertical de 159.680 N. En este ensayo el aislador presenta deformaciones permanentes moderadas, ver Figura 5.4.

También es importante destacar que para un desplazamiento de 60 a 70 mm entra en carga el núcleo de confinamiento, es decir que las pletinas de acero se ponen en contacto con el mismo y a partir de este hecho se produce un cambio de rigidez en el prototipo. Es por ello que este prototipo se ha descartado para los ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas.

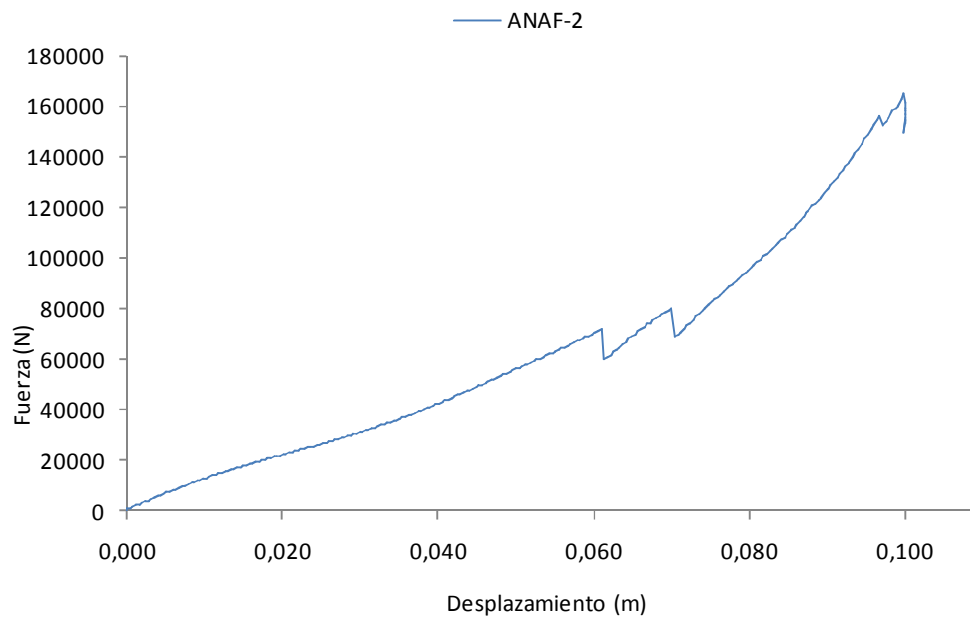


Figura 5.10. Relación fuerza – desplazamiento para acciones verticales del prototipo ANAF-1 para un desplazamiento de 100 mm.

5.2. Ensayos de los prototipos de aisladores a cargas verticales constantes y horizontales cíclicas

5.2.1. Descripción del ensayo

Los ensayos a sollicitaciones verticales constantes y horizontales cíclicas de los prototipos del nuevo dispositivo de aislamiento sísmico se realizaron en el laboratorio de estructura del IMERIS (Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

Para realizar los ensayos fue necesario un pórtico de reacción, un actuador hidráulico de 12 toneladas para aplicar la carga horizontal cíclica, el cual es operado con un equipo de carga hidráulico y cuatro varillas roscadas fijadas a la losa reactiva las cuales tienen la función de efectivizar la carga vertical. El esquema del ensayo observa en la Figura 5.11.

El sistema de adquisición de datos digital se compone de sensores, hardware de medidas y una PC con software programable en tiempo real. Los sensores utilizados fueron una celda de carga para medir las acciones verticales, una celda de carga para medir las acciones horizontales, un transformador diferencial de variación lineal (LVDT según sus siglas en inglés) para medir los desplazamientos horizontales y tres potenciómetros para medir los desplazamientos verticales.

Los aisladores fueron ensayados para dos desplazamientos verticales, 15mm y 30mm. Para cada desplazamiento vertical se realizaron 7 ciclos de desplazamientos horizontales de +/- 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm y 70 mm. En la Figura 5.12 se muestran fotografías del ensayo de uno de los prototipos.

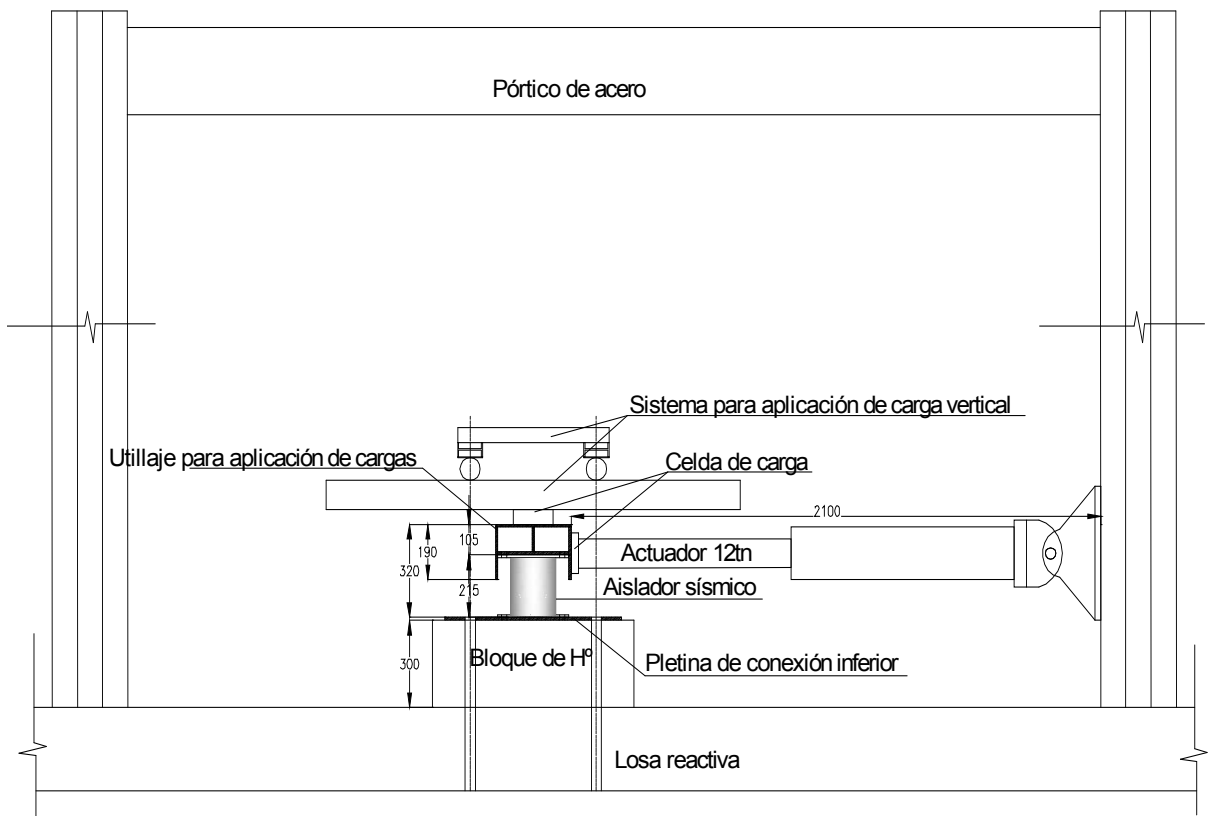


Figura 5.11. Esquema del ensayo de los prototipos junto al pórtico de cargas.

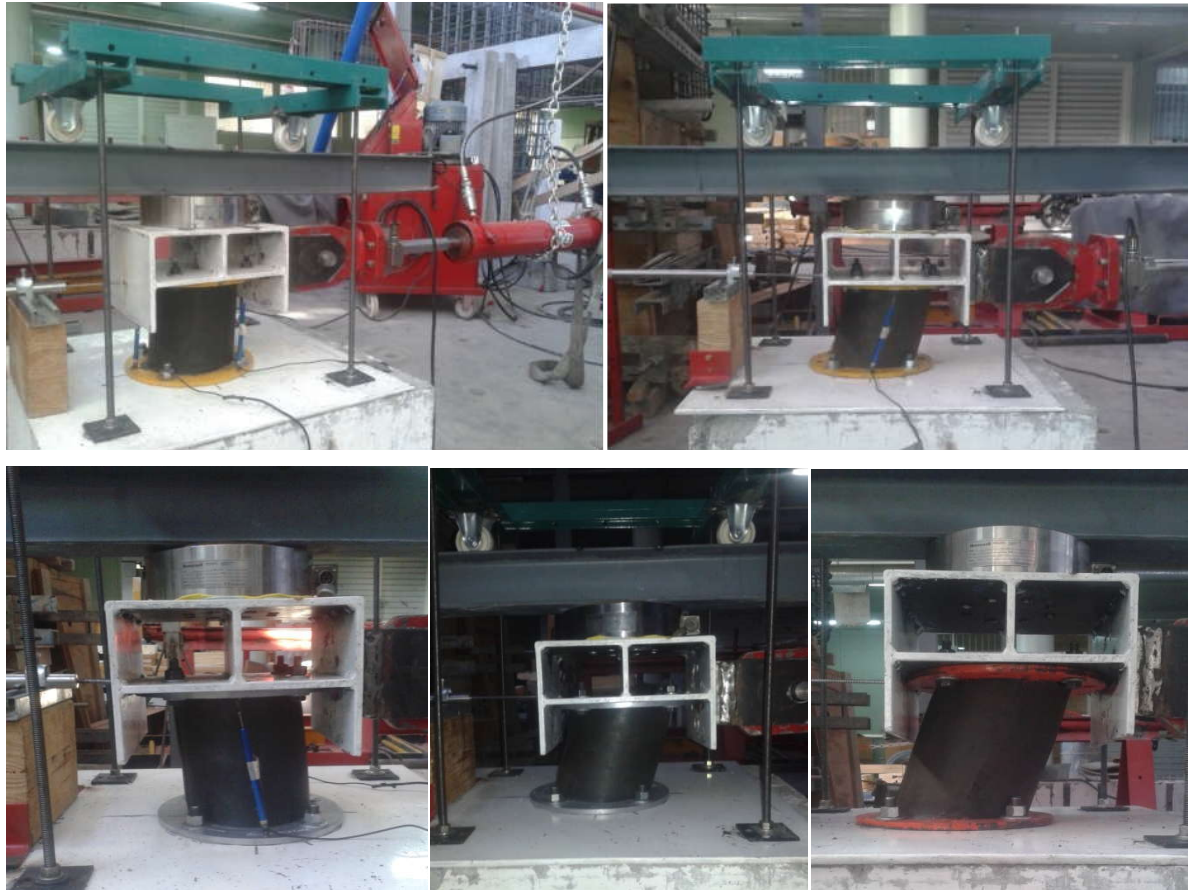


Figura 5.12. Fotografías de los ensayos experimentales de distintos prototipos.

5.2.2. Resultados

A partir de los datos generados de los ensayos experimentales a cargas axiales y horizontales cíclicas efectuados a los prototipos de aisladores sísmicos se determinaron:

- La relación fuerza – desplazamiento mediante la gráfica de la curva de histéresis.
- Los bucles histeréticos o comportamiento no lineal obtenidos de la gráfica fuerza – desplazamiento, con ella se determinan el área promedio y la energía disipada por el aislador.
- Las fuerzas y desplazamientos máximos, los cuales permitirán obtener la rigidez efectiva.

A continuación, se muestra, de manera cualitativa, los gráficos de las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal. En ellos se observa que la respuesta de los prototipos de aisladores ensayados en la presente tesis, indican una muy buena performance, situación que confirma los adecuados procedimientos implementados en la fabricación de los dispositivos. Estudios cuantitativos, relacionados con el amortiguamiento y rigidez efectiva se detallan en el apartado 5.2.3 de la presente tesis.

En la Figura 5.13 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y una carga vertical de 8.000 N.

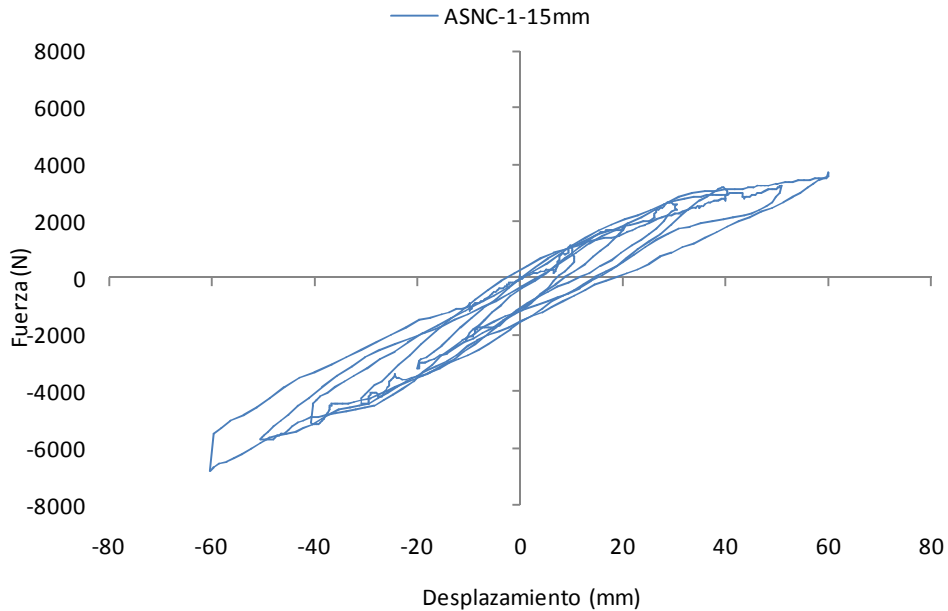


Figura 5.13. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1-15mm.

En la Figura 5.14 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 30mm y una carga vertical de 17.000 N.

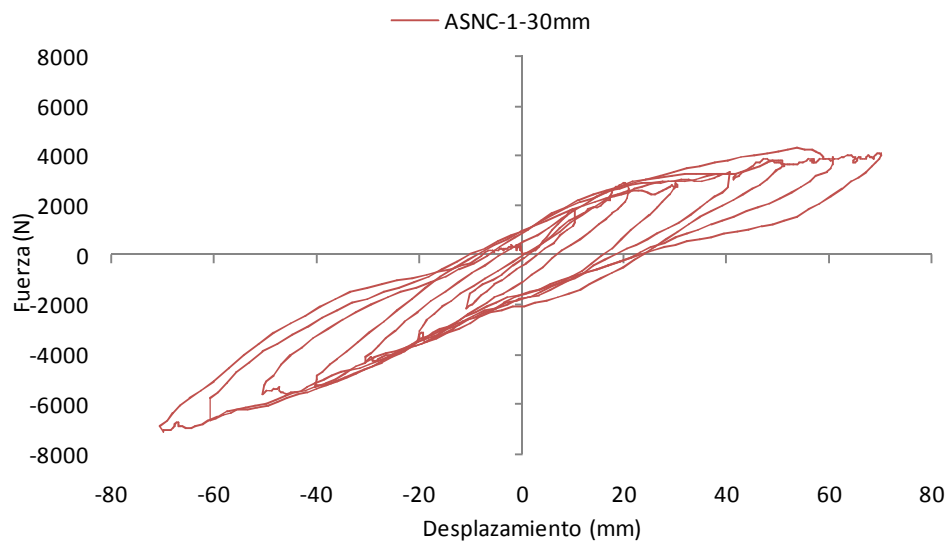


Figura 5.14. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1-30mm.

En la Figura 5.15 se muestran las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-1), para ambos desplazamientos verticales estudiados (15mm y 30mm).

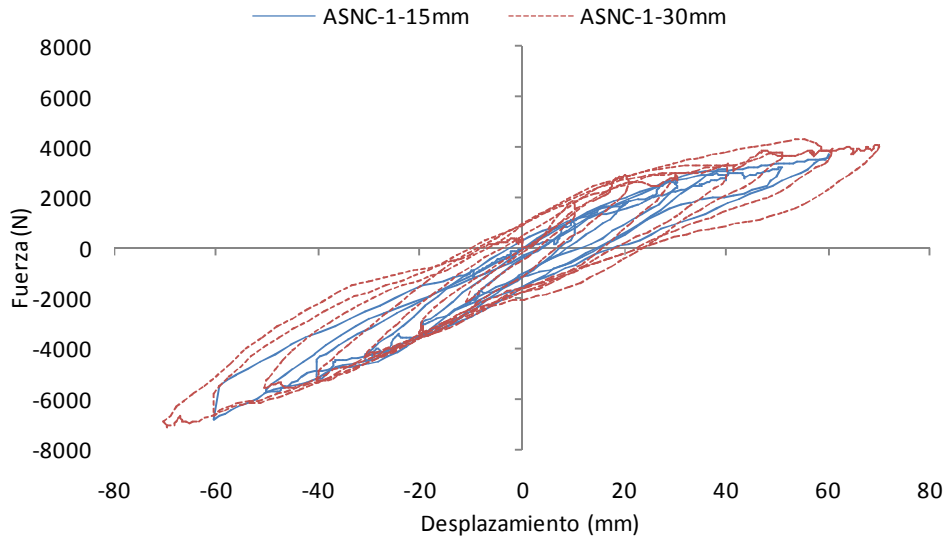


Figura 5.15. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm.

En la Figura 5.16 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-2). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y una carga vertical de 9.800 N.

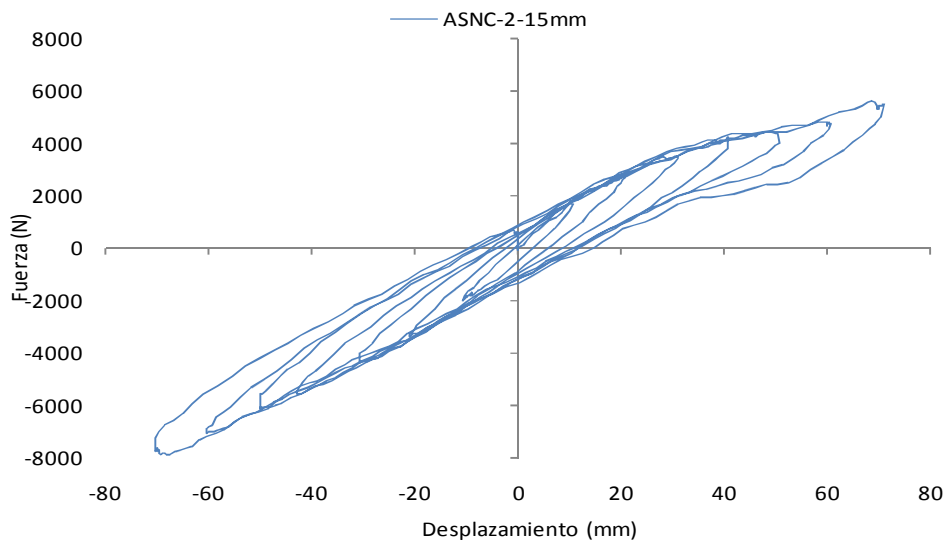


Figura 5.16. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-2-15mm.

En la Figura 5.17 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-2). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 30 mm y una carga vertical de 17.900 N.

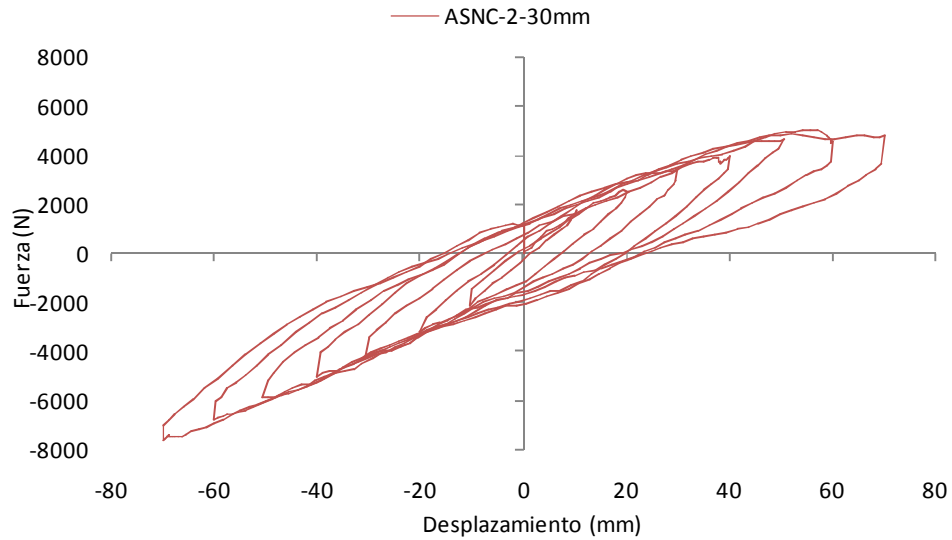


Figura 5.17. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-2-30mm.

En la Figura 5.18 se muestran las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-2) para ambos desplazamientos verticales (15mm y 30mm) estudiados.

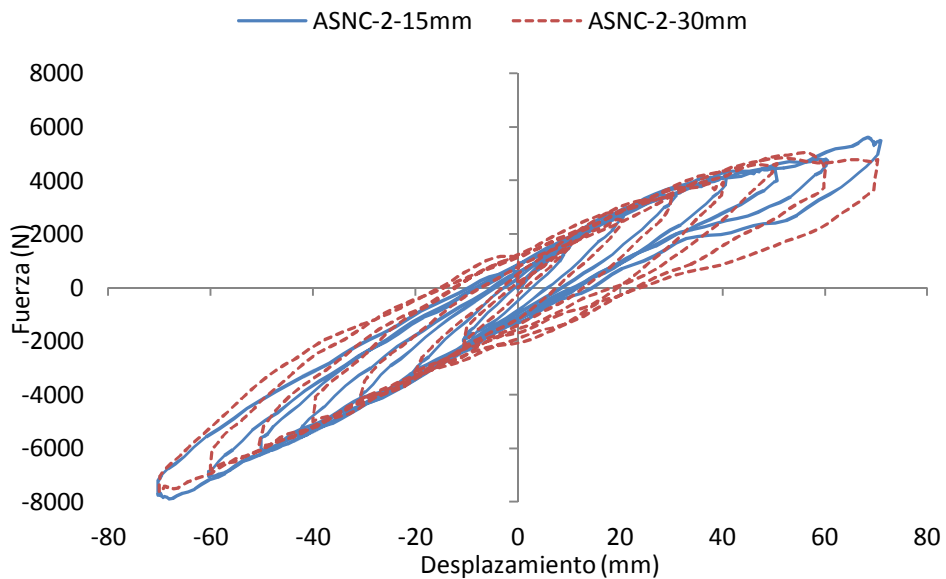


Figura 5.18. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-2, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm.

En la Figura 5.19 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de acero grueso (ANAG-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical 15mm y una carga vertical de 20.200 N.

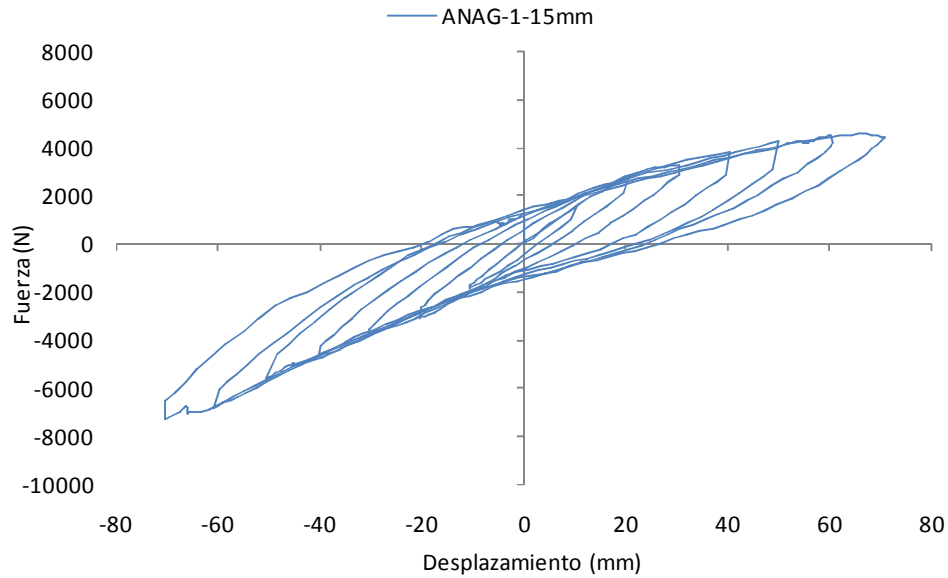


Figura 5.19. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG-1-15mm

En la Figura 5.20 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de acero grueso (ANAG-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 3 mm y una carga vertical de 4.000 N.

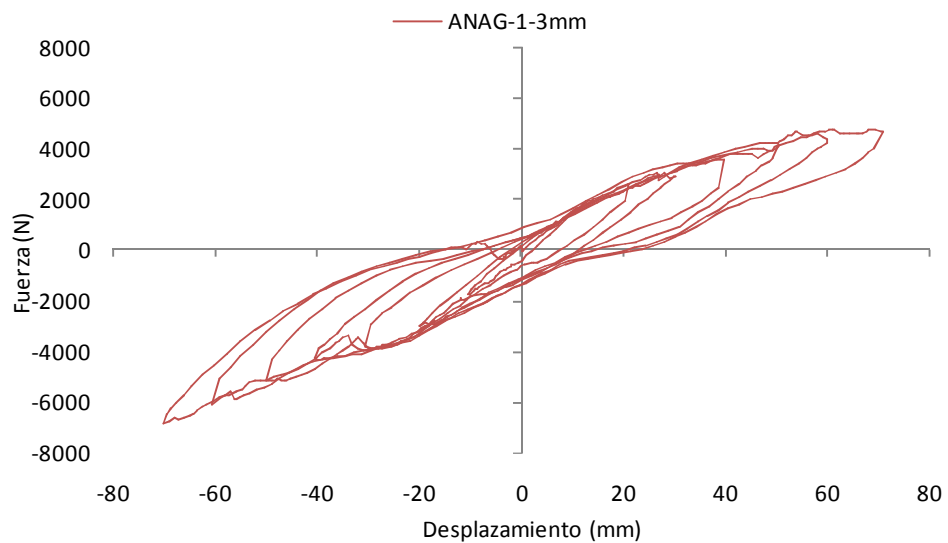


Figura 5.20. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG-1-3mm.

En la Figura 5.21 se muestran las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómerico con núcleo de acero grueso (ANAG-1) para ambos desplazamientos verticales (15mm y 3mm) estudiados.

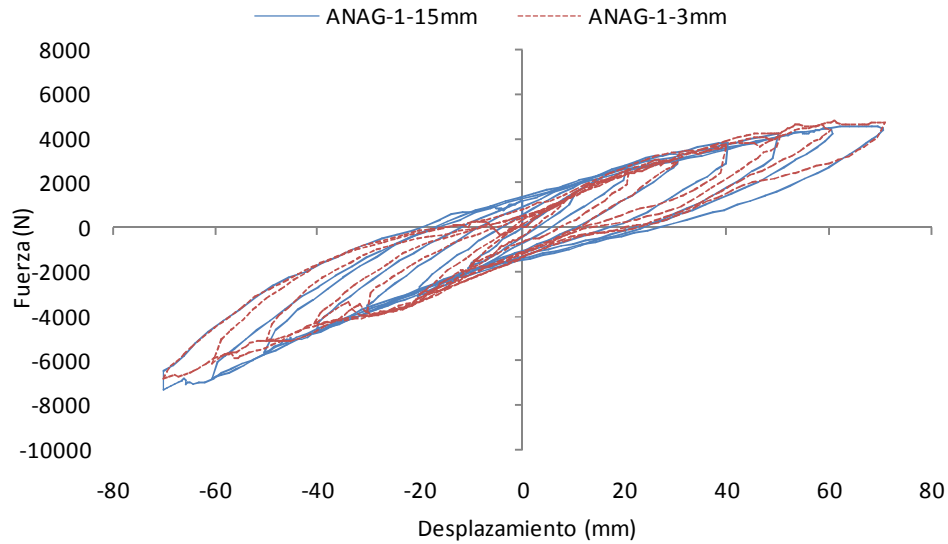


Figura 5.21. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 3mm.

En la Figura 5.22 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómerico con núcleo de acero grueso (ANAG-2). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y carga vertical de 21.500 N.

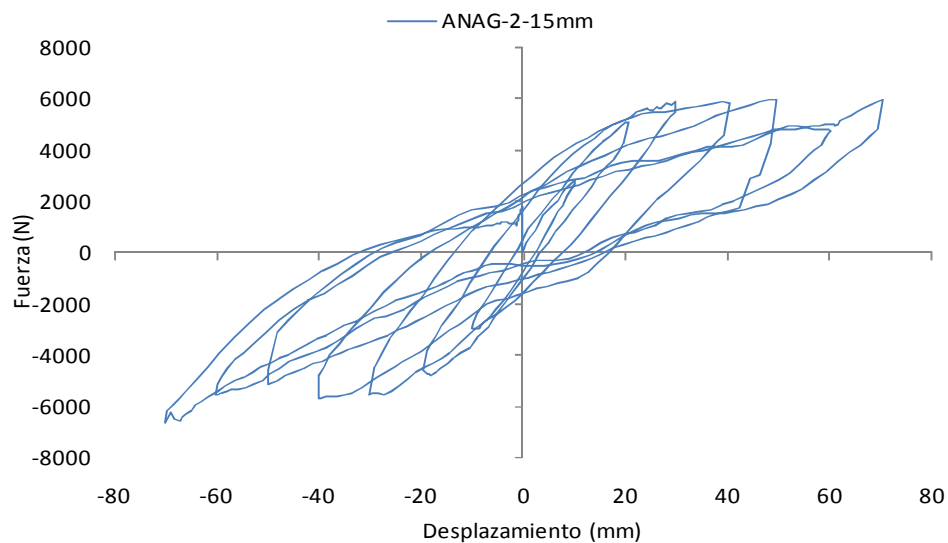


Figura 5.22. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAG-2-15mm

En la Figura 5.23 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de *tela cord* (ANTC-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y una carga vertical de 9.000 N.

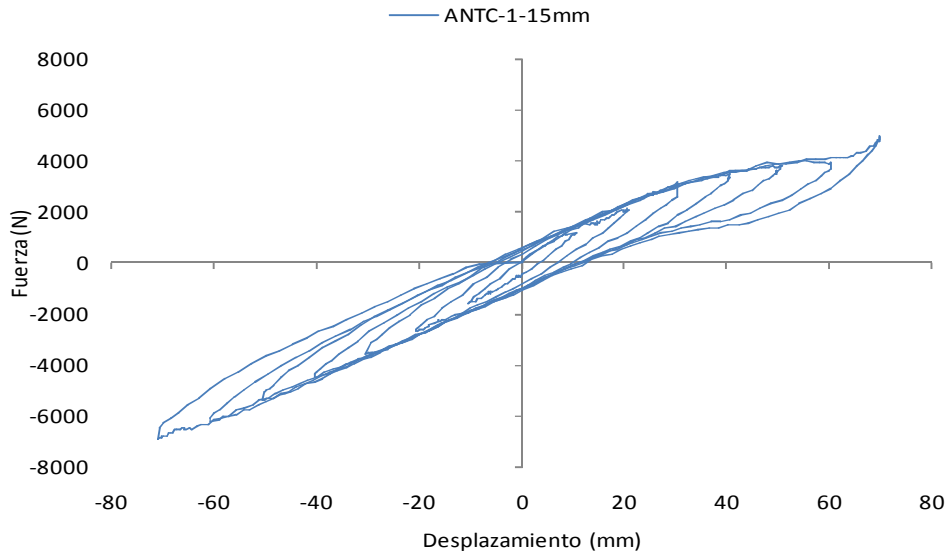


Figura 5.23. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-1-15mm

En la Figura 5.24 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de *tela cord* (ANTC-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 30 mm y una carga vertical de 18.000 N.

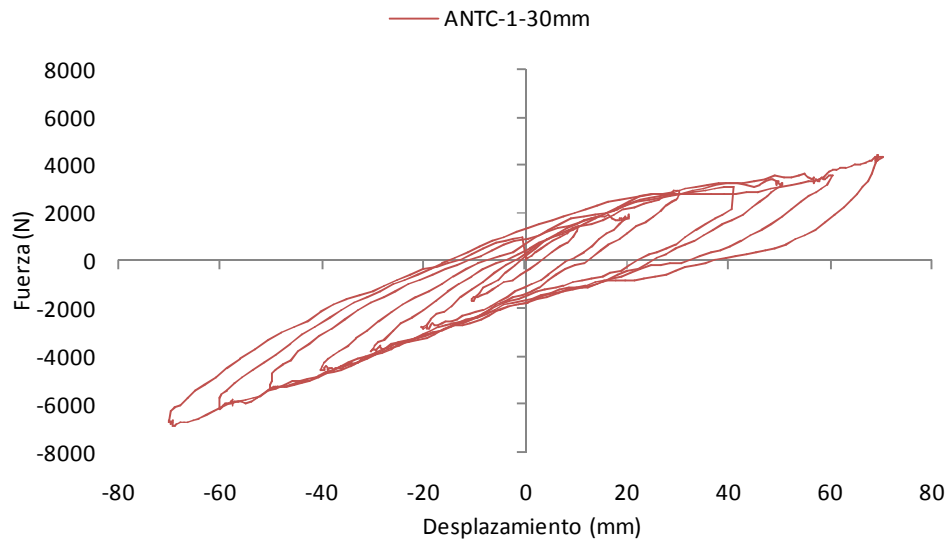


Figura 5.24. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-1-30mm

En la Figura 5.25 se muestran las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de *tela cord* (ANTC-1) para ambos desplazamientos verticales (15mm y 30mm).

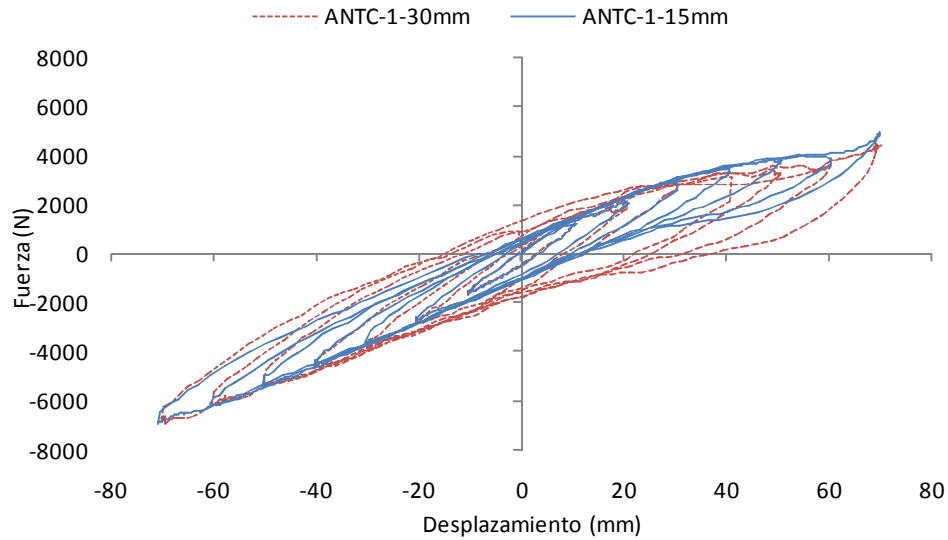


Figura 5.25. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm.

En la Figura 5.26 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de *tela cord* (ANTC-2). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y carga vertical de 12.800 N.

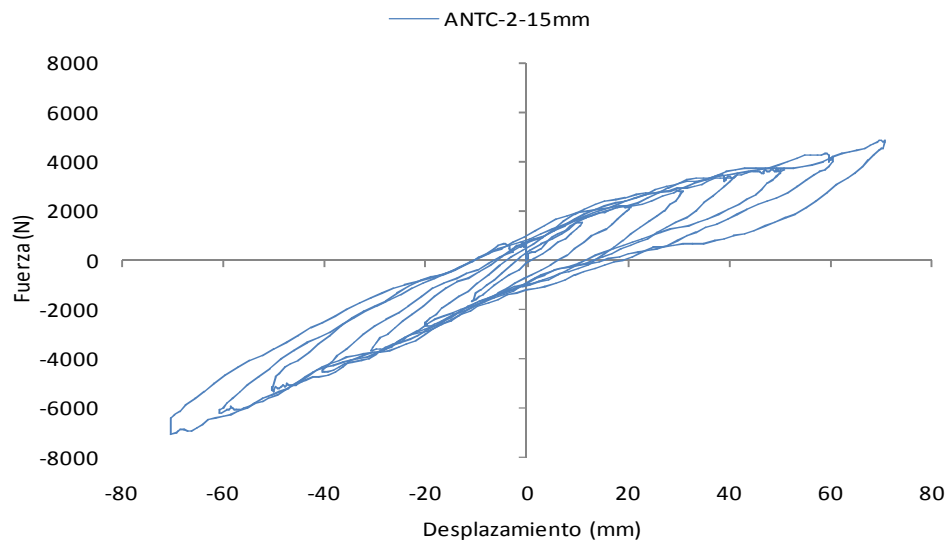


Figura 5.26. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANTC-2-15mm

En la Figura 5.27 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero con núcleo de acero fino (ANAF-1). La misma se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y carga vertical de 20.200 N.

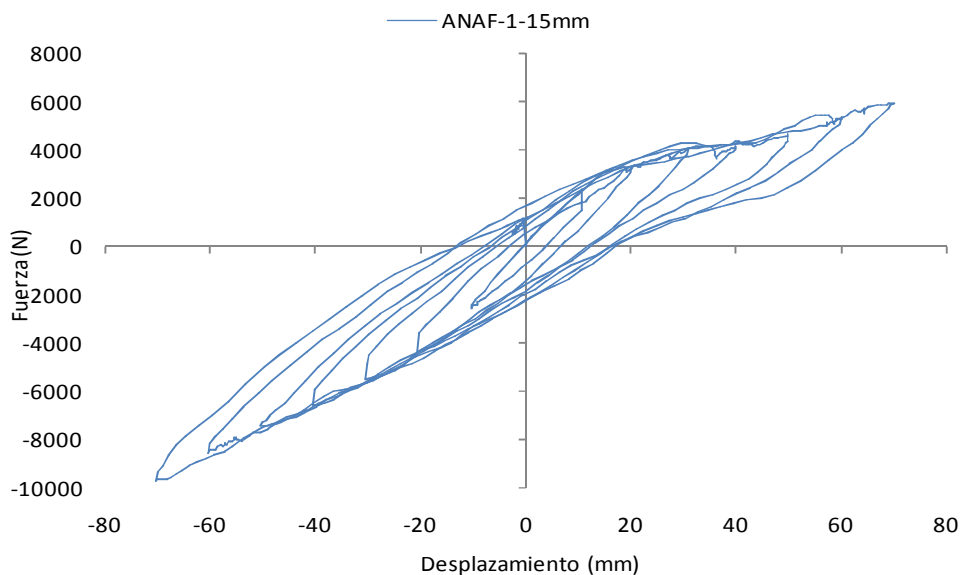


Figura 5.27. Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ANAF-1-15mm
 Los desplazamientos horizontales máximos se alcanzaron sin ningún tipo de falla en todos los prototipos de aisladores, situación que indica que los procesos de vulcanizados utilizados durante la fabricación de los mismos fueron los adecuados.

Para mayores desplazamientos verticales, como consecuencia de una mayor carga axial de compresión, las curvas fuerzas-desplazamientos horizontales, encierran áreas mayores, por lo tanto, es posible afirmar que existe una mayor disipación de energía.

La rigidez horizontal efectiva de los prototipos ensayados no presenta significativa degradación cuando se incrementa la carga vertical y la fuerza horizontal. La rigidez efectiva del aislador, se mantiene casi constante lo largo de todo el ensayo y para los escalones de cargas impuestas. La respuesta de los aisladores sujetos a cargas verticales y horizontales muestra una marcada no linealidad en los ciclos de carga y descarga.

En Tabla 5.2 se muestran parámetros característicos obtenidos de los ensayos a sollicitaciones axiales y horizontales cíclicas, los cuales serán de utilidad en el Capítulo VII para el análisis estructural de las viviendas.

Tabla 5.2. Parámetros característicos obtenidos de los ensayos experimentales.

		PROTOTIPOS DE AISLADORES										
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2	ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm
Fy	N	1654	1640	1545	1614	1577	1415	1580	1420	1480	1550	1685
Dy	Mm	10,33	9,80	9,36	9,80	10,35	9,90	8,50	10,10	10,30	10,75	11,90
Ku	N/mm	160,05	167,35	165,06	164,69	152,37	142,93	185,88	140,59	143,69	144,19	141,60

5.2.3. Determinación de la rigidez y el amortiguamiento efectivo de los prototipos

En este apartado se evalúa la rigidez y el amortiguamiento efectivo (Kelly, 1993, 1996) obtenidos de los dispositivos a partir de los ensayos experimentales indicados en el apartado precedente. A continuación, se describe el procedimiento realizado para uno de los prototipos ensayados, mientras que los resultados del resto de los prototipos se ordenan en el Anexo II. En la Figura 5.28 se muestra el área del ciclo histerético del prototipo ASNC-1-15mm.

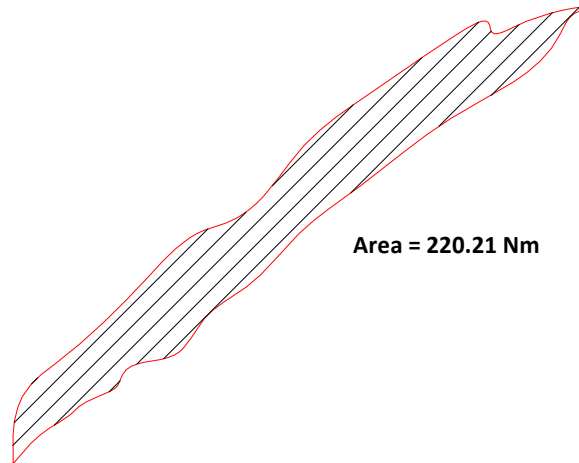


Figura 5.28. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-1-15mm.

A partir de la linealización armónica para evaluar la energía disipada por un sistema lineal, se determinan los parámetros que caracterizan a cada uno de los dispositivos estudiados. (Kelly, 1993, 1996).

Rigidez efectiva:

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 87,64 \text{ N/mm} \quad 5.2$$

$$F^+ = 3.709 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 60 \text{ mm}$$

$$F^- = -6.808 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -60 \text{ mm}$$

$$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 220.210 \text{ Nmm}$$

Energía elástica:

$$w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 157.755 \text{ Nmm} \quad 5.3$$

Amortiguamiento efectivo:

$$\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{220.210 \text{ Nmm}}{4 \pi 157.755 \text{ Nmm}} = 0,111 = 11,1\% \quad 5.4$$

En la Tabla 5.3 se muestra los resultados obtenidos para todos los prototipos del cálculo de la rigidez y el amortiguamiento efectivo realizado a partir de los ensayos experimentales. Donde W_o es el área del ciclo histerético; F^+ y F^- son las fuerzas máximas y mínimas obtenidas del ciclo histerético; Δ^+ y Δ^- son los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos del ciclo histerético; k_{eff} es la rigidez efectiva; W_e es energía elástica.

Tabla 5.3. Rigidez y amortiguamiento efectivo de los dispositivos, obtenidos a partir de los ensayos.

		PROTOTIPOS DE AISLADORES										
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2	ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm
W_o	Nmm	220210	400130	315590	442020	406180	361330	588490	261480	395290	327500	434650
F^+	N	3709	4000	5481	4759	4554	4736	5923	4926	4365	4863	5901
F^-	N	6808	6865	7236	7616	7348	6836	6665	6928	6793	7104	9730
Δ^+	mm	60,00	70,00	71,00	70,00	70,00	71,00	71,00	70,00	70,00	71,00	70,00
Δ^-	mm	60,00	71,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	71,00	70,00	70,00	70,00
k_{eff}	N/mm	87,64	77,06	90,19	88,39	85,01	82,07	89,28	84,07	79,70	84,87	111,65
W_e	Nmm	157755	188789	227328	216563	208285	206860	225022	205974	195265	213921	273543
ξ_{eff}	%	11,11	16,87	11,05	16,24	15,52	13,90	20,81	10,10	16,11	12,18	12,64

De los resultados obtenidos se deduce que el amortiguamiento efectivo encontrado, a partir de los datos de los ensayos experimentales, alcanzan valores más que aceptables (10% al 20%) y similares a otros aisladores elastoméricos convencionales que se comercializan en el mercado.

Para todos los prototipos ensayados se observa que, a mayor desplazamiento vertical, como consecuencia de una mayor carga axial de compresión, resultan mayores valores de amortiguamiento efectivo y por ende una mayor disipación de energía.

CAPÍTULO VI: VALIDACIÓN Y CALIBRACION DEL MODELO NUMÉRICO

6.1. Introducción

Con el objeto de validar los modelos numéricos que se correspondan con el dispositivo de aislamiento sísmico diseñado y fabricado, se estudia numéricamente la respuesta mecánica, considerando el comportamiento no lineal de los materiales componentes y la interacción entre ellos a partir de una combinación de cargas impuestas. Para ello se han empleado dos metodologías.

La primera es el modelo histerético de Wen (punto 6.2) con el cual se representa la ley constitutiva de los aisladores y se los compara con la obtenida de los ensayos experimentales. Para ello se emplea la plataforma comercial MatLab (MatLab, 2000).

En la segunda metodología se estudia el análisis numérico del aislador a través del modelo hiperelástico de Ogden (punto 6.3) para el cual se utiliza el código comercial Abaqus en el cual se modela el dispositivo de aislamiento en elementos finitos (Abaqus, 2003).

Cada una de las características de los modelos teóricos se describe en los correspondientes apartados.

6.2. Modelo histerético de Wen

Atento a un comportamiento altamente no lineal de aisladores elastoméricos, el modelo histerético de Wen (Bozzo, 1996; Ordoñez, 1996; Wen, 1976) se utiliza para representar principalmente la respuesta del dispositivo de aislamiento en base no lineal. El modelo descompone la reacción elastoplástica en una componente directamente proporcional al desplazamiento y otra dependiente de una variable z . La fuerza de restauración f , se define mediante la siguiente expresión:

$$f = \alpha k_i q_b + (1 - \alpha) k_i z \quad 6.1$$

Donde $\alpha = k_i / k_n$ es un parámetro que indica el grado de no linealidad del sistema (por ejemplo $\alpha = 1$ representa un sistema lineal) y z es un parámetro histerético que satisface a la ecuación diferencial no lineal de primer orden (Bozzo, 1996; Ordoñez, 1996; Wen, 1976):

$$z = A q_b - \left(\beta q_b |z|^n + \gamma |q_b| |z|^{n-1} z \right) \quad 6.2$$

Los parámetros A , α , β , γ , n , de las ecuaciones (6.1 y 6.2) son números adimensionales y regulan cada una de las características del comportamiento del modelo por lo tanto, representan los diferentes tipos comportamientos no lineales (Bozzo, 1996; Ordoñez, 1996; Wen, 1976). El significado de los parámetros es:

A : Factor de escala general.

α : Razón entre la rigidez pre y pos-fluencia.

β , γ : Determinan la forma de la curva.

n : Regula la suavidad de la transición entre la región lineal y la no lineal.

q_b : desplazamiento de fluencia.

La influencia que tienen los parámetros β y γ en la variable Z se puede visualizar al trazar la gráfica de dicha variable versus el desplazamiento, con una sollicitación externa de tipo periódica (sinusoidal a través del tiempo) que afecta a un oscilador de un grado de libertad, en el cual se incluye la fuerza restauradora representada por el modelo de Wen. (Ordoñez, 1996)

A modo de ejemplo en la Figura 6.1 se puede visualizar el comportamiento histerético que representan los parámetros $\beta = 0,5$ y $\gamma = 0,5$.

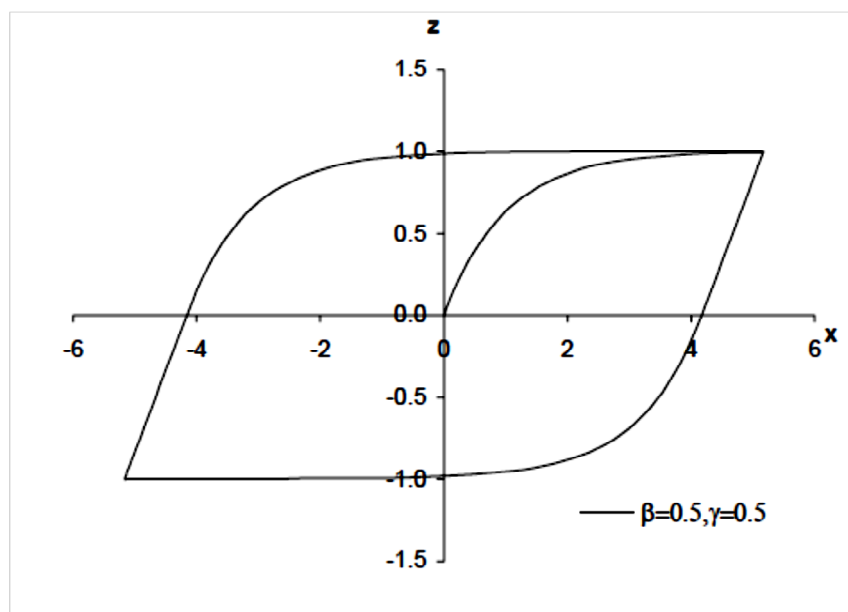


Figura 6.1. Curva histerética de Z versus x con $\beta = 0.5$ y $\gamma = 0.5$.

El parámetro n tiene un intervalo de variación entre $[1, +\infty]$ y el mismo controla la suavidad de las curvas entre la región pre y pos fluencia. Cuanto más alto sea el valor utilizado, mayor es la curva de transición y el valor de Z toma un valor muy cercano a 1 tal cual se observa en la Figura 6.2 (Ordoñez, 1996; Wen, 1976). Para eliminar completamente la porción curva y con ello representar al modelo bilineal, el valor de $n \rightarrow +\infty$. En la práctica se ha observado

que es suficiente tomar valores de n del orden de 50 para obtener la representación del modelo bilineal (Wilson E. L.2002).

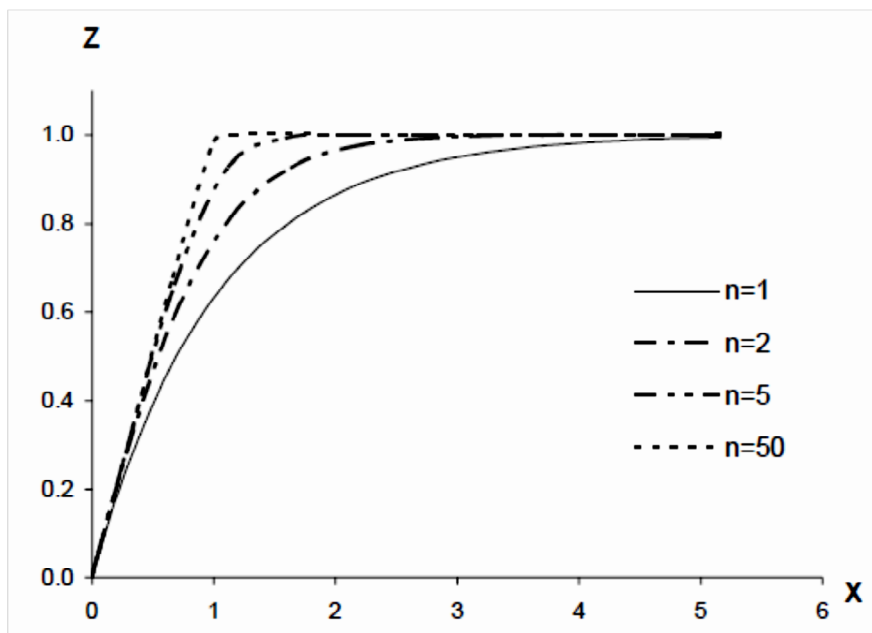


Figura 6.2. Comportamiento de la variable z con $A = 1$, $\alpha = 0.6$, $\beta = \gamma = 0.5$, y distintos valores de n .

Con respecto a los valores más comunes de los parámetros utilizados para la modelación de aisladores del tipo elastoméricos, algunos trabajos recomiendan $A = 1$, $\beta = -0.54$ y $\gamma = 1.4$. (Bozzo, 1996). Para la mayoría de los autores el valor más representativo para estimar la curva de transición es $n = 1$ aunque en los programas SAP2000 y ETABS se utiliza una variante bidireccional del modelo que es equivalente a la fórmula de Wen pero con $n = 2$ (Wilson, 2002).

Los Programas SAP2000 y ETABS tienen incorporado el modelo de Wen como elemento no lineal mediante las siguientes relaciones de equivalencia (Wilson, 2002):

La relación no lineal fuerza-deformación o fuerza restauradora es:

$$f = r k_i d + (1-r) f_y z \quad 6.3$$

Donde:

k_i : Rigidez inicial

d : Deformación

f_y : Fuerza de fluencia

r : Radio de fluencia: es la relación entre la rigidez de post-fluencia y la rigidez inicial k_i

z : variable histerética, con intervalo de variación de $-1 \leq z \leq 1$, el valor inicial de z es cero y z responde a la siguiente ecuación diferencial:

$$z = \frac{k_i}{f_y} \left\{ \begin{array}{l} d(1 - |z|^e) \Rightarrow d_z > 0 \\ d \Rightarrow d_z < 0 \end{array} \right. \quad 6.4$$

Donde e es el parámetro de transición de la fase elástica a la inelástica (igual a n). La ecuación (6.4) es equivalente al modelo de Wen para $A = 1$, $\beta = 0.5$ y $\gamma = 0.5$ (Figura 6.1).

6.2.1. Constitutiva de YIK WEN para evaluar comportamientos elastoplásticos

Si se tiene un diagrama de fuerza - deformación como el que indica la Figura 6.3, se pueden definir dos parámetros adimensionales (6.5) y (6.6):

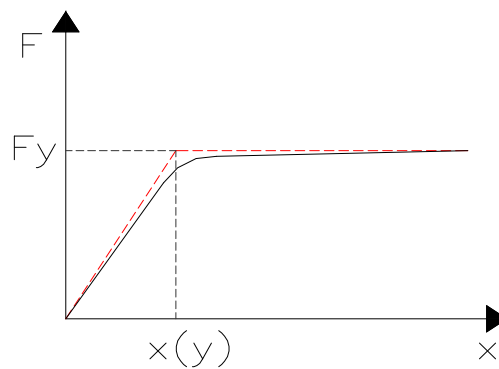


Figura 6.3. Constitutiva fuerza-deformación elastoplástica.

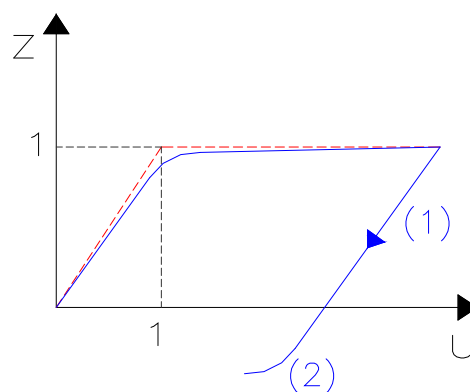


Figura 6.4. Constitutiva fuerza deformación elastoplástica adimensional.

$$Z = \frac{F}{F_y} \Rightarrow F = Z F_y \quad 6.5$$

$$U = \frac{x}{x_{(y)}} \Rightarrow x = U x_{(y)} \quad 6.6$$

Con estos dos parámetros la constitutiva dada por la Figura 6.3 se transforma en adimensional tomando la forma de la Figura 6.4. Y. Wen, define la siguiente relación:

$$\frac{dz}{du} = 1 - |Z|^n \quad 6.7$$

Cuando: $n \Rightarrow \infty \Rightarrow$ la constitutiva es bilineal

El valor más comúnmente utilizado es $n = 2$, entonces:

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \Rightarrow \int \frac{dz}{1 - Z^2} = \int du \quad 6.8$$

$$\operatorname{arctgh}(z) = u \quad ; \quad z = \operatorname{tgh}(u)$$

La expresión (6.8) da solución al hecho de que cuando crece Z , el valor tiende a uno (1), este efecto es como degradar la rigidez, porque aumenta Z . Para producir la descarga de la rama (1) se la multiplica por el $\operatorname{sign}(\dot{U})$.

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \operatorname{sign}(\dot{U})$$

Para volver a degradar la rigidez y pasar a la rama (2), la expresión es la siguiente:

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z)$$

Para regular la pendiente, tal que no decaiga con $\frac{dz}{du} = 2 \underbrace{\left(\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \operatorname{sign}(\dot{U}) \right)}_{=1}$ se hace:

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \quad =2$$

Dónde: $\beta; \gamma$, son factores que pueden tomar valores aproximados a 0.50.

Por ejemplo: $\beta + \gamma = 0,50 + 0,50 = 1,00$

$$\beta + \gamma = 0,70 + 0,30 = 1,00$$

Al cambiar los valores de los parámetros cambian las pendientes de la constitutiva.

Para ponerlo en un formato que sea sencillo trabajar con la constitutiva de Wen, se utiliza la expresión siguiente:

$$dz = \left\{ 1 - Z^2 \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \right\} du$$

Se divide por dt :

$$\frac{dz}{dt} = \left\{ 1 - Z^2 \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \right\} \frac{du}{dt}$$

$$\dot{Z} = \left\{ 1 - Z^2 \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \right\} \dot{U} \quad 6.9$$

Nótese que la expresión (6.9) tiene la forma de $y = f(y)$

Formulación en Espacio Estado:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \alpha Kx + (1 - \alpha)Fy Z = -m r \ddot{y}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\alpha K}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \ddot{y} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{(1 + \alpha)Fy Z}{m} \end{bmatrix}$$

↓
Inicialmente este valor es cero, porque $Z = 0$

Para programar la constitutiva en una rutina de MatLab:

$$\begin{aligned} & \dot{X}_{(1)} \dot{X}_{(2)} \\ & \dot{X}_m = \frac{\dot{X}_{(K)} + \dot{X}_{(K+1)}}{2} \\ & \dot{U} = \frac{\dot{X}_m}{x(y)} \Rightarrow \text{ode } Z_{(K+1)} \end{aligned}$$

El *ode* de MatLab entrega la respuesta de la Constitutiva de WEN.

Lo desarrollado precedentemente corresponde a un análisis unidireccional. Para un planteo bidireccional el sistema de ecuaciones se modifica en:

for $i = 1:n$ % $n =$ número de aisladores

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_X \\ \dot{Z}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_x^2 \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] & Z_y Z_x \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] \\ Z_y Z_x \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] & Z_y^2 \left[\beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_X \\ \dot{U}_Y \end{bmatrix}$$

6.2.2. Calibración de los parámetros del modelo de Wen

Para calibrar los parámetros del modelo numérico de Wen se utiliza el código comercial MatLab. Para llevar a cabo esta tarea se emplea la rutina de trabajo que se muestra en el Anexo III (MatLab, 2010). La influencia que tienen los parámetros se puede visualizar para una input externo vibratorio en el tiempo, para tal fin se utilizó el acelerograma del terremoto de Cauce. El resto de los parámetros a ingresar en la rutina se obtienen de los ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas realizados a los dispositivos elastoméricos. Como ejemplo, para la rutina mostrada en el anexo, los datos incorporados corresponden al prototipo ASNC-1-15mm.

En la Tabla 6.1 se observan los parámetros correspondientes al modelo de Wen que se utilizaron en la calibración numérica de cada prototipo de aislador ensayado.

Tabla 6.1. Parámetros correspondientes al modelo numérico de Wen.

		PROTOTIPOS DE AISLADORES											
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2		ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm	
F_{vert}	N	49050	49050	49050	49050	49050	49050	49050	49050	49050	49050	49050	
m	kg	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	
k	N/mm	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
F_y	N	2600	2600	2700	2600	2600	2600	2700	2600	2700	2600	2600	
X_y	mm	34,00	37,00	38,00	35,00	37,00	35,00	37,00	36,00	37,00	36,00	40,00	
α		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
β		0,12	0,13	0,11	0,14	0,13	0,14	0,16	0,11	0,13	0,11	0,13	
γ		0,88	0,87	0,89	0,86	0,87	0,86	0,84	0,89	0,87	0,89	0,87	

6.2.3. Resultados de la calibración

Para evaluar el grado de aproximación, se comparan los ciclos histeréticos obtenidos con el modelo numérico de Wen y los generados a partir de los ensayos experimentales, para cada uno de los prototipos. En tal sentido es necesario aclarar que los ciclos histeréticos de los ensayos experimentales no presentan simetrías debido a condiciones inevitables del utillaje utilizado en los ensayos, mientras que los obtenidos a partir del modelo de Wen son simétricos y de curvas más suaves. La no simetría de los ensayos experimentales responde a factores operativos de la aplicación de la carga horizontal en los dispositivos de aislamiento. Igualmente la aproximación, en principio, cualitativa de ambos ciclos es satisfactoria para todos los casos. En las Figuras siguientes se muestran superpuestos los ciclos histeréticos del

ensayo y las obtenidas para el modelo de Wen para cada prototipo de aislador elastomérico ensayado.

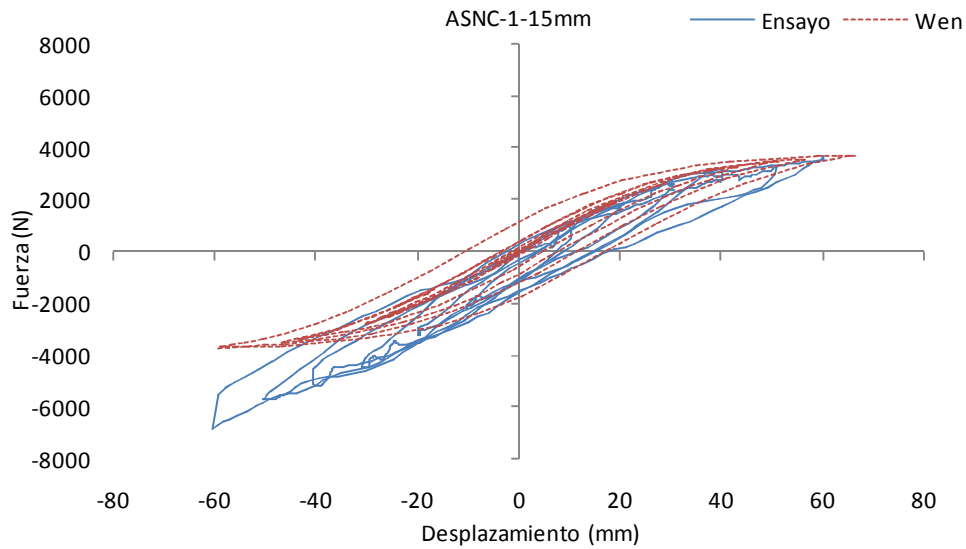


Figura 6.5. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-1-15mm.

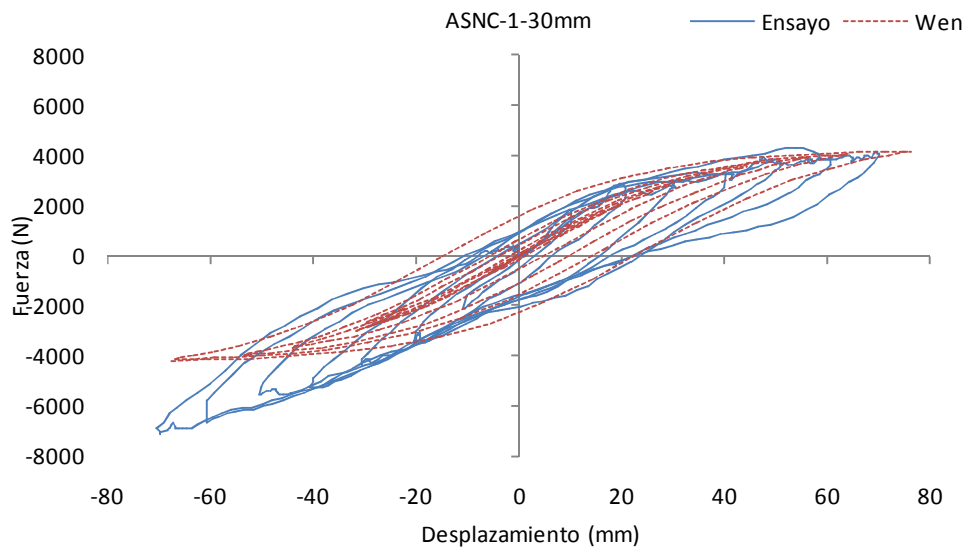


Figura 6.6. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-1-30mm.

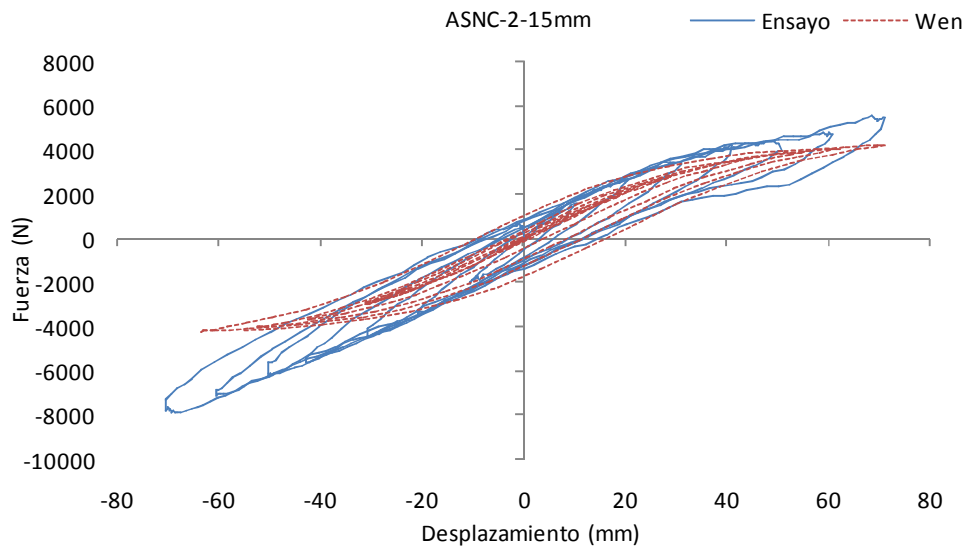


Figura 6.7. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-2-15mm.

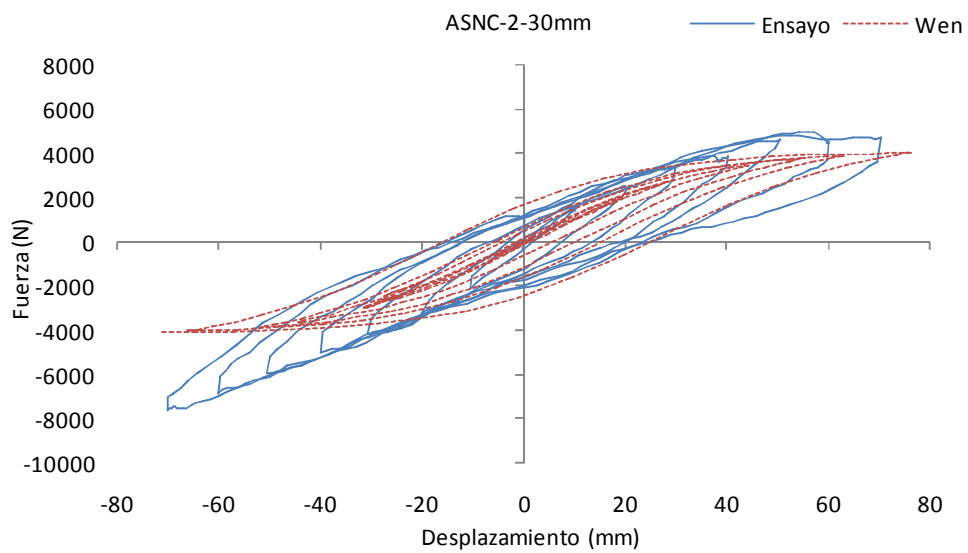


Figura 6.8. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-2-30mm.

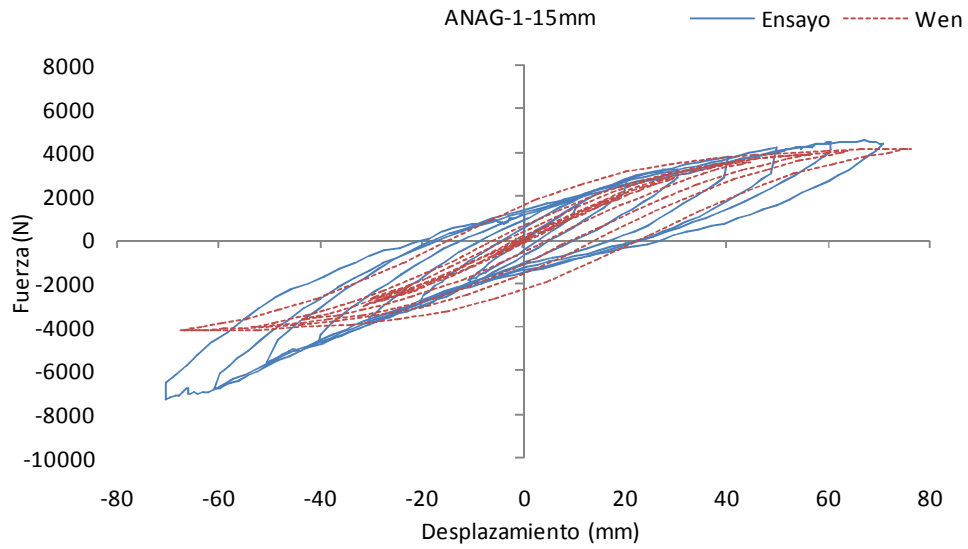


Figura 6.9. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAG-1-15mm.

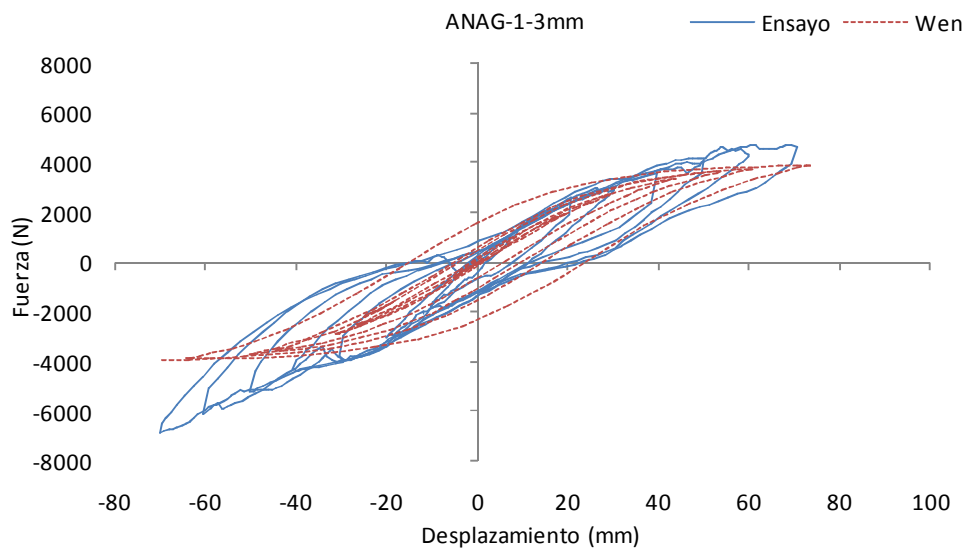


Figura 6.10. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAG-1-3mm.

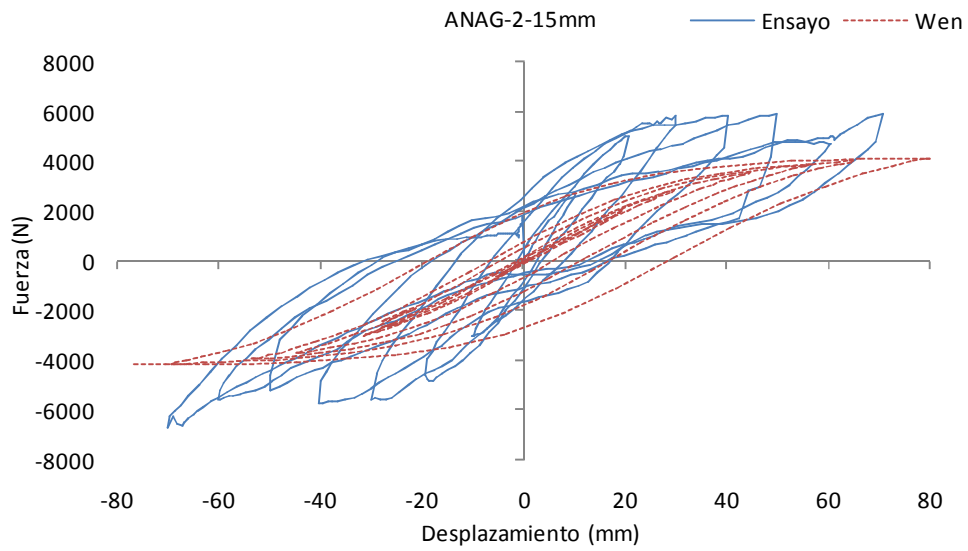


Figura 6.11. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAG-2-15mm.

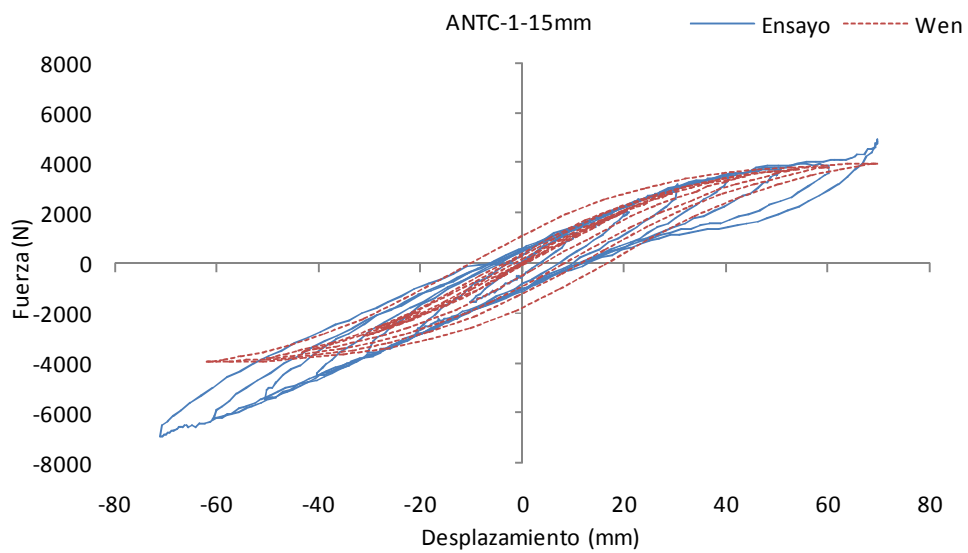


Figura 6.12. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANTC-1-15mm.

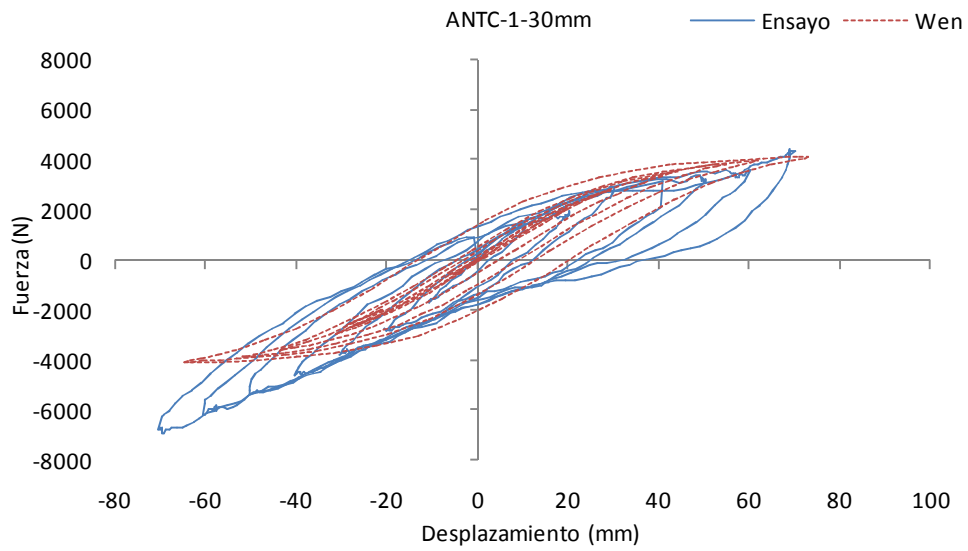


Figura 6.13. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANTC-1-30mm.

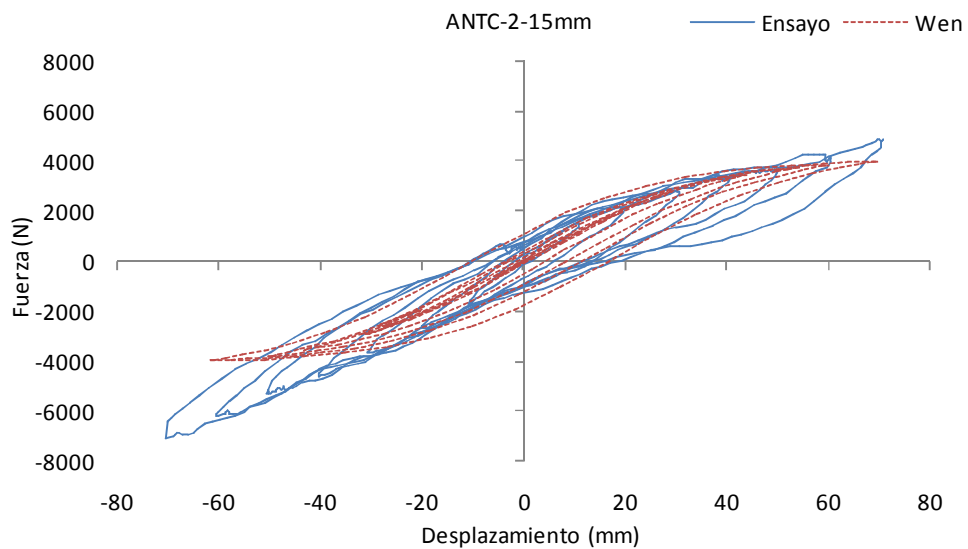


Figura 6.14. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANTC-2-15mm.

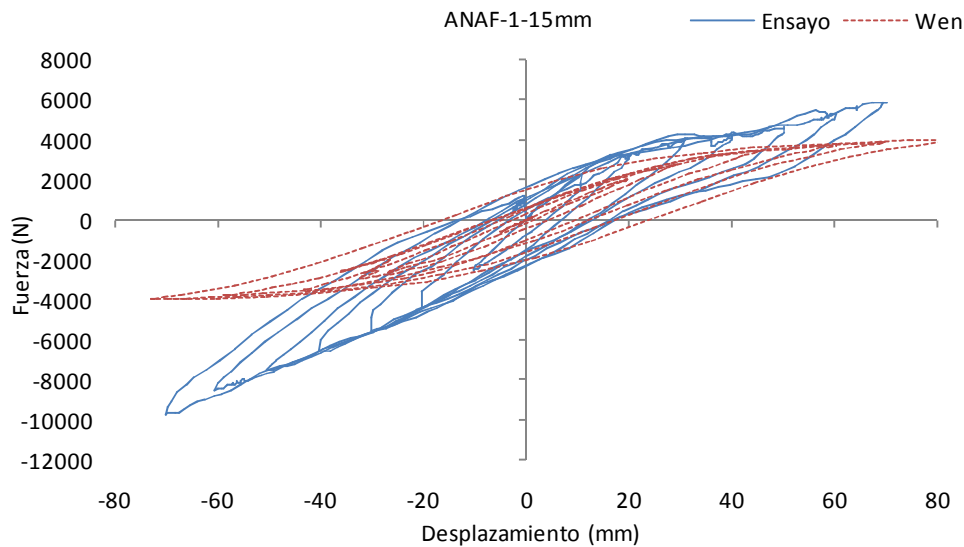


Figura 6.15. Comparación de los ciclos histéricos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ANAF-1-15mm.

Con el objeto de realizar un análisis comparativo, ahora cuantitativo, se determinan de los ciclos histéricos generados a partir del modelo numérico de Wen, la rigidez y amortiguamiento efectivos teóricos (Tornello, 2007). A continuación, se describe el procedimiento realizado para uno de los casos estudiados, la determinación de los parámetros para el resto de los dispositivos se muestran en el Anexo II. En la Figura 6.16 se observa la envolvente del área del ciclo histérico generado para el prototipo ASNC-1-15mm.

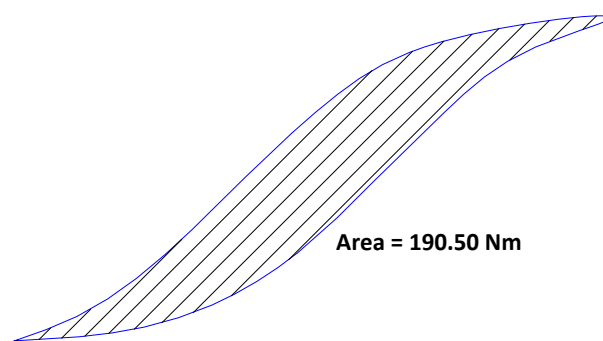


Figura 6.16. Área del ciclo histérico obtenida del modelo de Wen ASNC-1-15mm.

Rigidez efectiva:
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 59,42 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 3.714 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 66 \text{ mm}$$

$$F^- = -3714 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -59 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 190.500 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 129.430 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{190.500 \text{ Nmm}}{4 \pi 129.430 \text{ Nmm}} = 0,117 = 11,70\%$$

En la Tabla 6.2 se ordenan los valores de amortiguamientos efectivos obtenidos a partir de los ensayos (ξ_{eff}) y los generados con el modelo numérico de Wen (ξ_{eff}). A partir de los resultados mostrados, se puede concluir que el modelo numérico seleccionado, queda adecuadamente validado en cuanto área de ciclo histerético y amortiguamiento efectivo. En cambio este modelo no representa la rigidez post-fluencia, que si se visualiza en los ensayos experimentales (Figuras 6.5 a 6.15).

Tabla 6.2. Comparación del amortiguamiento efectivo obtenido a partir de los ensayos (ξ_{eff}) y del obtenido del modelo numérico de Wen (ξ_{eff}).

		PROTOTIPOS DE AISLADORES										
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2	ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm
W_o	Nmm	220210	400130	315590	442020	406180	361330	588490	261480	395290	327500	434650
F^+	N	3709	4000	5481	4759	4554	4736	5923	4926	4365	4863	5901
F^-	N	6808	6865	7236	7616	7348	6836	6665	6928	6793	7104	9730
Δ^+	Mm	60,00	70,00	71,00	70,00	70,00	71,00	71,00	70,00	70,00	71,00	70,00
Δ^-	Mm	60,00	71,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	71,00	70,00	70,00	70,00
k_{eff}	N/mm	87,64	77,06	90,19	88,39	85,01	82,07	89,28	84,07	79,70	84,87	111,65
W_e	Nmm	157755	188789	227328	216563	208285	206860	225022	205974	195265	213921	273543
ξ_{eff}	%	11,1	16,9	11,0	16,2	15,5	13,9	20,8	10,1	16,1	12,2	12,6
W_{ot}	Nmm	190500	357300	220860	333500	331440	268320	444890	193960	317140	214960	309190
F_t^+	N	3714	4183	4219	4050	4186	3899	4158	4001	4119	4001	4633
F_t^-	N	3714	4183	4181	4059	4183	3910	4171	3958	4072	3956	4586
Δ_t^+	Mm	66,00	76,00	70,00	76,00	76,00	73,00	79,00	69,00	73,00	69,00	83,00
Δ_t^-	Mm	59,00	67,00	64,00	71,00	67,00	69,00	77,00	62,00	64,00	62,00	73,00
$k_{eff t}$	N/mm	59,42	58,50	62,69	55,16	58,52	54,99	53,39	60,76	59,79	60,74	59,10
W_{et}	Nmm	129425	168958	153582	159312	169019	146529	166607	144629	159306	144593	203557
$\xi_{eff t}$	%	11,7	16,8	11,4	16,7	15,6	14,6	21,2	10,7	15,8	11,8	12,1

Donde W_o es el área del ciclo histerético; F^+ y F^- son las fuerzas máximas y mínimas obtenidas del ciclo histerético; Δ^+ y Δ^- son los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos del ciclo histerético; k_{eff} es la rigidez efectiva; W_e es energía elástica. Estos parámetros corresponden a los obtenidos a partir de los ensayos, los mismos pero con subíndice t al final, se han generado a partir del modelo numérico.

Las rigideces efectivas de la Tabla 6.2, han sido determinadas con los valores experimentales de F^+ y F^- , los cuales no son simétricos debido a las limitaciones impuestas por el sistema de aplicación de las cargas sobre los aisladores. En la Tabla 6.3 se muestran las rigideces efectivas de los ensayos experimentales despreciando el efecto de la asimetría, la rigideces efectivas obtenidas del modelo de Wen y la diferencia porcentual entre ambas. Los resultados indican que en seis de los ocho casos estudiados las diferencias son menores al 20%.

Tabla 6.3. Comparación de la rigidez efectiva obtenido a partir de los ensayos (K_{eff}) y de la obtenida del modelo numérico de Wen (K_{effi}).

		PROTOTIPOS DE AISLADORES										
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2	ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm
F^+	N	3709	4000	5481	4759	4554	4736	5923	4926	4365	4863	5901
F^-	N	3709	4000	5481	4759	4554	4736	5923	4926	4365	4863	5901
k_{eff}	N/mm	61,82	56,74	77,74	67,99	65,06	67,18	84,01	69,87	62,36	68,98	84,30
F^+_t	N	3714	4183	4219	4050	4186	3899	4158	4001	4119	4001	4633
F^-_t	N	3714	4183	4181	4059	4183	3910	4171	3958	4072	3956	4586
$k_{eff t}$	N/mm	59,42	58,50	62,69	55,16	58,52	54,99	53,39	60,76	59,79	60,74	59,10
err	%	3,87	3,02	19,37	18,86	10,04	18,14	36,45	13,05	4,12	11,94	29,90

6.3. Análisis numérico del aislador con del modelo hiperelástico de Ogden

Para la modelación numérica del aislador se ha utilizado el código comercial Abaqus (Abaqus, 2003). En función del tiempo computacional que implica el uso de esta herramienta, el análisis se realizó solamente para el prototipo ASNC (aislador sin núcleo confinado) sin embargo, la aplicación de la herramienta computacional ha permitido definir una metodología de trabajo que es también válida para los otros dispositivos.

En el modelo se ha representado el ensayo experimental para un desplazamiento vertical de 30 mm y 7 ciclos de desplazamientos horizontales de +/- 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm y 70 mm.

El modelo de elementos finitos fue restringido a los desplazamientos en tres direcciones. La restricción se impuso en la parte inferior del aislador, en coincidencia con la pletina de conexión inferior, teóricamente en contacto con la estructura de fundación.

Para generar el modelo se emplean elementos sólidos deformables en tres dimensiones. Los contactos entre superficies de las placas de acero y taco de goma se definieron con la opción de ABAQUS *surface-surface*, especificando superficies maestras (*master*) y esclavas (*slave*), las cuales tienen la característica de que la superficie maestra no puede ser penetrada por la superficie esclava.

La interacción de las superficies fue definida para un comportamiento longitudinal y transversal, para el primero se especificó un comportamiento de contacto rígido o duro (*Hard Contact*), y para el segundo se definió un contacto de fricción. En la Figura 6.17 se observa el modelo de elementos finitos generado para el aislador estudiado.

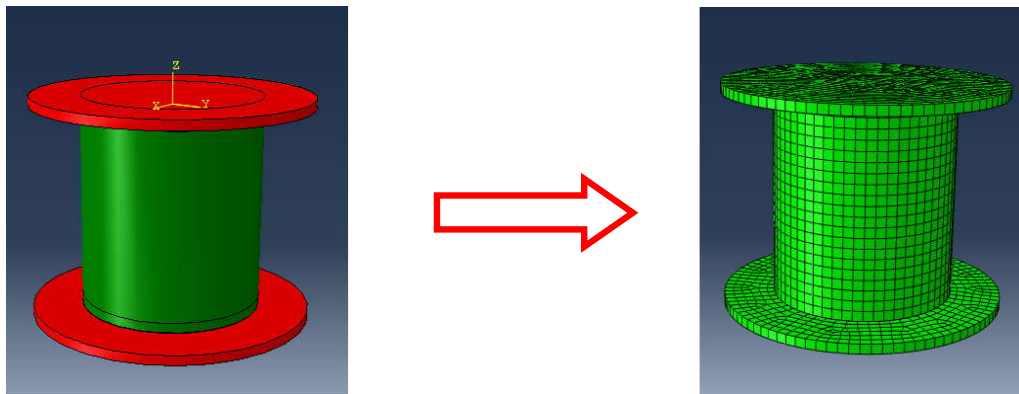


Figura 6.17. Modelo de elementos finitos utilizado en la plataforma ABAQUS.

En la Figura 6.18 se observa el modelo del aislador elastomérico deformado bajo carga axial con deformación vertical controlada. Las respuestas medidas se compararon con los resultados obtenidos experimentalmente. La Figura 6.18, muestra la similitud de respuesta entre el modelo y los ensayos.

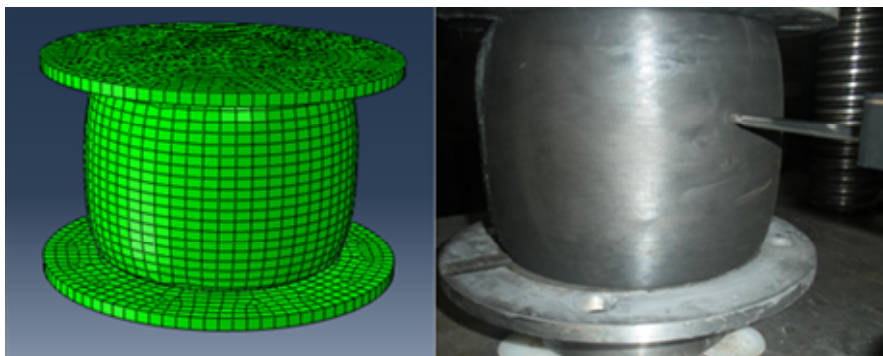


Figura 6.18. Comparación de la respuesta a carga axial de compresión para el modelo numérico y el ensayo experimental.

6.3.1. Parámetros de los materiales utilizados en el modelo

Los materiales utilizados para la modelación fueron goma y acero. Para el acero se utilizó un modelo elástico isotrópico con un módulo de elasticidad $E=210000 \text{ MPa}$. Para el elastómero se utilizó el modelo hiperelástico de Ogden (Ogden, 1984). Los parámetros correspondientes al modelo de Ogden se obtuvieron experimentalmente y en forma simultánea mediante ensayos de tracción, compresión y corte, los mismos se resumen en la Tabla 6.4 (Weinberg, 2010). Se utilizó para el módulo volumétrico un valor de $k = 10000 \text{ MPa}$, se observa que con dicho parámetro los resultados numéricos describen una respuesta prácticamente incompresible.

Tabla 6.4. Parámetros correspondientes al modelo de Ogden.

Constantes (MPa)						
Compuesto	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3
Goma	10	0,012	-0,1	1,3	5	-2

6.3.2. Modelo hiperelástico utilizado para el elastómero.

El modelo constitutivo utilizado para simular el comportamiento del elastómero está basado en la función de energía propuesta por Ogden (Ogden, 1984; Núñez et al., 2005; Bellomo et al., 2008).

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad 6.10$$

Donde N es un número entero positivo y μ_i, α_i son parámetros del material que se determinan en base a una serie de ensayos experimentales (Weinberg, 2010). Las deformaciones están parametrizadas por los estiramientos principales λ_A dado por la siguiente expresión:

$$\lambda_A = (\text{eig}_A(C))^{1/2} = (\text{eig}_A(B))^{1/2} \quad 6.11$$

Donde los autovalores se obtienen a partir del tensor derecho de Cauchy-Green C ó del tensor izquierdo de Cauchy-Green B. Debido a la cuasi-incompresibilidad que presentan los elastómeros se realiza una descomposición multiplicativa del tensor gradiente de deformación en sus partes volumétrica (F_{vol}) y desviadora (F).

$$F = F_{vol} \bar{F} \quad F_{vol} = J^{1/3} I, \quad \bar{F} = J^{-1/3} F \quad 6.12$$

Donde $J = \det[F] = \det[F_{vol}]$, $\det[\bar{F}] = 1$. En adelante, una variable sobre-lineada ($\bar{\cdot}$) indica que se trata de la parte desviadora de la misma.

Mediante esta descomposición, la energía de deformación se puede expresar a través de una descomposición aditiva de sus partes volumétrica y desviadora:

$$W = W(J) + \bar{W}(\bar{C}) \quad 6.13$$

Donde C es la parte desviadora del tensor derecho de Cauchy-Green, $C = FTF$. Asociada con la deformación volumétrica se tiene, en la configuración actualizada, una presión hidrostática p , dada por:

$$p = W'(J) \quad 6.14$$

Aplicando la descomposición indicada en la ecuación (6.12) el equivalente de la (6.13), en estiramientos principales, resulta:

$$W(\lambda_i) = W(J) + W^*(\lambda_i^*) \quad 6.15$$

Donde $W(J)$ describe la energía libre asociada al cambio de volumen del sólido y $W^*(\lambda_i^*)$ la asociada a las deformaciones isocóricas (a volumen constante).

El potencial en función de los estiramientos modificados se expresa como:

$$W^*(\lambda_i^*) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{*\alpha_i} + \lambda_2^{*\alpha_i} + \lambda_3^{*\alpha_i} - 3) \quad \lambda_i^* = J^{-1/3} \lambda_i \quad 6.16$$

Partiendo de la derivación de la función de energía dada por la ecuación (6.15) y aplicando la regla de la cadena se obtiene el segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff S :

$$S = 2 \sum_{A=1}^3 \frac{\partial W^*(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)}{\partial \lambda_A} \frac{\partial (\lambda_A)^2}{\partial C} \frac{1}{\lambda_A} + JW'(J)C^{-1} \quad 6.17$$

En la ecuación (6.17) la tensión total S resulta desacoplada en sus partes desviadora \bar{S} y volumétrica S_v dadas, respectivamente, por:

$$\bar{S} = 2 \sum_{A=1}^3 \frac{\partial W^*(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)}{\partial \lambda_A} \frac{\partial (\lambda_A)^2}{\partial C} \frac{1}{\lambda_A} \quad S_v = JW'(J)C^{-1} \quad 6.18$$

El tensor C puede escribirse aplicando descomposición polar, como:

$$C = \sum_{A=1}^3 \lambda_A N_A \otimes N_A \quad 6.19$$

Donde λ_A son, como se expresó anteriormente, los estiramientos principales y N_A son los respectivos autovectores (Simo, 1993). De la ecuación (6.19) se obtiene:

$$\frac{\partial (\lambda_A)^2}{\partial C} = N_A \otimes N_A \quad 6.20$$

Donde $\{N1, N2, N3\}$ son ortogonales y definen un sistema rectangular de vectores unitarios.

Finalmente resulta:

$$\frac{\partial W^*(\lambda_i^*)}{\partial \lambda_A} = \sum_{i=1}^N \mu_i J^{1/3} (\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3}(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i})) \quad 6.21$$

Si se reemplazan las ecuaciones (6.20) y (6.21) en la ecuación (6.18), se obtiene para la parte desviadora del tensor de tensiones, la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \sum_{A=1}^3 \left(\sum_{i=1}^N \mu_i J^{-\alpha_i/3} (\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3}(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i})) \right) N_A \otimes N_A \frac{1}{\lambda_A} \quad 6.22$$

Procediendo en forma análoga, se puede expresar la parte desviadora del tensor de tensiones de Cauchy σ en la forma:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{J} \sum_{A=1}^3 \left(\sum_{i=1}^N \mu_i J^{-\alpha_i/3} (\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3}(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i})) \right) \frac{1}{\lambda_A} F N_A \otimes N_A F^T \quad 6.23$$

Se han propuesto varias expresiones para caracterizar la energía interna asociada al cambio de volumen (Crisfield, 1996). La expresión utilizada en el desarrollo del trabajo de la tesis está dada por:

$$W(J) = \frac{1}{2} k (J - 1)^2 \quad 6.24$$

Donde k es el módulo volumétrico del material en la configuración de referencia. Teniendo en cuenta la ecuación (6.24) y considerando S_v positiva para compresión se obtiene:

$$S_v = -Jk(J - 1)C^{-1} \quad 6.25$$

Las expresiones finales de las tensiones, en las configuraciones de referencia y actualizada, resultan respectivamente dadas por:

$$S = \sum_{A=1}^3 \left(\sum_{i=1}^N \mu_i J^{-\alpha_i/3} (\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3}(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i})) \right) N_A \otimes N_A \frac{1}{\lambda_A} - Jk(J - 1)C^{-1} \quad 6.26$$

6.3.3. Resultados obtenidos

Para el prototipo modelado en Abaqus con las condiciones descritas en los puntos anteriores, se obtuvo la relación fuerza- desplazamiento que se muestra en la Figura 6.19. En la Figura 6.20 se observan superpuestas las relaciones fuerza – desplazamiento generada con el modelo numérico en Abaqus y la obtenida del ensayo experimental, como se observa, ambos ciclos histeréticos presentan una muy buena aproximación cualitativa.

Otro aspecto a destacar es que las fuerzas y desplazamientos máximas y mínimas son similares a los obtenidos en los ensayos experimentales. Recordemos que los ciclos histeréticos de los ensayos no presentan simetrías (ver punto 6.2.3), mientras que el logrado a partir del modelo numérico es simétrico en su desarrollo histerético.

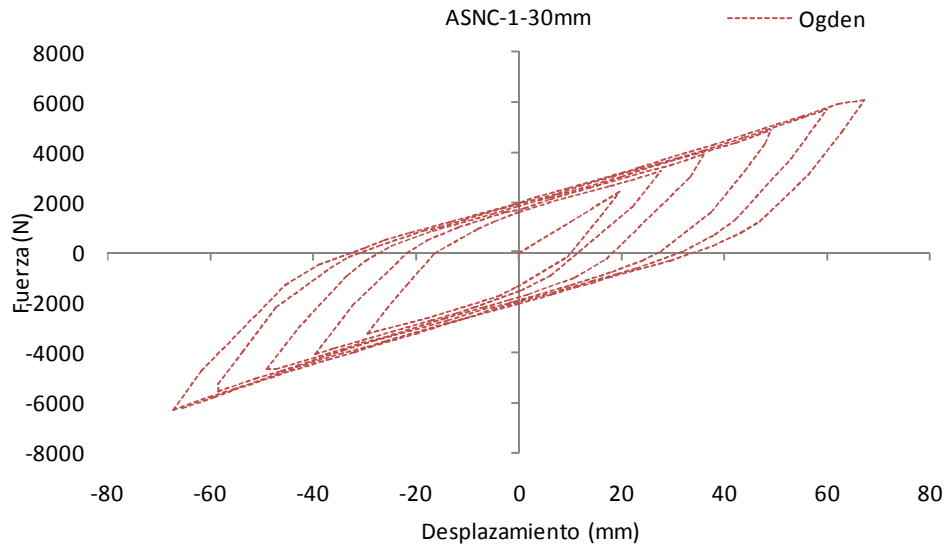


Figura 6.19. Ciclo histerético obtenidos a partir del modelo numérico de Ogden en Abaqus para el aislador ASNC-1-30mm.

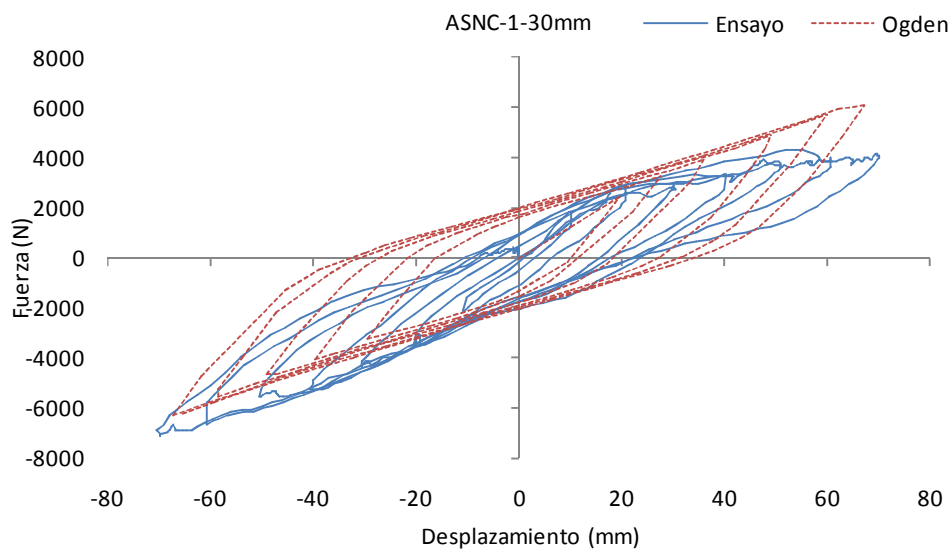


Figura 6.20. Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico de Ogden en Abaqus para el aislador ASNC-1-30mm.

En las Figuras 6.21, 6.22 y 6.23 se muestran la distribución de tensiones axiales y de corte S11, S33 y S12, para el modelo hiperelástico de Ogden del prototipo analizado, y para las acciones externas máximas que se reproducen del ensayo experimental.

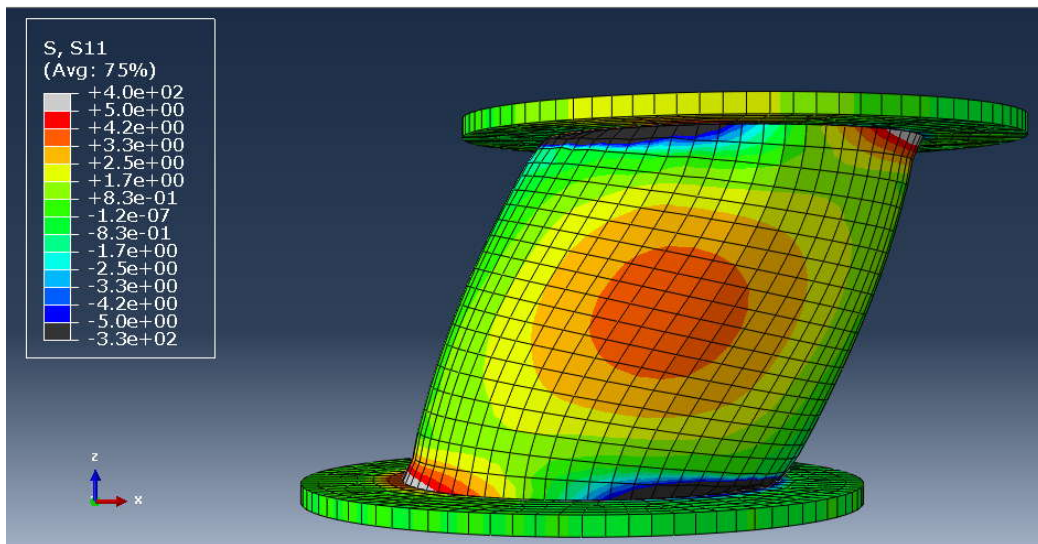


Figura 6.21. Estado de tensión axial S11 para el eje x [MPa x e-01].

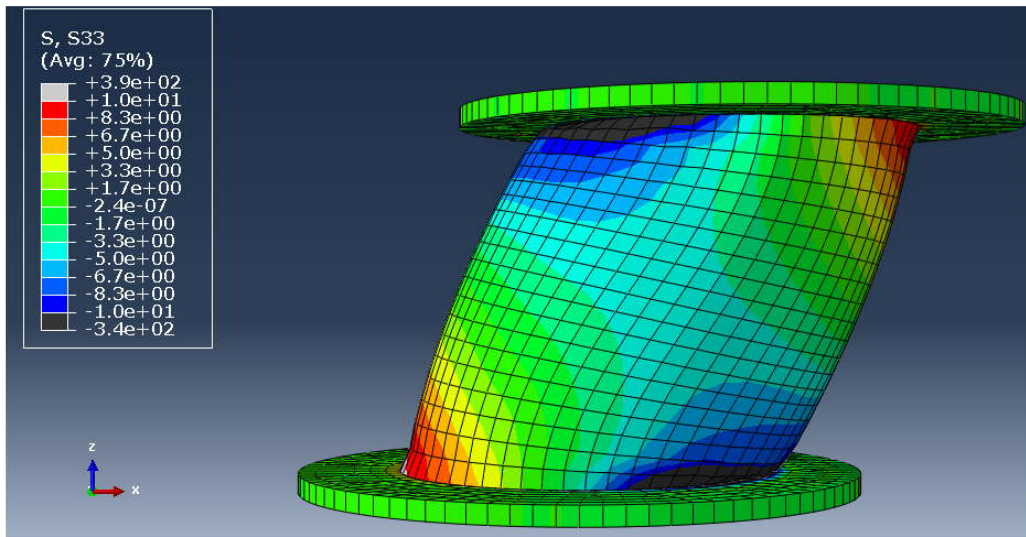


Figura 6.22. Estado de tensión axial S33 para el eje z [MPa x e-01].

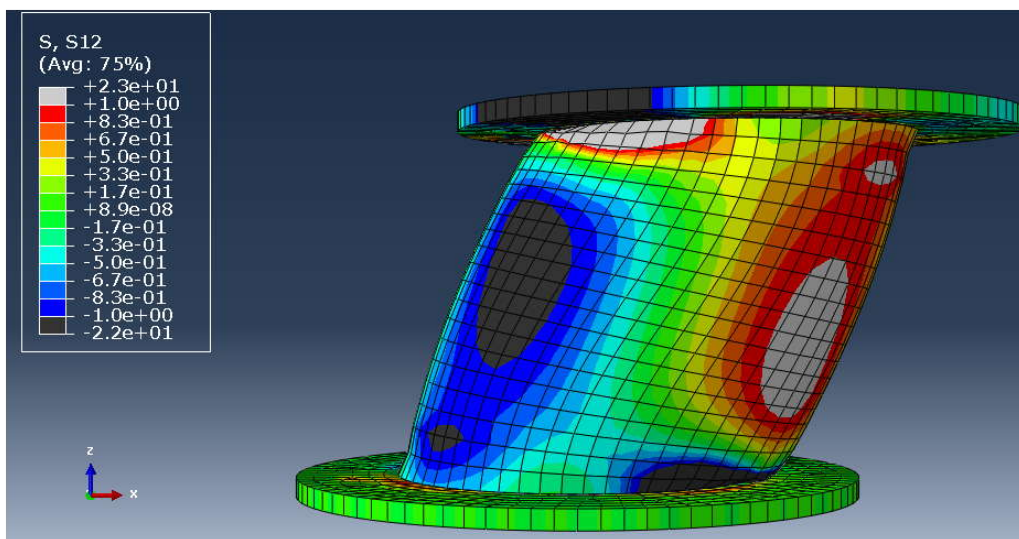


Figura 6.23. Estado de tensión de corte S12 para los ejes x-y [MPa x e-01].

En la Figura 6.24 se muestra la correspondencia, en término de deformaciones, entre el ensayo experimental y el modelo numérico de Ogden.

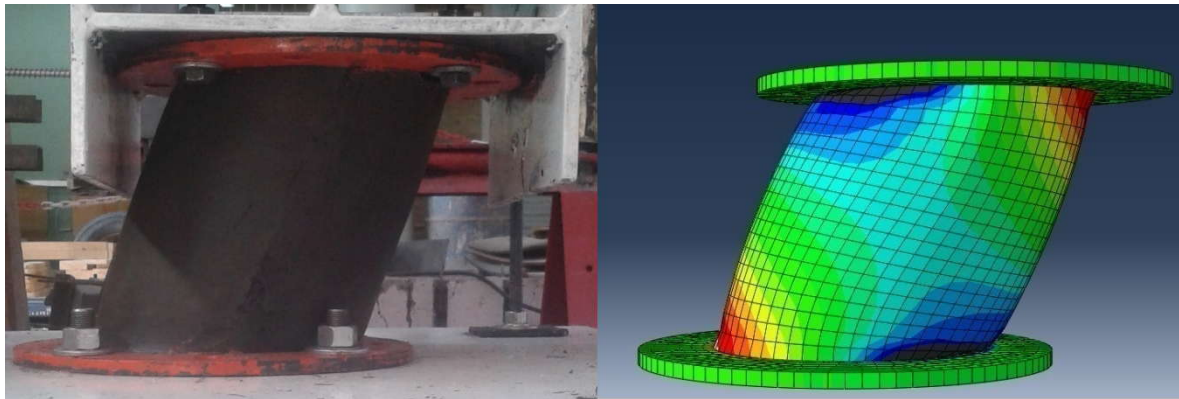


Figura 6.24. Comparación cualitativa de la respuesta obtenida en el ensayo experimental y el modelo numérico de Ogden.

Las tensiones máximas para los tres casos se encuentran en la unión de las pletinas de acero de conexión superior e inferior con el taco de goma del aislador. Se observa para el estado de tensión axial para el eje x (S11) de la Figura 6.21 un decrecimiento de las tensiones desde el núcleo de la goma hacia el exterior. En la Figura 6.22 se muestra que la tensión axial para el eje z (S33) presentan simetría diagonal en su distribución, obteniéndose los valores máximos en sus extremos. La tensión de corte S12 que se visualizan en la Figura 6.23 muestran una distribución simétrica, con concentración de tensiones en distintos puntos del aislador.

Con el objeto de realizar un análisis comparativo cuantitativo, se obtiene del ciclo histerético generado con el modelo numérico de Ogden, la rigidez y amortiguamiento efectivos teóricos.

El procedimiento que se ha utilizado es el mismo que el empleado para el modelo de Wen, es decir, cuantificar la energía disipada por el aislador y el amortiguamiento efectivo (Tornello, 2007b) del mismo, dado que los dos parámetros resultan de interés para evaluar las respuestas de los dispositivos elastoméricos.

En la Figura 6.25 se observa la envolvente del área del ciclo histerético para el modelo numérico de Ogden del prototipo ASNC-1-30m (envolvente de los ciclos de histéresis de la Figura 6.19).

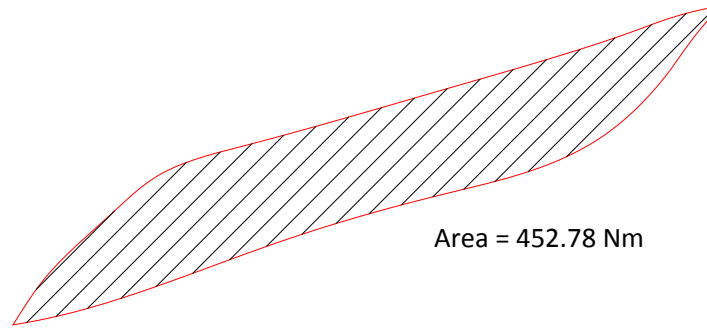


Figura 6.25. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Ogden para el prototipo ASNC-1-30mm.

Rigidez efectiva: $K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 92,29 \text{ N/mm}$

$F^+ = 6.067 \text{ N}$

$\Delta^+ = 67 \text{ mm}$

$F^- = -6308 \text{ N}$

$\Delta^- = -67 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 452.780 \text{ Nmm}$

Energía elástica: $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 207.396 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{452.780 \text{ Nmm}}{4 \pi 207.396 \text{ Nmm}} = 0,174 = 17,40\%$

En la Tabla 6.5 se visualiza el amortiguamiento efectivo obtenido del ensayo y el obtenido con el modelo numérico de Ogden.

Tabla 6.5. Comparación del amortiguamiento efectivo obtenido a partir del ensayo y del obtenido del modelo numérico de Ogden en Abaqus.

		PROTOTIPO DE AISLADOR	
		ASNC-1-30mm	
		Ensayo Experimental	Hiperelastico de Ogden
W_0	Nmm	400130	452780
F^+	N	4000	6067
F^-	N	6865	6308
Δ^+	Mm	70,00	67,04
Δ^-	Mm	71,00	67,04
k_{eff}	N/mm	77,06	92,29
W_e	Nmm	188789	207396
ξ_{eff}	%	16,9	17,4

A partir de los resultados mostrados, se puede concluir que el modelo numérico de Ogden, es adecuado para representar los ensayos experimentales de los prototipos elastoméricos ASNC, incluidos los parámetros de la Tabla 6.4.

Con el procedimiento descrito en el presente capítulo, se ha logrado definir una metodología que permite, con los resultados de los ensayos experimentales de los aisladores desarrollados en el ámbito de la tesis, calibrar el modelo numérico.

Se han adecuado los parámetros del modelo de Wen para todos los dispositivos diseñados y fabricados en el presente ámbito. En el marco de la teoría hiperelástico de Ogden, con Abaqus, solamente se han adecuado los parámetros de diseño para un solo prototipo (ASNC) atento al costo computacional que implican el desarrollo de tales modelos.

Futuras líneas de investigación podrán orientarse a evaluar los parámetros de diseños para utilizar la teoría de Ogden a los otros dispositivos de aislamiento desarrollados con materiales elastoméricos.

CAPÍTULO VII: APLICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SISMICO A VIVIENDAS. CASOS DE ESTUDIO

7.1. Introducción

El presente capítulo tiene como objeto implementar el sistema de aislamiento de base objeto de la presente tesis en dos tipos de viviendas. Las viviendas seleccionadas para el estudio son de una y dos plantas y las mismas corresponden a una tipología de proyectos del Instituto Provincial de la Vivienda de Mendoza (IPV). Ambas tienen como destino dar respuesta al plan habitacional propuesto por el Gobierno de la Provincia de Mendoza.

Se realiza un análisis de la respuesta estructural de las viviendas para los casos de base tradicional o fija y para el caso de base aislada. La herramienta utilizada para la modelación de los dispositivos de aislamiento y la estructura de las propias viviendas es el programa computacional ETABS.

El prototipo seleccionado para el estudio es ASNC (aislador sin núcleo confinado), cuyos parámetros necesarios para la modelación se obtuvieron de los ensayos experimentales (ver Capítulo V).

7.2. Descripción de las viviendas

7.2.1. Vivienda unifamiliar de una planta

La vivienda seleccionada tiene una superficie cubierta de 53,74 m² distribuida en una planta. Presenta características que son típicas y propias de la región. Posee 3 ambientes, cocina comedor y dos dormitorios, y un baño completo. Los muros son de mampostería de ladrillos comunes. La cubierta está conformada por una losa maciza de hormigón armado de 12 cm de espesor, con una pendiente del 7% hacia un lateral de la vivienda. En la Figura 7.1., se indica la planta tipo de arquitectura de la vivienda.

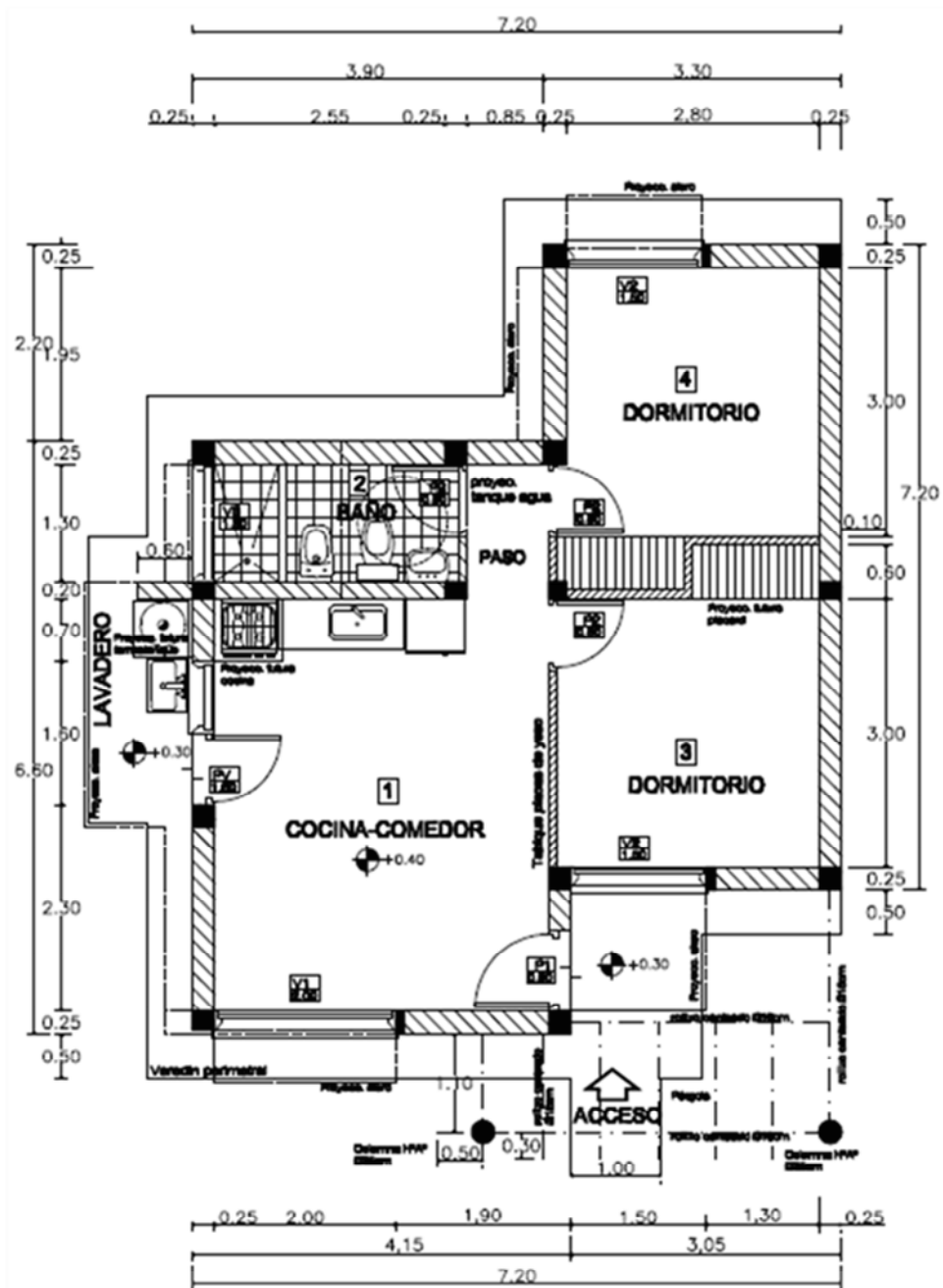


Figura 7.1. Planta de arquitectura de la vivienda de una planta.

La vivienda posee un sistema de fundaciones conformado por zapatas corridas de hormigón armado bajo muros de mampostería. Las vigas de fundación forman parte de las zapatas corridas. En la planta de estructura que muestra la Figura 7.2 se indican las zapatas y vigas de fundación.

En sus dos direcciones principales, ortogonales entre sí, se utilizan muros de mampostería encadenada como elementos resistentes a cargas verticales y horizontales. En la Figura 7.2 se contabilizan tres muros portantes en cada dirección.

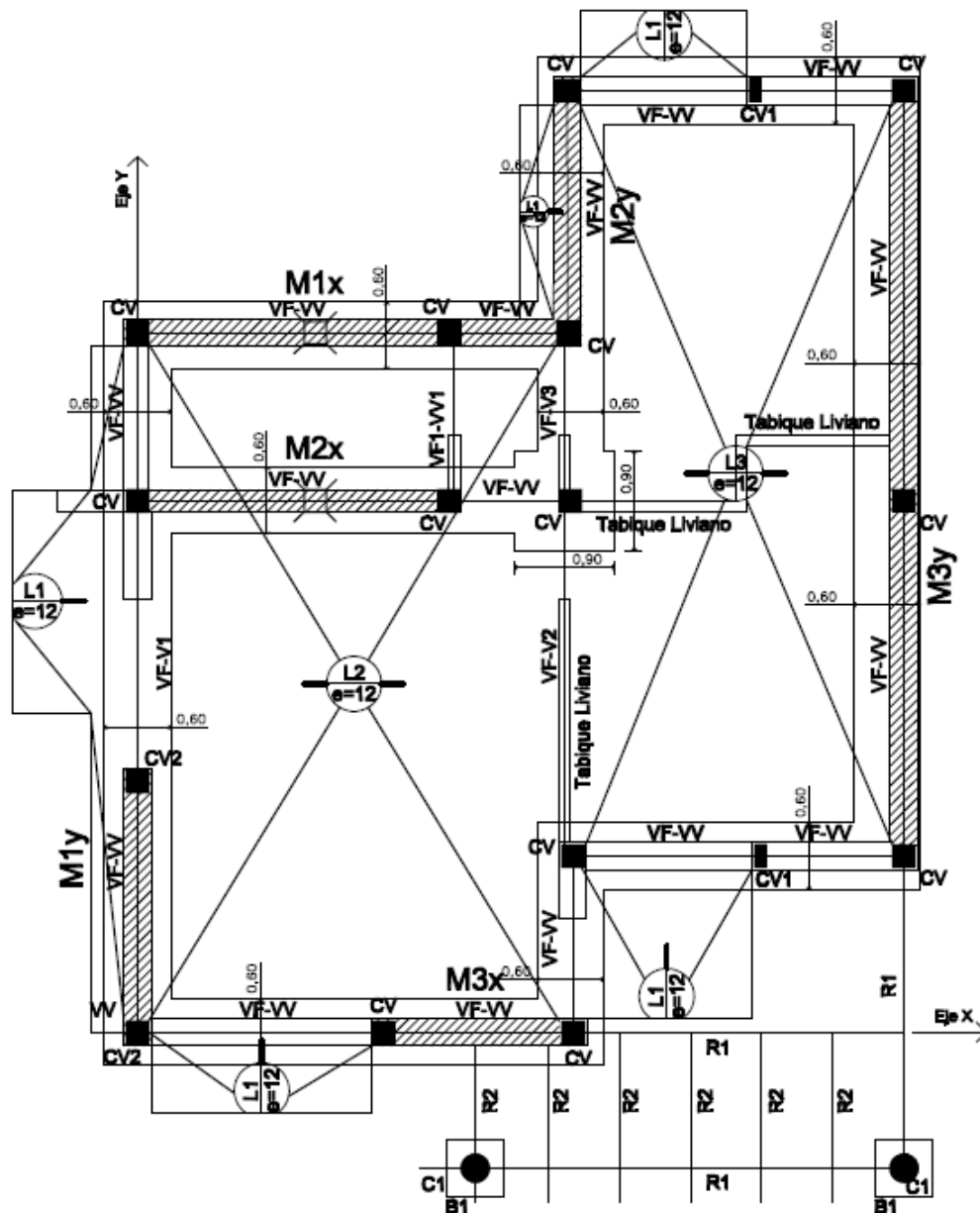


Figura 7.2. Planta de estructura de la vivienda de una planta.

7.2.2. Vivienda unifamiliar de dos plantas

La vivienda posee dos plantas con una superficie total cubierta de 74,23 m². La planta baja está compuesta por un estar – comedor y una cocina, que junto con la circulación vertical, completan una superficie de 28,29 m². La planta alta cuenta con 2 dormitorios y un baño que totaliza 35,30 m², junto con la superficie de la escalera.

Los muros son de mampostería, contruidos con ladrillos comunes. El entrepiso está conformado por una losa alivianada constituida con viguetas pretensadas prefabricadas y ladrillos cerámicos de 12,5 cm de altura. La escalera, por su parte, está compuesta por una losa maciza de hormigón de 16 cm de espesor. Por último, el techo de la vivienda es de chapa

trapezoidal N° 22, colocada sobre tirantes y vigas de madera laminada de pino elliottis. En la Figuras 7.3 y 7.4, se presentan la arquitectura de planta baja y planta alta respectivamente.

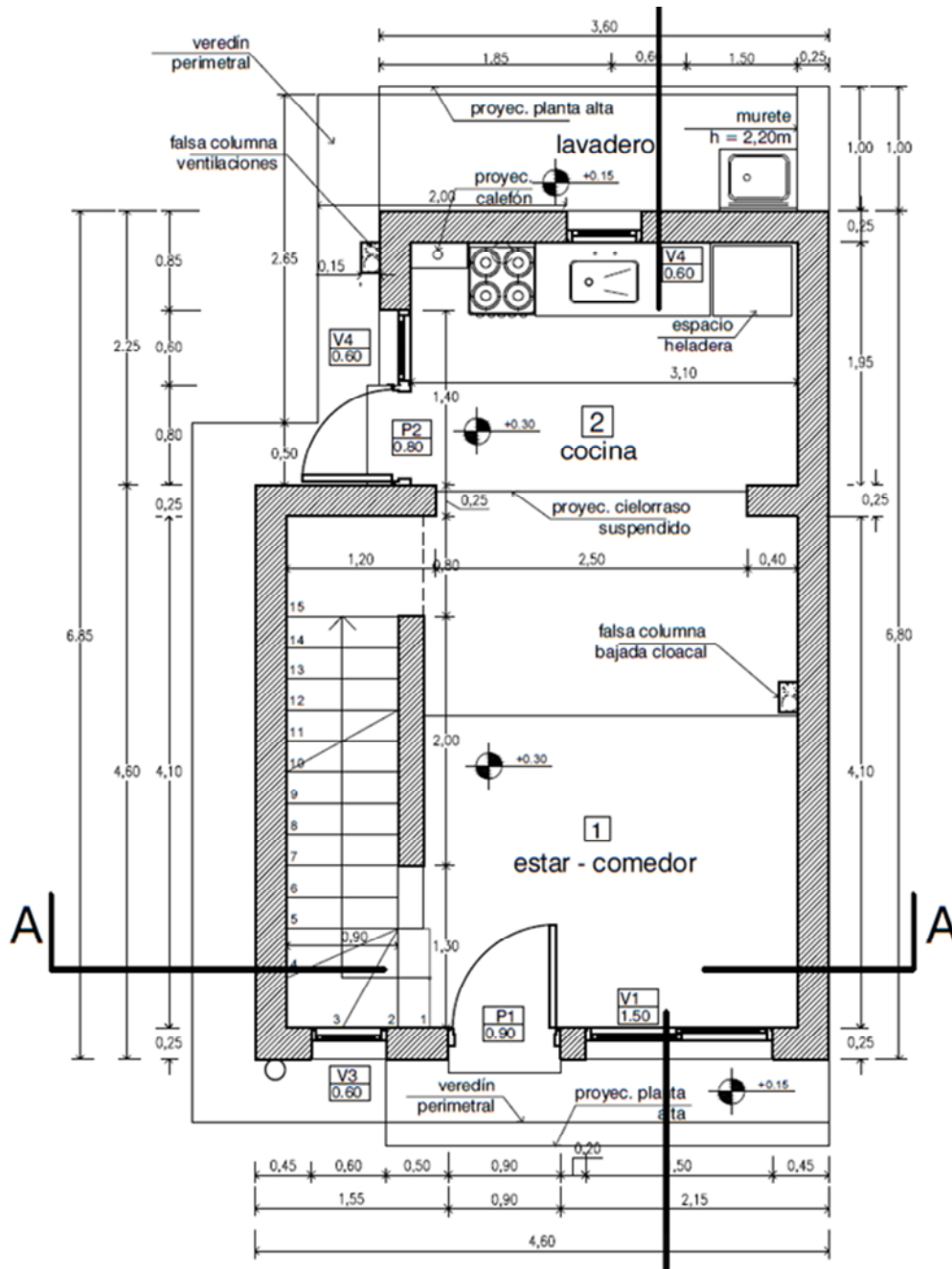


Figura 7.3. Planta baja de arquitectura de la vivienda de dos plantas.

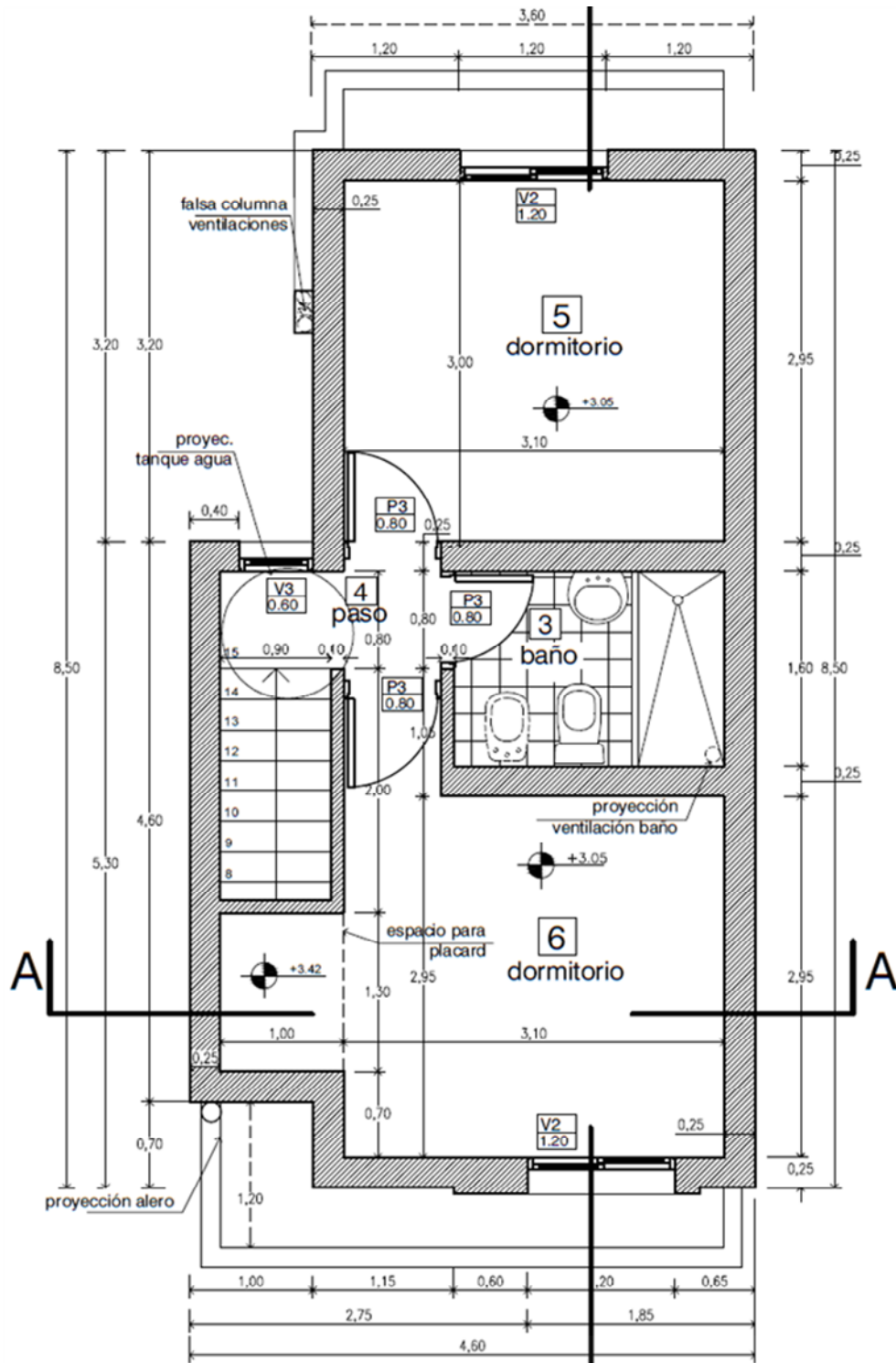


Figura 7.4. Planta alta de arquitectura de la vivienda de dos plantas.

Las fundaciones, para la construcción tradicional, han sido resueltas con bases para las columnas de pórticos y zapatas corridas bajo los muros de la vivienda. Las vigas de fundación forman parte de las zapatas corridas. La Figura 7.5 indica la posición de las mismas.

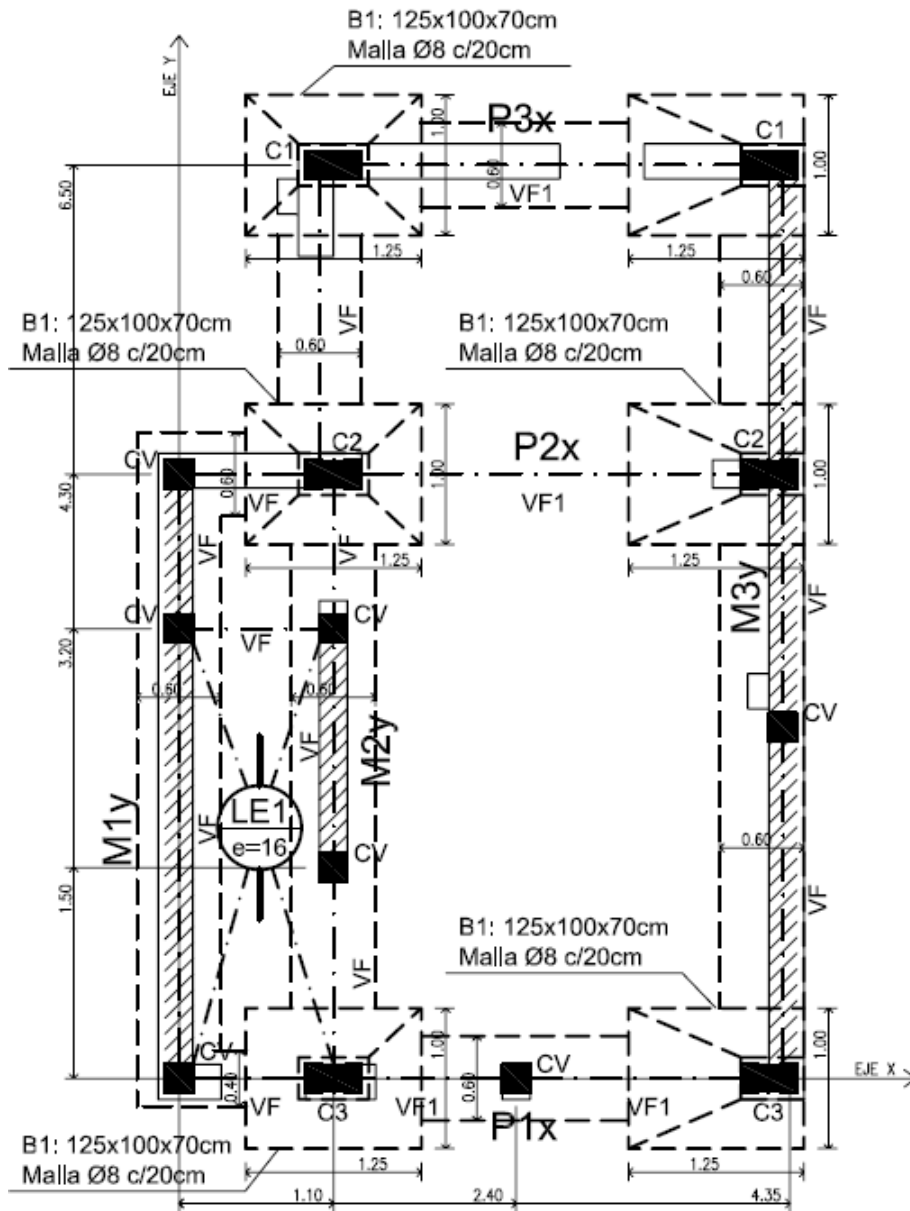


Figura 7.5. Planta de fundaciones de la vivienda de dos plantas.

Como estructura sismo resistente, en la dirección longitudinal de la vivienda se utilizan los muros de mampostería como elementos resistentes a cargas verticales y horizontales, mientras que en la dirección transversal a la misma, se utilizan tres pórticos de 3,10 m de luz. Ver Figura 7.6 y 7.7.

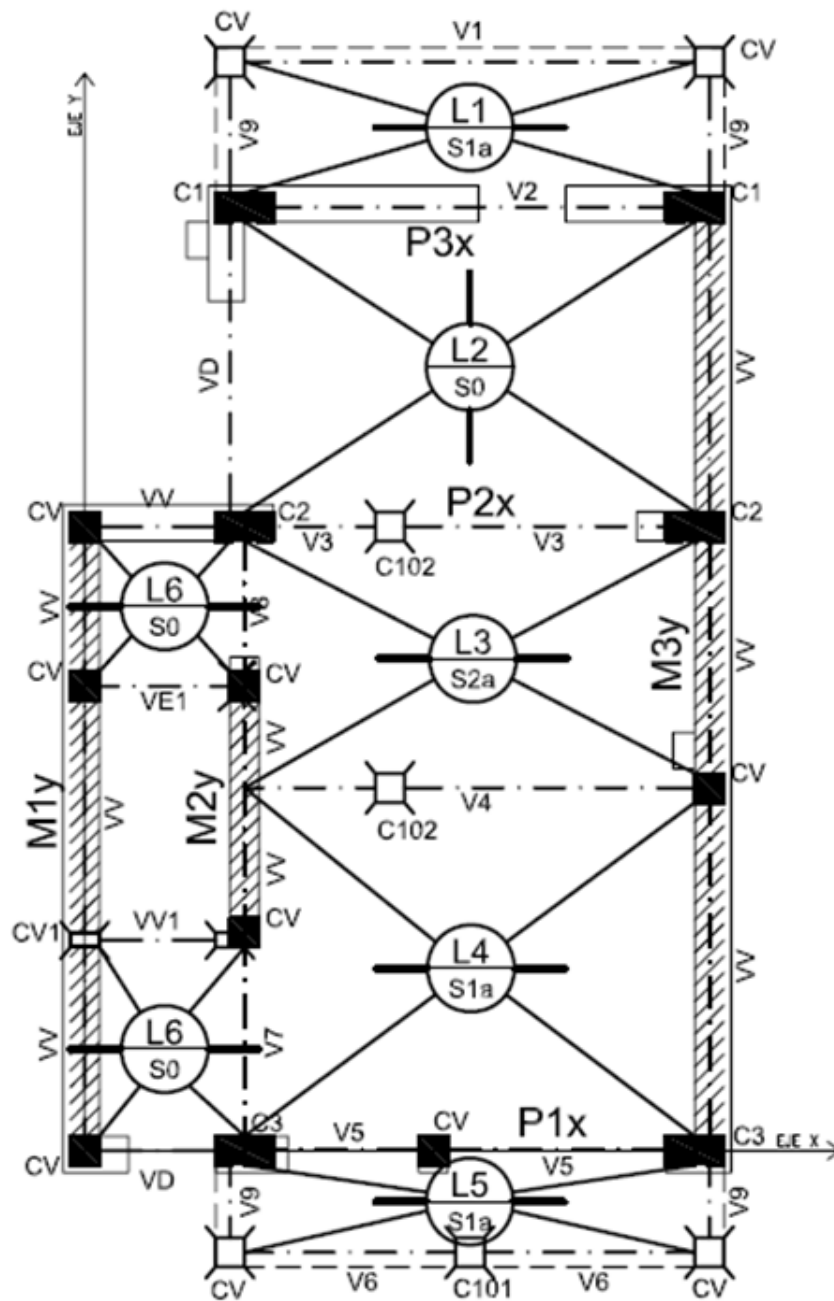


Figura 7.6. Planta de Estructura de planta baja de la vivienda de dos plantas.

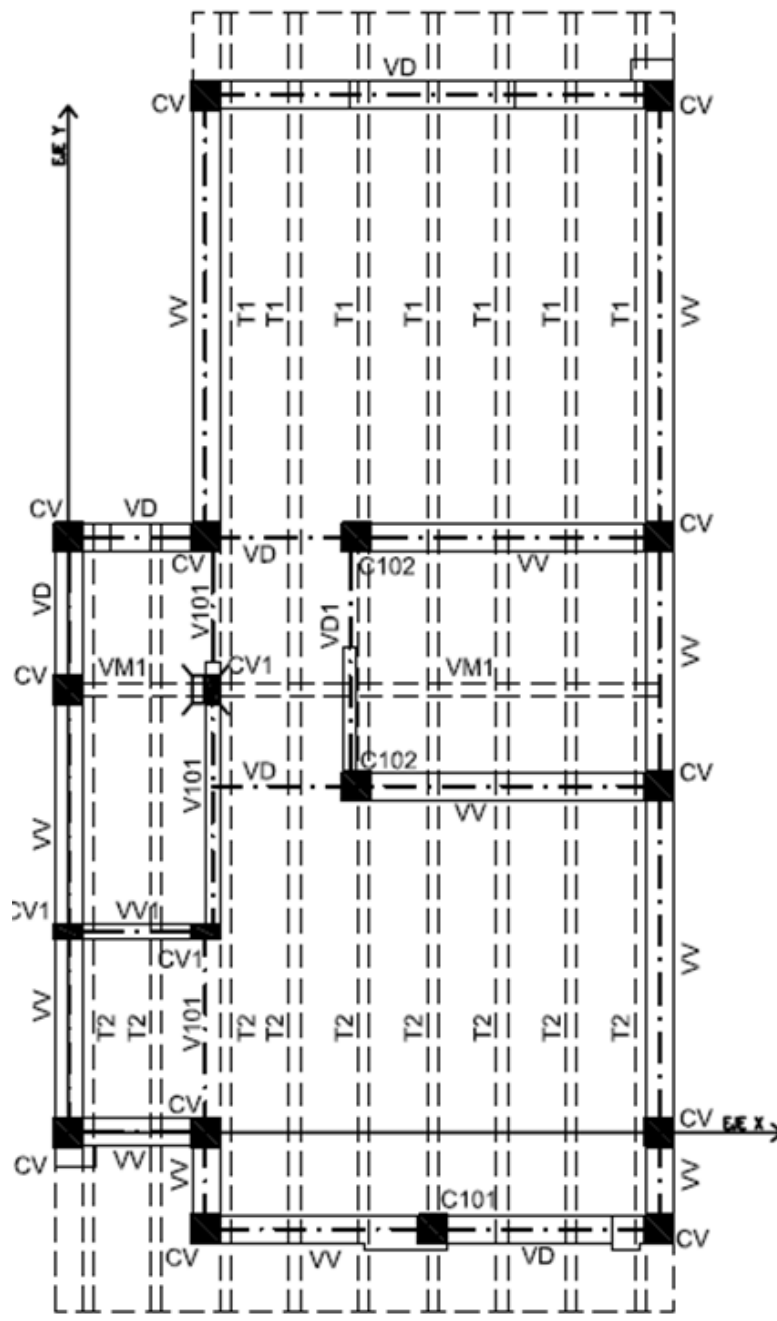


Figura 7.7. Planta de Estructura de planta alta de la vivienda de dos plantas.

7.3. Descripción del sistema de aislamiento sísmico de base

En función de los estudios realizados a las viviendas descritas en el punto anterior, se propone que las fundaciones se materialicen con bases aisladas debajo de cada dispositivo de aislamiento. Las mismas se vinculan entre sí mediante vigas, para asegurar un comportamiento en conjunto del sistema de fundación a nivel de suelo (VF1).

Por encima del sistema de aislamiento se proyectaron vigas de 0,50 m de altura, 0,30 m de ancho (VF2), en todo el perímetro de la vivienda y debajo de las líneas de muros principales

para el caso de vivienda de una planta y de cada columna de los pórticos, para el caso de la vivienda de dos plantas. El sistema de vigas, que funcionan como marco del nuevo plano incorporado en la vivienda, se apoya sobre los aisladores los cuales están fijados tanto a la estructura de fundación como a la superestructura, mediante pletinas de acero, barras roscadas de acero y sus correspondientes tuercas de sujeción.

Como consecuencia de la materialización del nuevo plano horizontal, surge la necesidad de construir una losa adicional, la cual, actúa como piso de la vivienda. Para el presente proyecto se proponen losas del tipo prefabricadas alivianadas de 0,175 m de espesor. En las Figuras 7.8 y Figura 7.9 se observan las plantas de fundación con la posición de los aisladores para las viviendas de una y dos plantas.

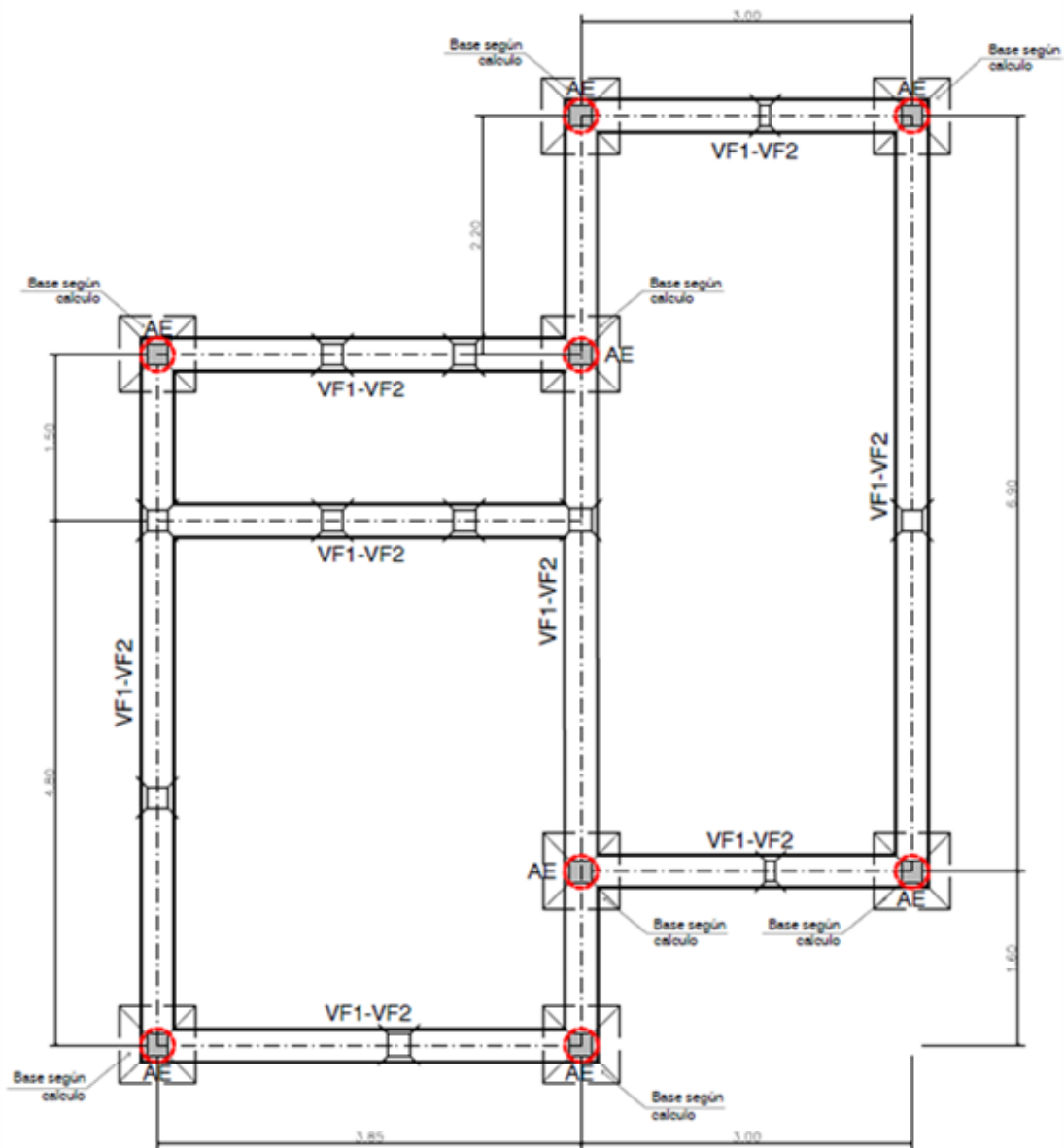


Figura.7.8. Planta fundación de la vivienda aislada de una planta.

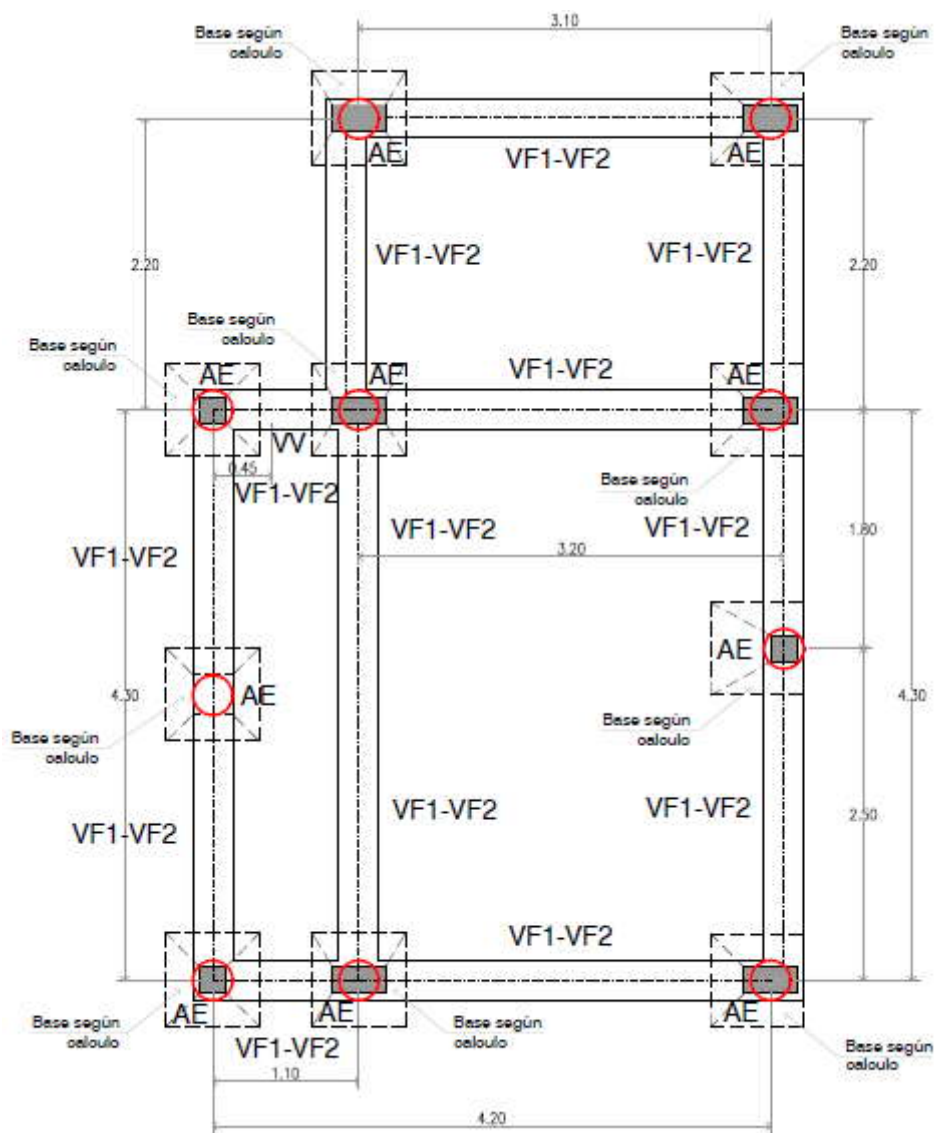


Figura.7.9. Planta fundación de la vivienda aislada de dos plantas

La implementación de los dispositivos de aislamiento implica la necesidad de levantar el nivel del piso de la vivienda, por tal motivo, se requieren tabiques perimetrales de cerramiento, los cuales se han proyectado de hormigón armado. Los mismos cumplen tres funciones, proteger los aisladores de los rayos solares, actuar como tope para los desplazamientos de la estructura aislada, ocultar los dispositivos para mejorar la estética de la vivienda y facilitar la inspección de los dispositivos de aislamiento.

También es necesario agregar compuertas metálicas en dichos tabiques, para permitir el acceso y mantenimiento de cada aislador. Para asegurar la estanqueidad del espacio entre la vivienda y los tabiques perimetrales, se dispuso un cerramiento de chapa reforzada fijada solamente del lado de la vivienda y totalmente liberado en el sector de los tabiques. En las Figuras 7.10 y Figura 7.11 se muestran los cortes de ambas viviendas donde se puede apreciar las características descriptas.

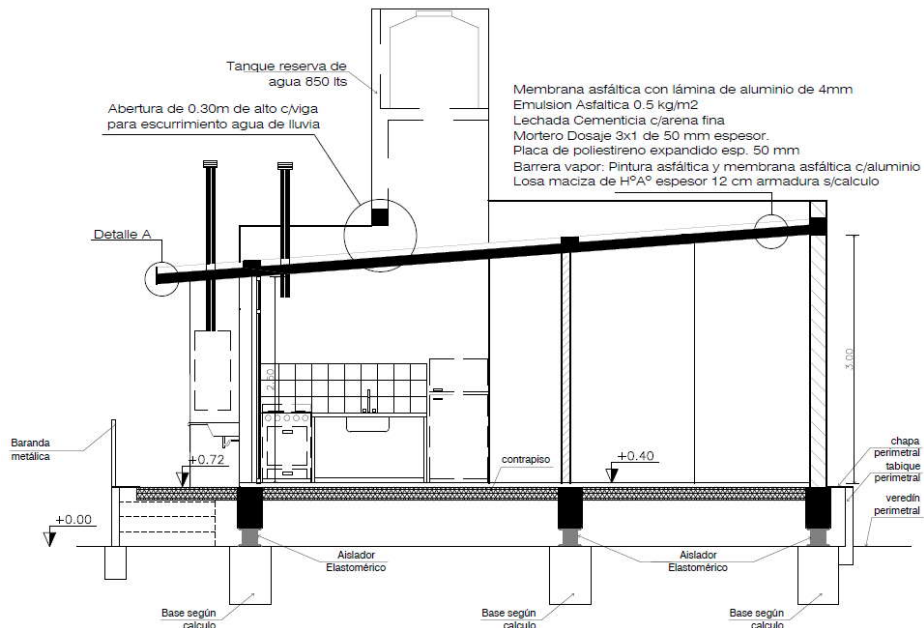


Figura 7.10. Corte de la vivienda aislada de una planta.

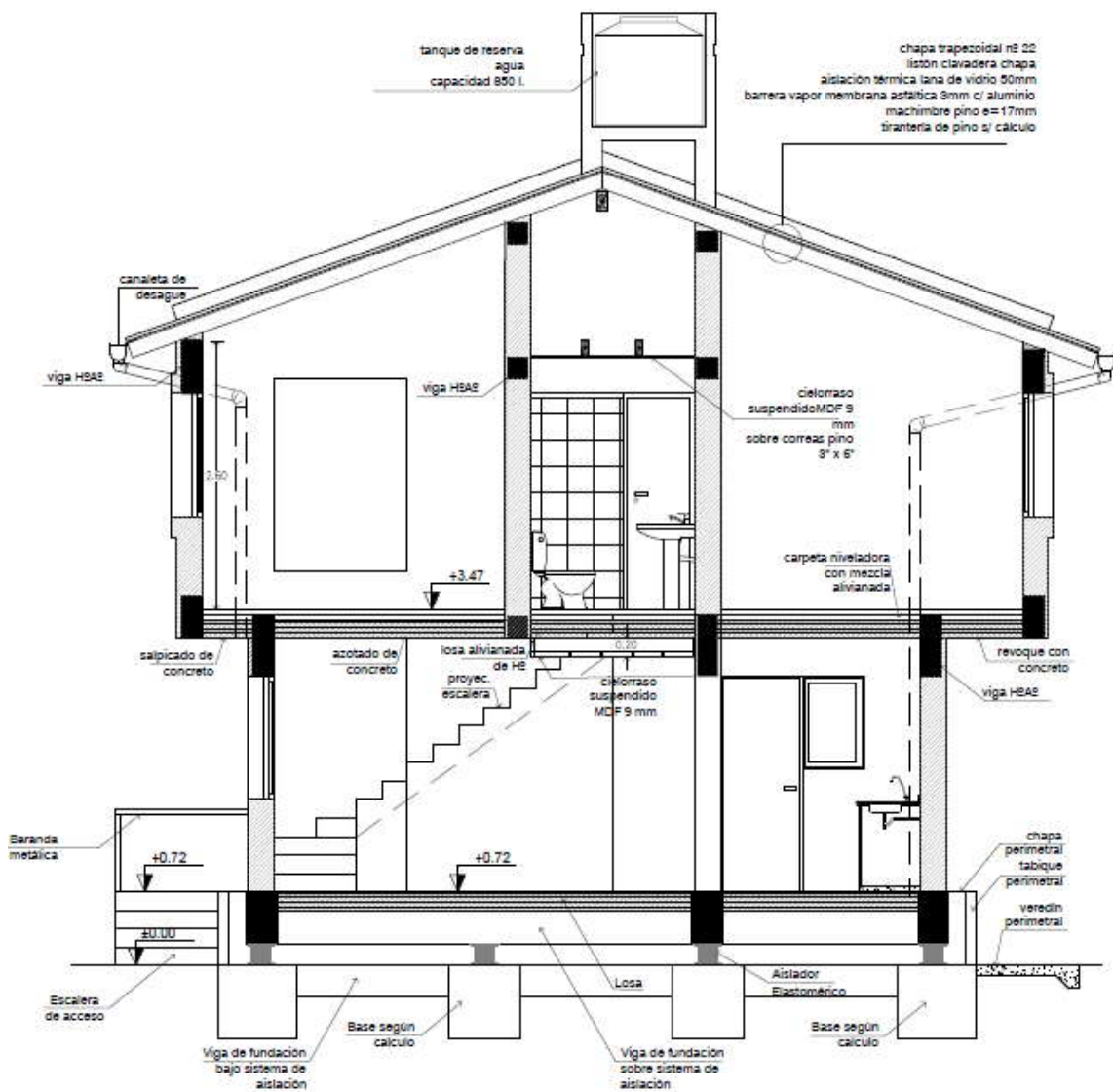


Figura 7.11. Corte de la vivienda aislada de dos plantas.

7.4. Modelación de los dispositivos de aislamiento y de la estructura de las viviendas

Para realizar el modelo estructural de las viviendas se utilizó el programa computacional ETABS. Se modelaron las dos tipologías de viviendas con fundaciones tradicionales (base fija) y con el sistema de aislamiento de base propuesto, con el objeto de comparar las respuestas estructurales.

Los parámetros introducidos en el modelo, corresponden al ensayo experimental a cargas axiales y horizontales cíclicas (ver Capítulo V), realizado al prototipo ASNC-1-15mm (aislador sin núcleo confinado), los mismos representan la constitutiva del aislador. En la Figura 7.12 se muestra dicha constitutiva y en la Figura 7.13 se representa la misma de manera idealizada. A continuación se detallan los parámetros obtenidos del ensayo realizado al prototipo ASNC-1-15mm:

- Rigidez Efectiva Vertical (Effective Stiffness) = 600,05 N/mm (Tabla 5.1)
- Rigidez Efectiva Horizontal (Effective Stiffness) = 87,64 N/mm (Tabla 5.3)
- Coeficiente de Amortiguamiento Efectivo (Effective Damping):

$$\text{Vivienda de una planta: } c = 7,13 \times 10^{-3}$$

$$\text{Vivienda de dos plantas: } c = 6,46 \times 10^{-3}$$

- Amortiguamiento Efectivo del Sistema de Aislamiento $\zeta_{eff} = 11,11 \%$ (Tabla 5.3)
- Fuerza de Fluencia (Yield Strenght) $F_y = 1654 \text{ N}$ (Tabla 5.2)
- Rigidez Inicial (Stiffness) $K_u = 160,05 \text{ N/mm}$ (Tabla 5.2)

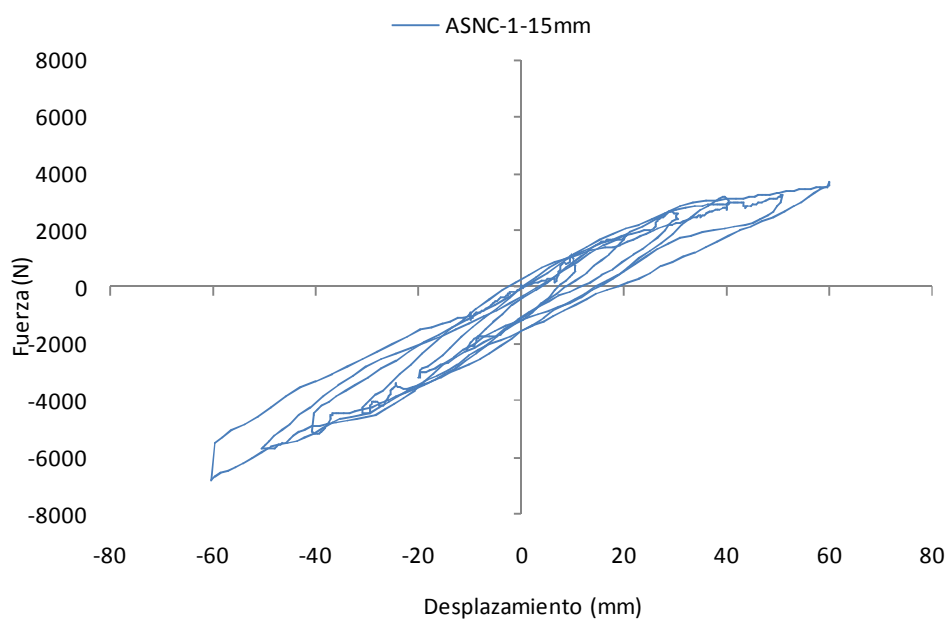


Figura 7.12. Relación fuerza – desplazamiento horizontal para el prototipo ASNC-1-15mm.

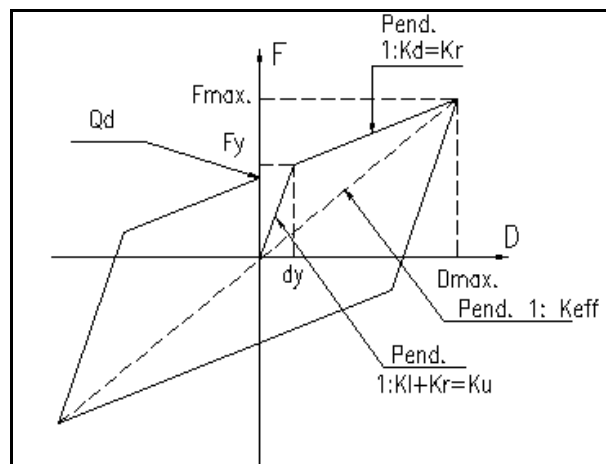


Figura 7.13. Constitutiva no lineal del aislador elastomérico.

Para el estudio de ambas viviendas se realizó un análisis de respuesta espectral modal, en el cual se utilizaron los espectros para los tres tipos de suelo que define el reglamento INPRES CIRSOC 103-2013, y un análisis de la respuesta en el tiempo para los sismos de Mendoza del año 1985 (Las Heras), de San Juan del año 1977 (Caucete), y el terremoto de Altadena del año 2008 (Eaton Canyon Park).

En general, la superestructura debe ser modelada con igual detalle que para un edificio convencional, sin embargo, es un hecho que la incertidumbre en la respuesta del modelo de la superestructura se reduce gracias al sistema de aislación. El nivel de detalle del modelo de la superestructura debe ser tal que permita evaluar correctamente la distribución de esfuerzos y deformaciones en sus elementos. En las Figura 7.14 y Figura 7.15 se observan los modelos realizados en el ETABS de las viviendas de una y dos plantas.

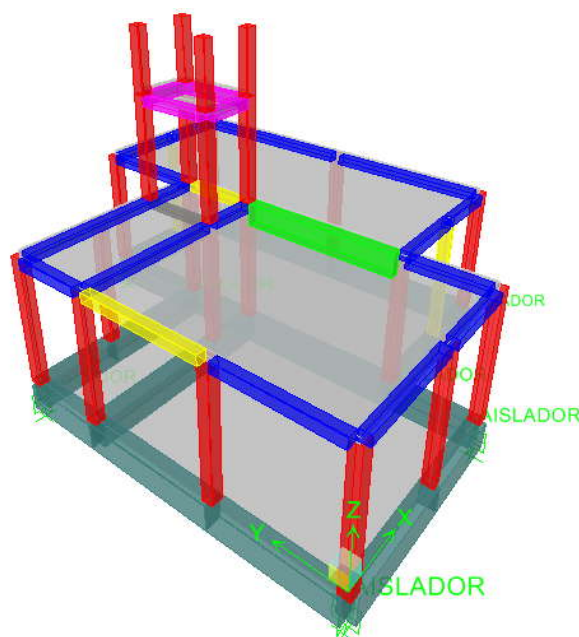


Figura 7.14. Modelo realizado en el ETABS de la vivienda de una planta.

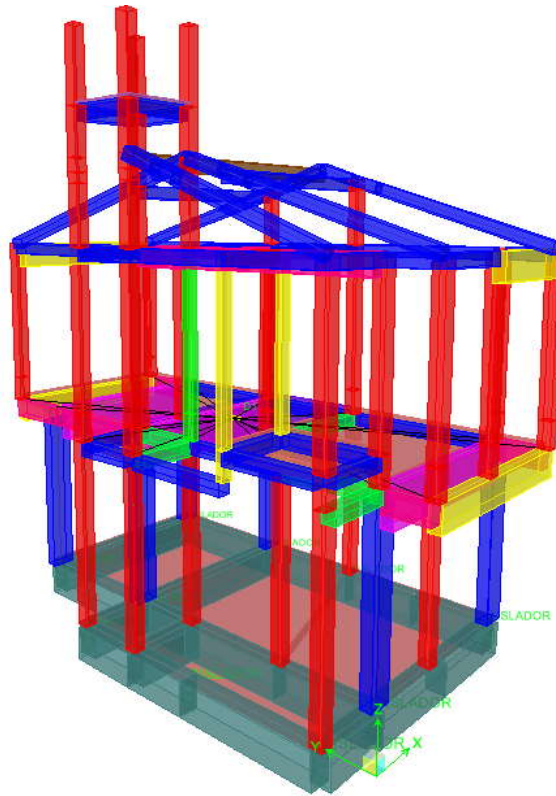


Figura 7.15. Modelo realizado en el ETABS de la vivienda de dos plantas.

7.5. Respuesta estructural

Los parámetros globales considerados para realizar la comparación de ambos modelos, es decir, base tradicional versus base aislada, de las viviendas de una planta y dos plantas, son: el corte basal, desplazamientos absolutos y distorsión de piso. En cuanto a parámetros locales, para la vivienda de una planta se compararon solamente los cortes en muro, ya que es la única tipología estructural presente para soportar la acción sísmica. Para la vivienda de dos plantas, se contrastaron: cortes en muros, momentos en columnas, cortes en columnas, momentos en vigas y cortes en vigas, debido que ésta presenta pórticos sismo resistente como planos resistente a la acción sísmica.

En las Figura 7.16 y Figura 7.17 se muestra el incremento del periodo de las viviendas con aislamiento sísmico en relación a la misma vivienda con fundación tradicional. Los gráficos muestran una considerable reducción de sus respuestas estructurales.

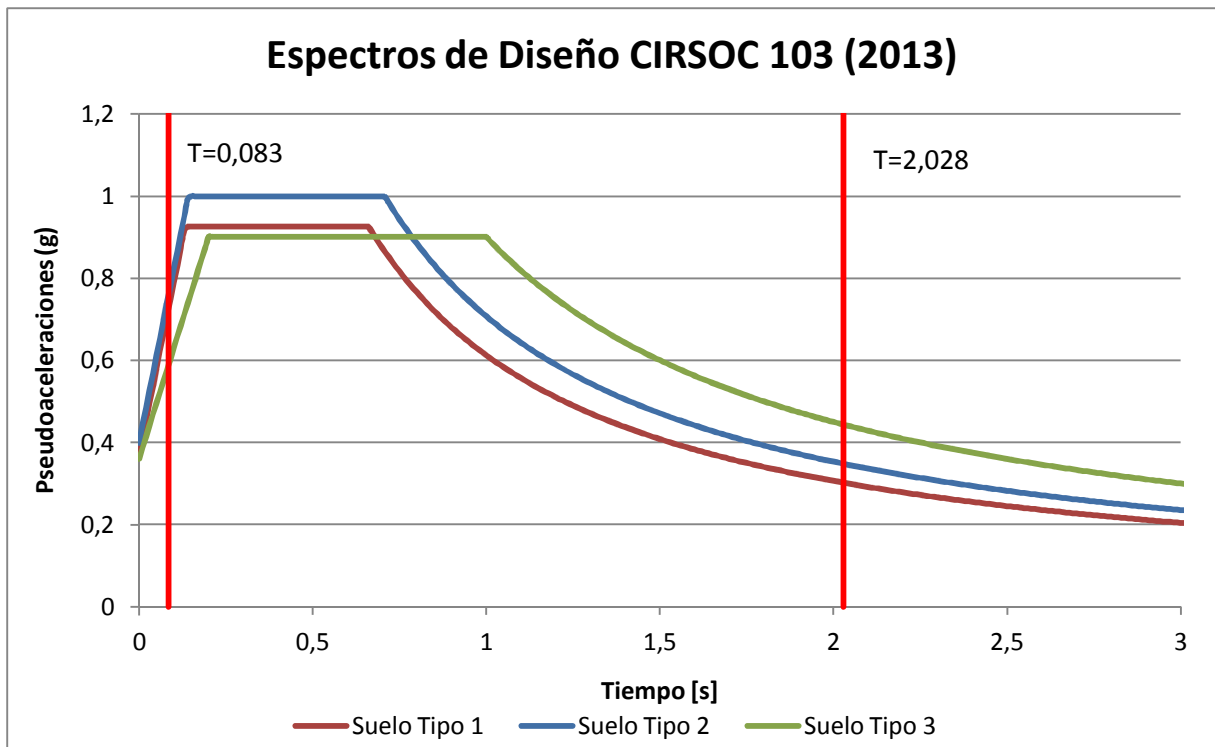


Figura 7.16. Período de estructura de una planta con base fija vs. período de estructura de una planta con base aislada, en contraste con los espectros de diseño.

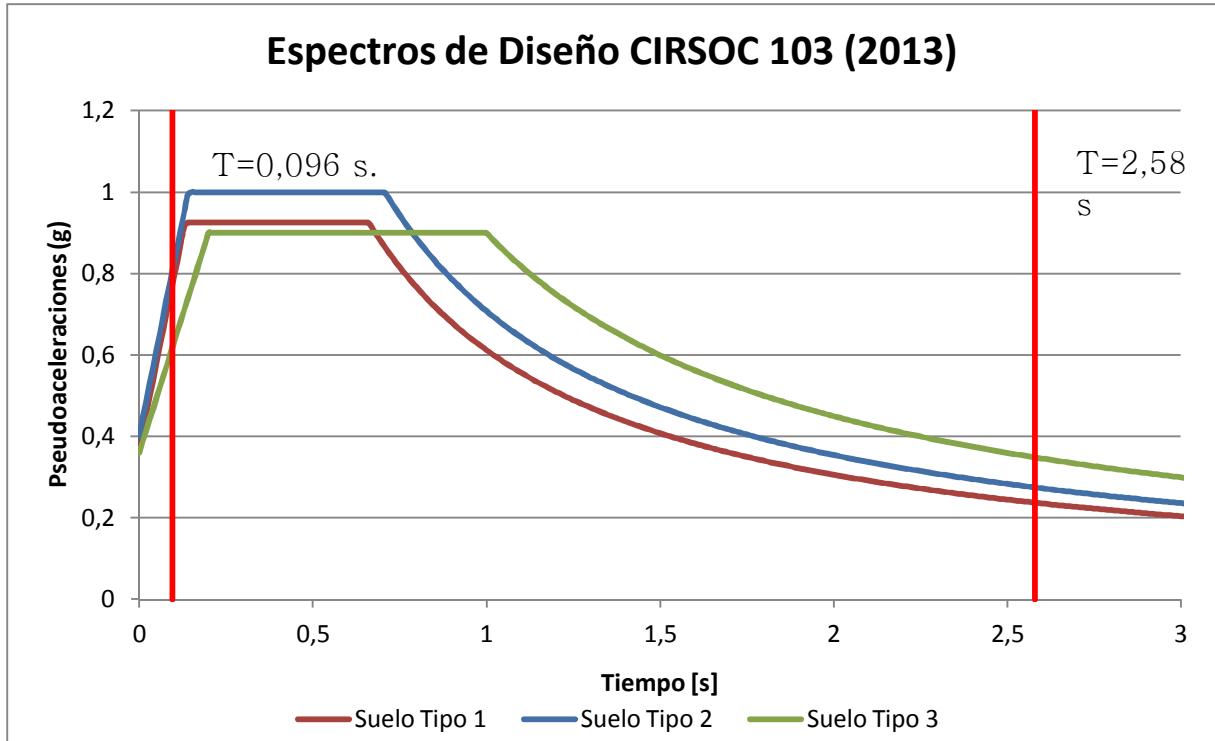


Figura 7.17. Período de estructura de dos plantas con base fija vs período de estructura de dos plantas con base aislada, en contraste con los espectros de diseño.

7.5.1. Respuesta estructural para base fija

En la Tabla 7.1 y la Tabla 7.2 se observan los valores máximos de las respuestas estructurales obtenidos de los modelos de ambas viviendas con base fija.

Tabla 7.1. Valores máximos para la vivienda de una planta con base fija.

			Mendoza	Caucete	Altadena	Espectro Suelo I	Espectro Suelo II	Espectro Suelo III
Parámetros Globales	Corte Basal [N]	X	147.700	198.100	264.000	73.400	77.000	60.400
		Y	244.400	189.700	235.600	63.700	67.000	53.100
	Desplazamientos Absolutos [mm]	X	0,40	0,59	0,84	0,24	0,25	0,21
		Y	0,50	0,45	0,65	0,16	0,17	0,13
	Distorsión de Piso	X	1,04	1,46	1,33	1,27	1,32	1,42
		Y	0,77	0,82	0,71	0,79	0,82	0,87
Parámetros Locales	Corte en Muros [N]	M1X	76.000	96.500	131.100	40.300	42.000	34.400
		M2X	69.400	93.700	119.800	39.700	41.200	34.000
		M3X	26.300	28.400	38.200	20.500	20.800	19.500
		M1Y	97.400	96.800	152.000	37.200	38.800	31.100
		M2Y	69.200	64.300	78.800	27.800	28.700	24.800
		M3Y	115.500	61.600	79.800	45.300	46.900	41.400

Tabla 7.2. Valores máximos para la vivienda de dos plantas con base fija.

			Mendoza	Caucete	Altadena	Espectro Suelo I	Espectro Suelo II	Espectro Suelo III
Parámetros Globales	Corte Basal [N]	X	334500	426900	697600	165500	172900	132800
		Y	397300	580600	366200	129700	135900	105900
	Desplazamientos Absolutos [mm]	X	0,80	0,90	1,50	0,40	0,40	0,30
		Y	0,60	0,80	0,50	0,20	0,20	0,20
	Distorsión de Piso	X	1,11	1,92	1,50	1,83	1,97	2,26
		Y	0,78	0,93	0,40	0,88	0,96	1,13
Parámetros Locales	Corte en Muros [N]	M1Y	107900	178900	92400	39800	41400	33400
		M2Y	37100	53200	31900	13700	14200	11800
		M3Y	197700	331700	189600	67500	70700	55300
	Momentos en Columnas [Nmm]	C7	6,90E+06	9,30E+06	1,40E+07	3,30E+06	3,40E+06	2,60E+06
		C9	6,70E+06	8,70E+06	1,23E+07	3,30E+06	3,40E+06	2,70E+06
		C10	8,20E+06	1,00E+07	1,56E+07	4,30E+06	4,50E+06	3,60E+06
		C16	6,20E+06	8,70E+06	1,26E+07	2,90E+06	3,00E+06	2,30E+06
		C17	6,80E+06	8,80E+06	1,24E+07	3,40E+06	3,60E+06	2,90E+06
		C18	5,20E+06	6,10E+06	9,00E+06	3,20E+06	3,30E+06	2,90E+06
	Parámetros Locales	Cortes en Columnas [N]	C7	4700	6200	9400	2300	2400
C9			4800	6400	8800	2500	2600	2100
C10			5900	7400	11000	3200	3300	2700
C16			4400	6100	8900	2100	2200	1700
C17			4900	6500	8800	2600	2700	2200
C18			4200	4900	6800	2700	2800	2500
Momentos en Vigas [Nmm]		B3	7,60E+06	1,09E+07	1,42E+07	4,20E+06	4,30E+06	3,60E+06
		B4	2,81E+07	3,67E+07	4,31E+07	1,91E+07	1,95E+07	1,73E+07
		B5	1,20E+07	1,58E+07	1,70E+07	7,10E+06	7,30E+06	6,30E+06
Cortes en Vigas [N]		B3	7000	11400	13100	3800	3900	3200
		B4	70300	90600	100800	52200	53100	48400
		B5	19600	22400	23300	16000	13100	15400

7.5.2. Respuesta estructural para base aislada

En la Tabla 7.3 y la Tabla 7.4 se observan los valores máximos de las respuestas estructurales obtenidos de los modelos de ambas viviendas con base aislada.

Tabla 7.3. Valores máximos para la vivienda de una planta con base aislada.

			Mendoza	Caucete	Altadena	Espectro Suelo I	Espectro Suelo II	Espectro Suelo III
Parámetros Globales	Corte Basal [N]	X	46.280	97.910	41.510	32.000	36.900	46.800
		Y	46.210	62.570	43.580	31.600	36.600	46.400
	Desplazamientos Absolutos [mm]	X	12,10	79,00	52,47	98,20	110,10	133,80
		Y	42,20	81,20	41,20	85,40	96,70	119,50
	Distorsión de Piso	X	0,03	0,03	0,07	0,02	0,02	0,02
		Y	0,04	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01
Parámetros Locales	Corte en Muros [N]	M1X	27.600	39.300	33.000	34.500	36.200	39.600
		M2X	31.700	38.700	33.300	33.500	34.400	36.200
		M3X	8.800	17.400	15.500	14.600	16.000	18.700
		M1Y	73.800	80.600	69.300	75.300	76.600	79.100
		M2Y	97.200	103.700	93.700	99.100	100.200	102.400
		M3Y	33.300	35.500	27.800	34.600	36.400	39.900

Tabla 7.4. Valores máximos para la vivienda de dos plantas con base aislada.

			Mendoza	Caucete	Altadena	Espectro Suelo I	Espectro Suelo II	Espectro Suelo III
Parámetros Globales	Corte Basal [N]	X	108.500	94.000	68.300	49.300	57.000	72.200
		Y	89.600	100.000	122.200	49.800	57.500	72.700
	Desplazamientos Absolutos [mm]	X	12,30	94,80	38,40	124,20	139,60	170,80
		Y	31,80	97,00	8,70	100,50	114,80	143,30
	Distorsión de Piso	X	0,03	0,04	0,05	0,02	0,06	0,01
		Y	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01
Parámetros Locales	Corte en Muros [N]	M1Y	46.600	54.300	39.700	51.300	53.500	57.800
		M2Y	5.500	7.200	4.000	7.000	7.600	8.600
		M3Y	24.600	34.700	11.800	32.100	35.800	43.100
	Momentos en Columnas [Nmm]	C7	2,20E+06	2,90E+06	2,20E+06	2,70E+06	2,80E+06	3,10E+06
		C9	5,00E+05	1,00E+06	5,00E+05	9,00E+05	1,00E+06	1,30E+06
		C10	2,20E+06	3,50E+06	2,60E+06	3,20E+06	3,30E+06	3,70E+06
		C16	1,70E+06	2,70E+06	2,10E+06	2,50E+06	2,60E+06	2,90E+06
		C17	1,70E+06	2,60E+06	2,00E+06	2,40E+06	2,60E+06	2,90E+06
		C18	4,40E+06	5,50E+06	4,80E+06	5,40E+06	5,50E+06	5,90E+06
	Parámetros Locales	Cortes en Columnas [N]	C7	1.200	1.700	1.300	1.600	1.700
C9			300	800	400	700	800	1.000
C10			1.500	2.400	1.700	2.100	2.300	2.500
C16			900	1.600	1.200	1.400	1.500	1.700
C17			1.400	1.900	1.500	1.800	1.900	2.100
C18			3.200	4.000	3.500	3.800	4.000	4.200
Momentos en Vigas [Nmm]		B3	1,60E+06	2,70E+06	2,00E+06	2,30E+06	2,50E+06	2,70E+06
		B4	8,10E+06	9,20E+06	8,70E+06	9,80E+06	1,03E+07	1,12E+07
		B5	3,90E+06	4,60E+06	4,20E+06	4,50E+06	4,70E+06	5,00E+06
Cortes en Vigas [N]		B3	2.000	3.300	2.300	2.800	2.900	3.200
		B4	32.300	34.000	33.600	35.400	36.300	38.000
		B5	13.400	13.900	13.600	13.900	14.000	14.200

Como se observa en las Tablas 7.3 y 7.4, se presentan diferencias significativas entre los resultados obtenidos con el análisis de la respuesta en el tiempo y análisis modal espectral, esto es debido a que los análisis en el tiempo por naturaleza propia contienen la dinámica del movimiento frente a acciones estáticas del espectro. Por otro lado las ordenadas espectrales de los terremotos tienen picos altos de aceleración, situación que provocará que la estructura incurriera en rango no lineal con el consecuente daño estructural y no estructural.

De los resultados obtenidos se observan que las respuestas de algunos elementos estructurales aumentan en las viviendas de base aislada con relación a la misma pero de base fija. Por ejemplo el corte en los muros de mampostería y en algunos casos, esfuerzos de corte en las vigas.

Se realiza un análisis de la historia en el tiempo para los modelos de las viviendas con el sistema de aislamiento en la base. Las respuestas cuantificadas fueron los desplazamientos absolutos y los cortes basales en ambas direcciones. Estos valores se muestran para la vivienda de una planta en la Tabla 7.5 y para la vivienda de dos plantas en la Tabla 7.6.

Tabla 7.5. Desplazamientos absolutos y cortes basales en ambas direcciones obtenidos del análisis de historia en el tiempo para la vivienda de una planta.

		Mendoza	Caucete	Altadena
Desplazamiento Absoluto [mm]	X	12,10	79,00	52,47
	Y	42,20	81,20	41,20
Corte Basal [N]	X	46.280	97.910	41.510
	Y	46.210	62.570	43.580

Tabla 7.6. Desplazamientos y cortes en ambas direcciones obtenidos del análisis de historia en el tiempo para la vivienda de dos plantas.

		Mendoza	Caucete	Altadena
Desplazamiento Absoluto [mm]	X	12,30	94,80	38,40
	Y	31,80	97,00	8,70
Corte Basal [N]	X	108.500	94.000	68.300
	Y	89.600	100.000	122.200

A continuación se muestran los gráficos de la historia en el tiempo de los desplazamientos absolutos y cortes basales en la dirección del eje “X”, para los tres terremotos analizados. Los mismos se obtuvieron para el modelo de las viviendas aisladas de una planta y dos plantas (Ver Figuras 7.18 a 7.29).

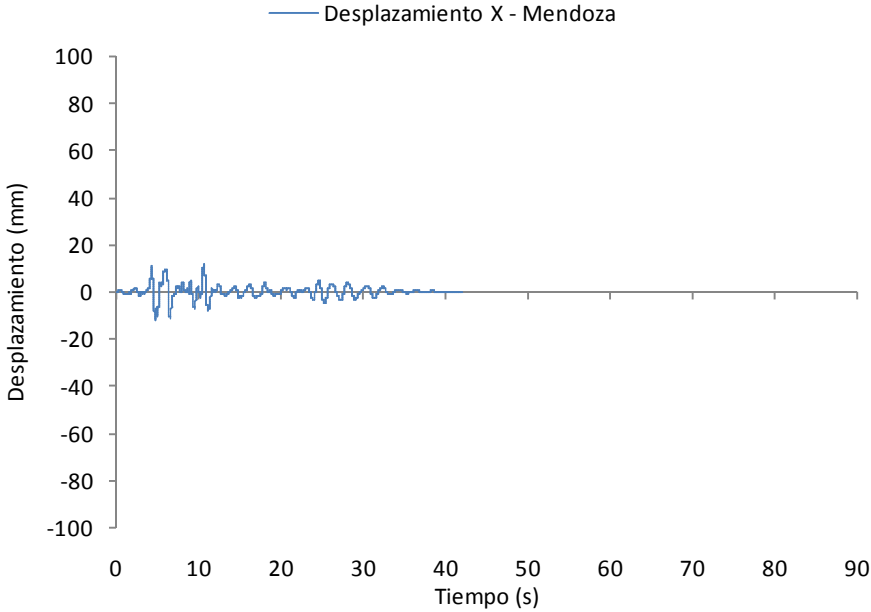


Figura 7.18. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de una planta.

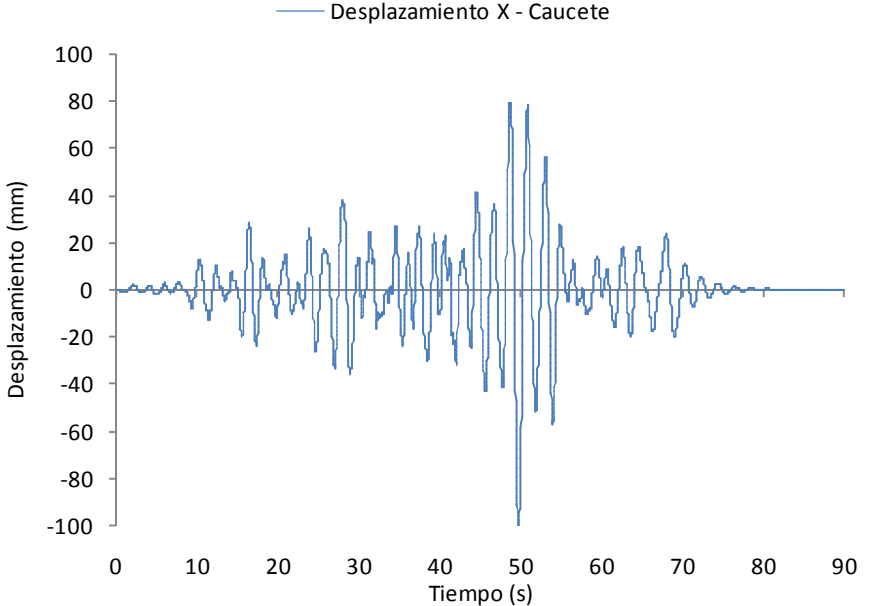


Figura 7.19. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Cauçete en la vivienda de una planta.

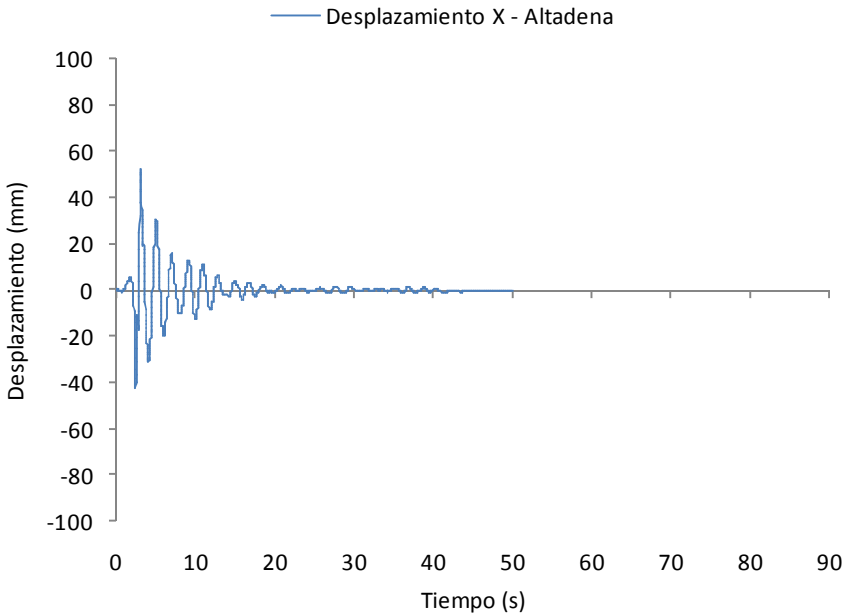


Figura 7.20. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de una planta.

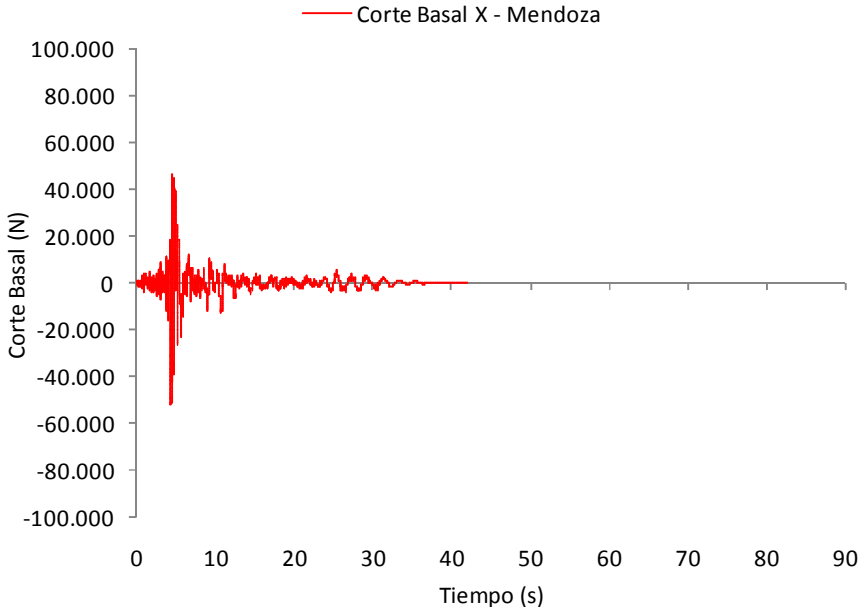


Figura 7.21. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de una planta.

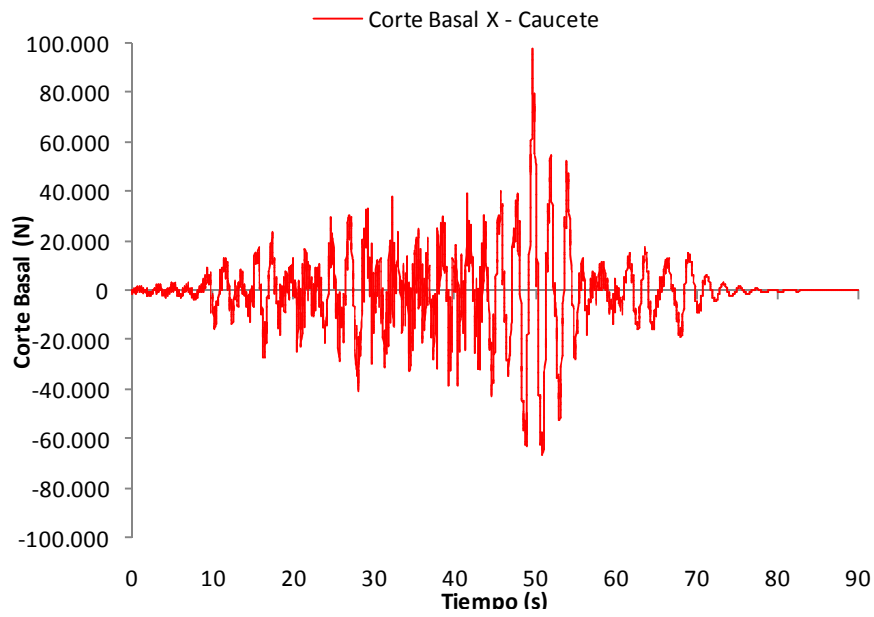


Figura 7.22. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Cauçete en la vivienda de una planta.

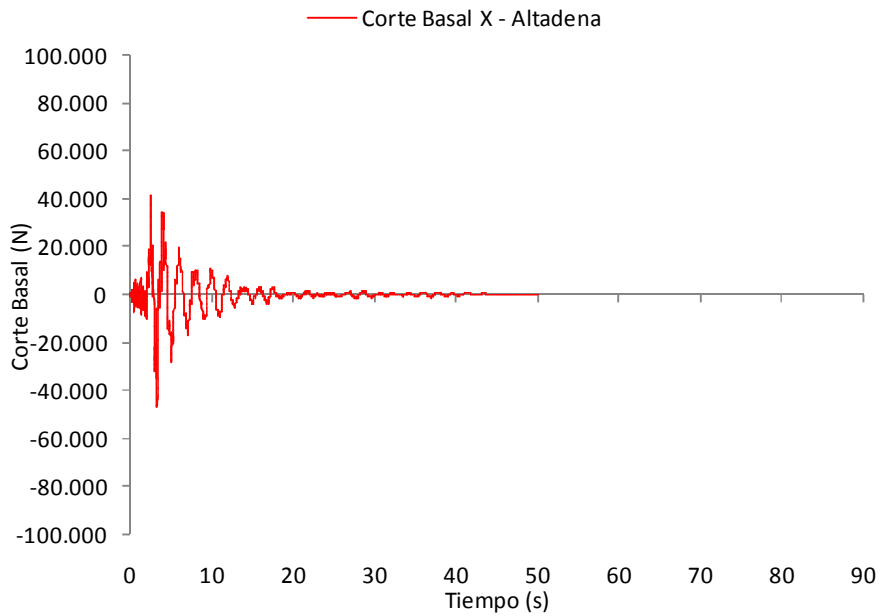


Figura 7.23. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de una planta.

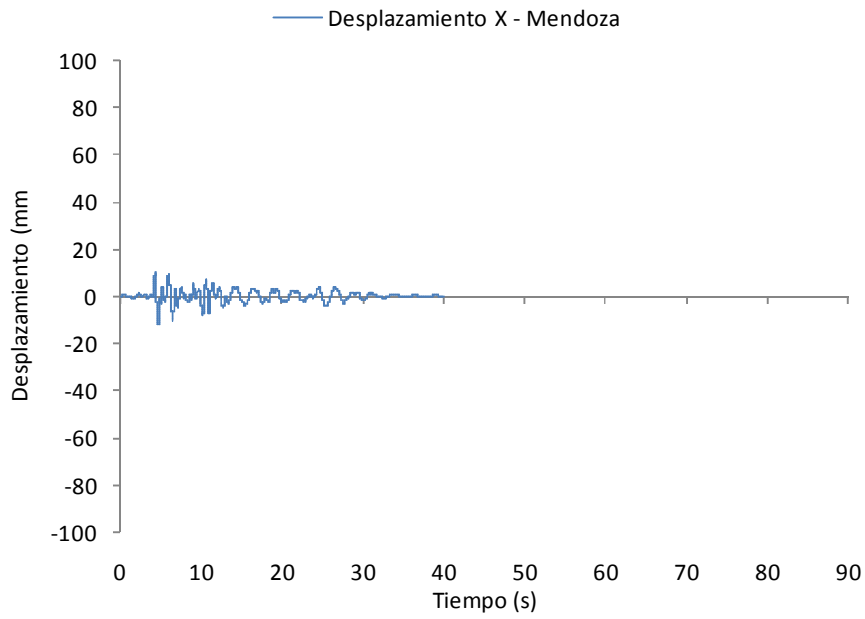


Figura 7.24. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de dos plantas.

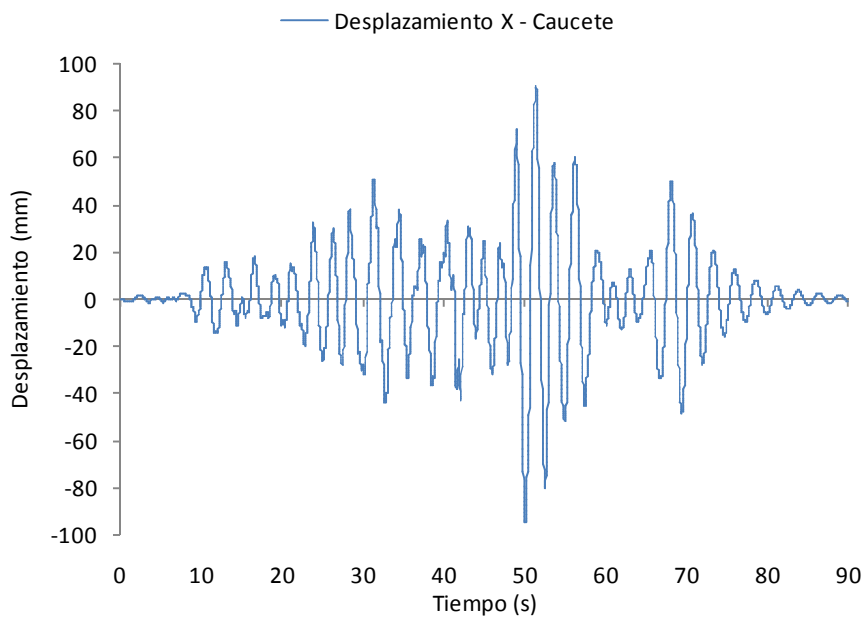


Figura 7.25. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Cauçete en la vivienda de dos plantas.

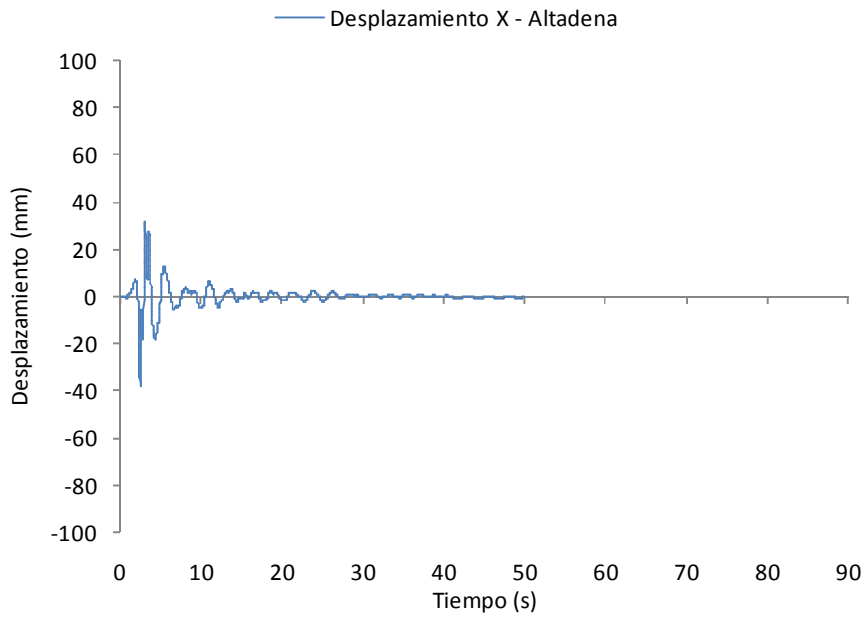


Figura 7.26. Historia en el tiempo del desplazamiento en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de dos plantas.

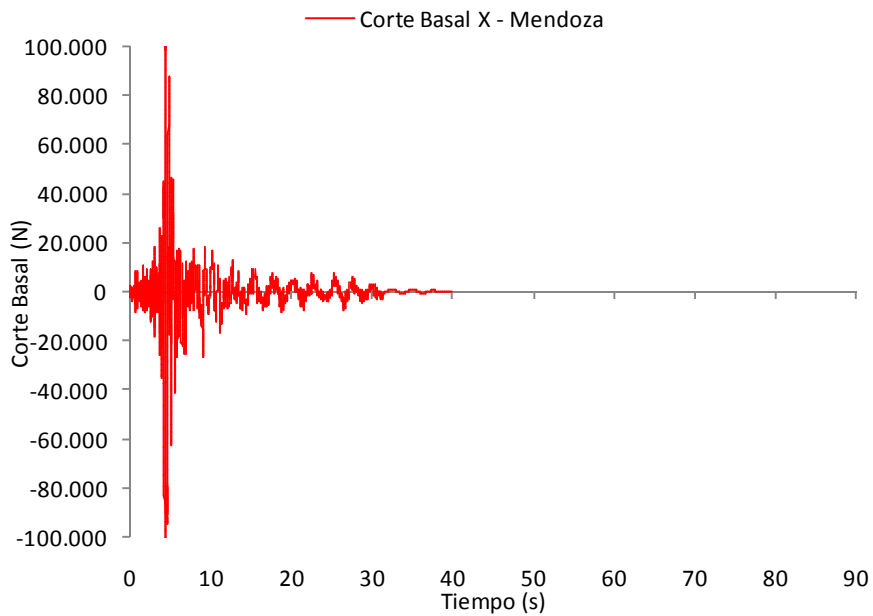


Figura 7.27. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Mendoza en la vivienda de dos plantas.

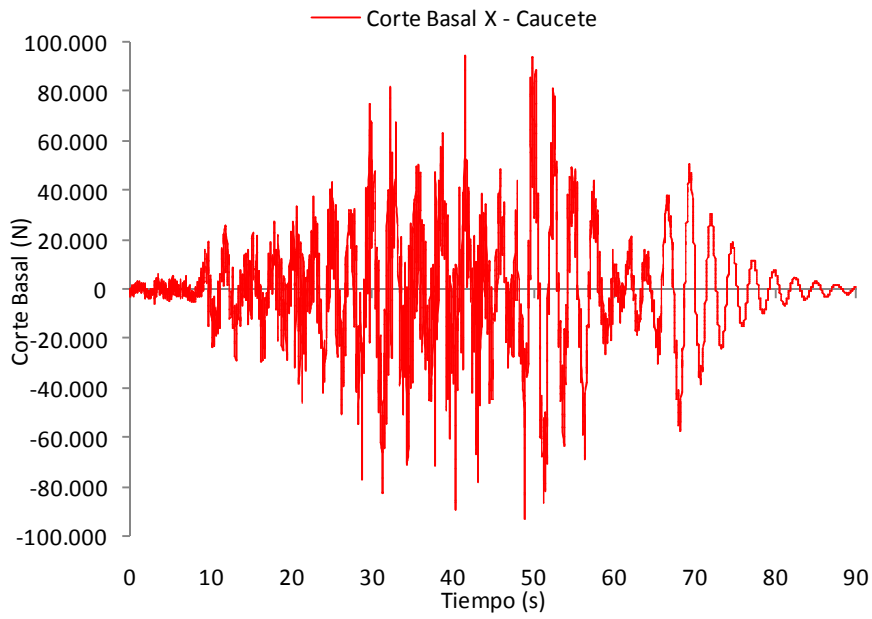


Figura 7.28. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Cauçete en la vivienda de dos plantas.

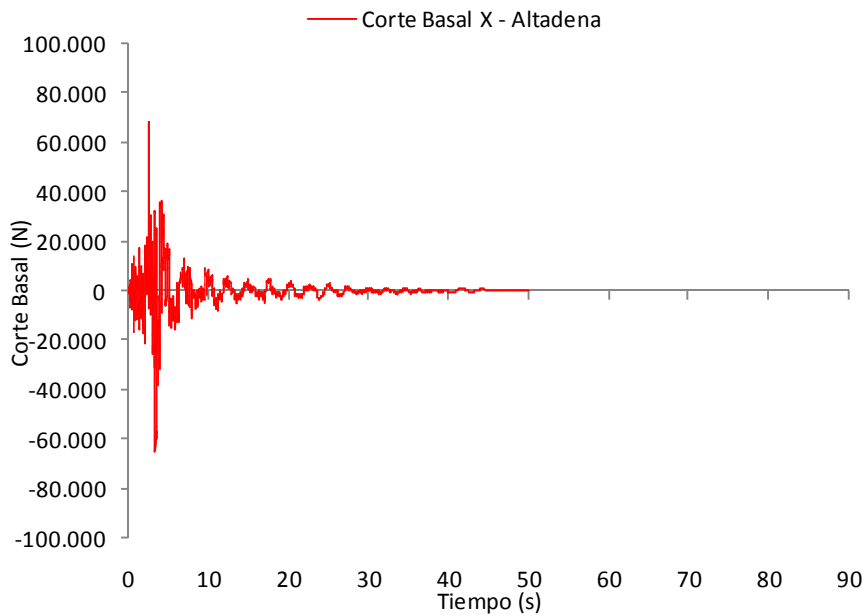


Figura 7.29. Historia en el tiempo del corte en el eje X para el terremoto de Altadena en la vivienda de dos plantas.

7.5.3. Comparativa de la respuesta estructural de las viviendas de base fija y las viviendas de base aislada

El estudio de las respuestas de las viviendas en las dos condiciones, base fija y base aislada, indica que los cortes basales son menores para el modelo de base aislada en comparación a los obtenidos para el sistema de base fija.

En la vivienda de una planta, el sistema de aislación produjo una disminución de la respuesta del 95% para el sismo de Mendoza, del 72% para el sismo de Caucete y del 86% para el sismo de Altadena. Cuando se realizó el análisis de normativa utilizando los espectros de respuesta los cortes se redujeron un 57%, 52% y 23% para los suelos I, II y III respectivamente. En la Figura 7.30 se observan las reducciones de la respuesta en término de corte basal para la vivienda de una planta.

De la misma manera, en la vivienda de dos plantas, se verificó una reducción de la respuesta del 97% para los terremotos de Mendoza y Altadena, y del 85% para Caucete. Por otro lado, se redujo un 70%, 67% y 45% para el caso de los espectros para suelo I, II y III respectivamente. En la Figura 7.31 se observan las reducciones de la respuesta en término de corte basal para la vivienda de dos plantas.

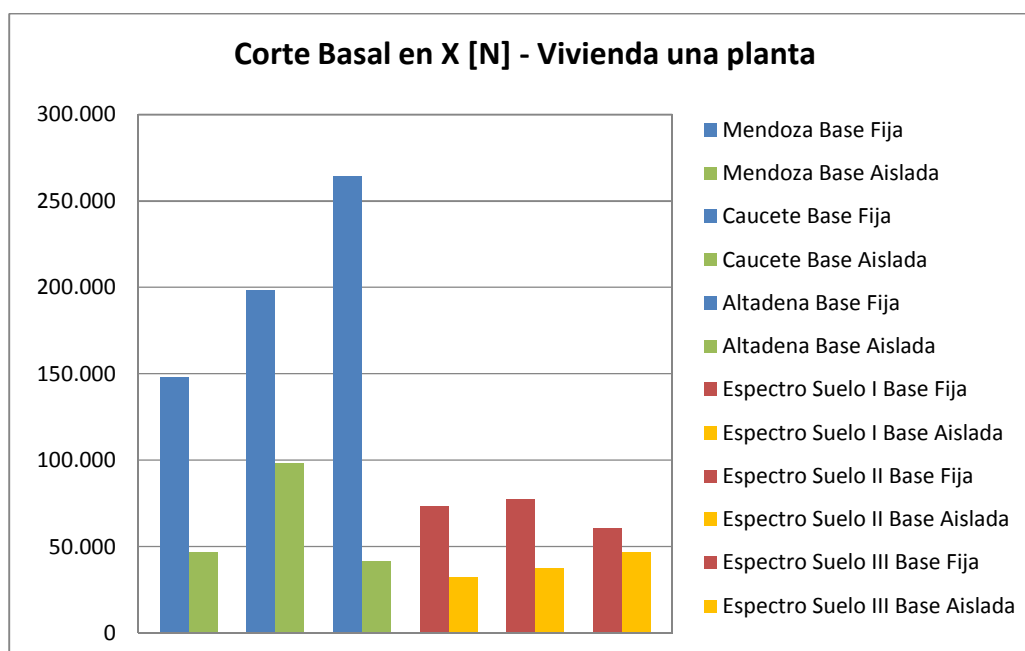


Figura 7.30. Corte Basal en X para la vivienda de una planta, base fija vs base aislada.

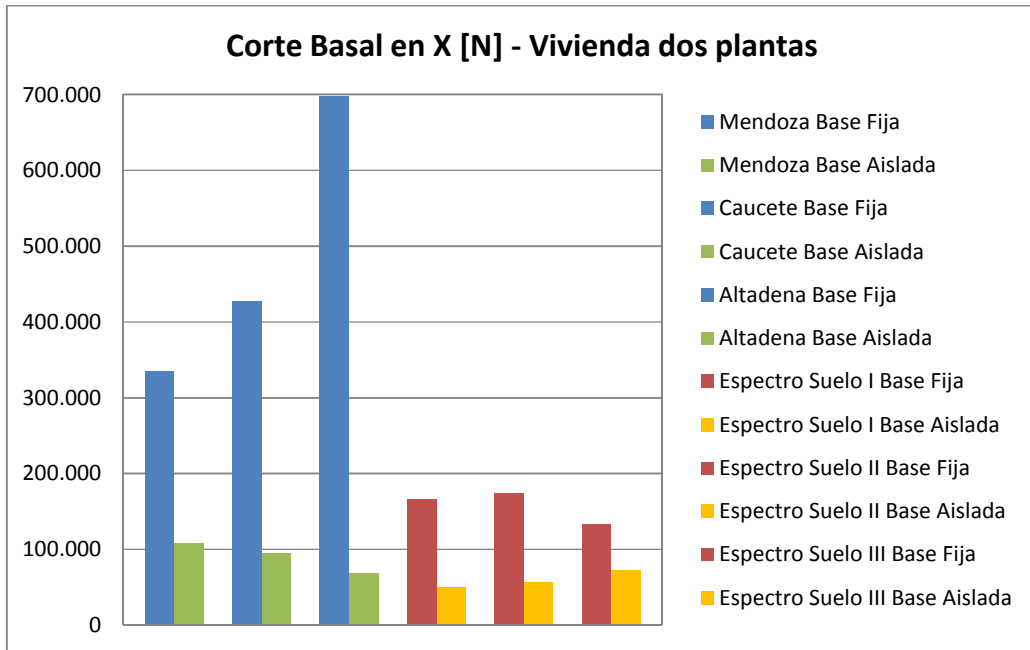


Figura 7.31. Corte Basal en X para la vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

Como era de esperar, los desplazamientos para el modelo de base fija son considerablemente menores que los obtenidos para los sistemas de aislamiento sísmico. Esta respuesta se asocia a la mayor rigidez del edificio con fundación tradicional en relación al modelo con aislamiento de base. En las Figuras 7.32 y 7.33 se observan las respuestas en término de desplazamiento para las viviendas de una planta y dos plantas.

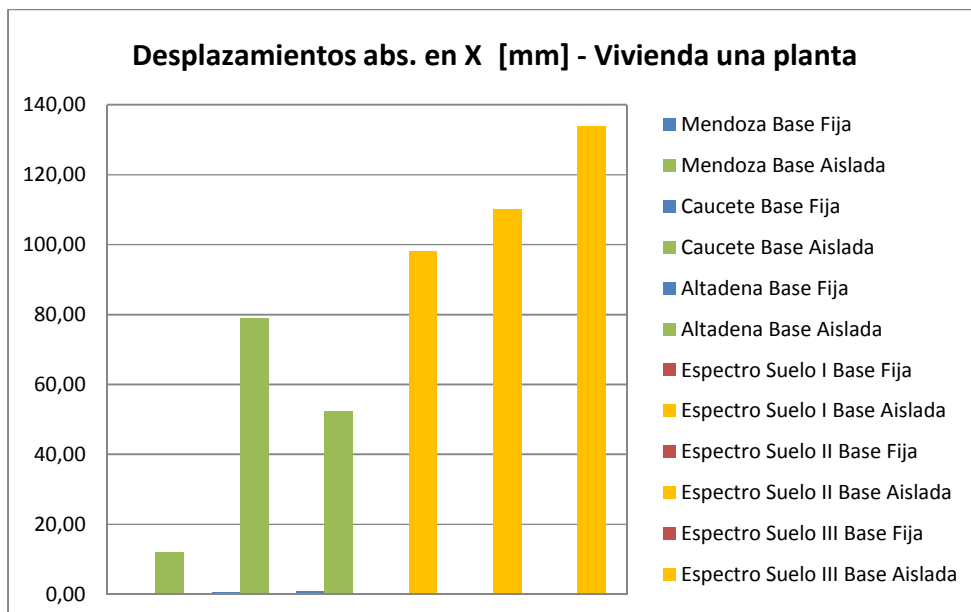


Figura 7.32. Desplazamiento absoluto en X para vivienda de una planta, base fija vs base aislada.

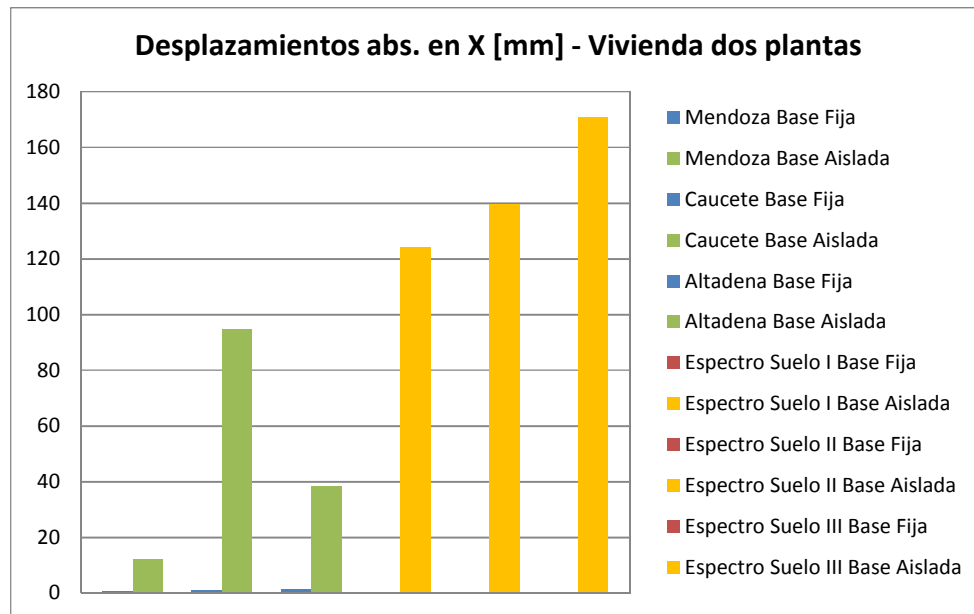


Figura 7.33. Desplazamiento absoluto en X para vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

Por lo general los desplazamientos de las estructuras aisladas se concentran a nivel del sistema de aislamiento, y de allí permanecen prácticamente constantes con la altura del edificio. Debido a las características de esbeltez que presentan los aisladores utilizados, el sistema presenta una rotación en la base de la estructura. Por lo tanto, los desplazamientos varían con la altura del edificio.

Por este motivo, las distorsiones de piso no pueden estimarse directamente a partir de los valores de desplazamientos laterales obtenidos del modelo de análisis, porque los mismos se encuentran influenciados por la rotación del conjunto estructural.

La estructura aislada se deforma como un bloque rígido y el modelo acusa un aumento de la deformación con la altura debido a un efecto de rotación en la base del edificio, producida por la esbeltez del sistema de aislamiento. Por lo tanto, el efecto de distorsión de piso no se manifiesta físicamente como un desplazamiento relativo entre un nivel superior e inferior debido a una deformación de los elementos verticales. La deformación relativa, entre dos niveles consecutivos, se debe a una rotación del edificio a nivel del sistema de aislamiento que se manifiesta a través de una deformación lateral (Figura 7.34).

Por lo tanto, y con el objeto de que las distorsiones de piso del edificio de base fija y del sistema aislado no sean comparadas erróneamente, los valores tabulados para éste último sistema, deben leerse en las tablas como “desplazamientos relativos horizontales por rotación del sistema de aislamiento”. Este cambio de designación tiene como objeto entender que la

deformación del conjunto aislado del sistema es físicamente distinta al del edificio con fundación tradicional.

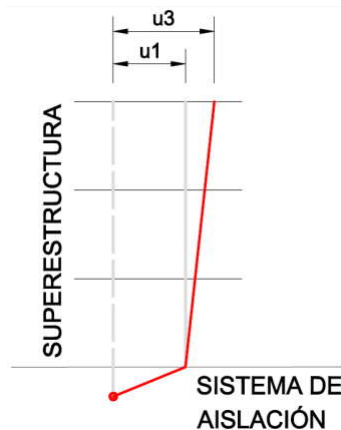


Figura 7.34: Esquema desplazamientos relativos horizontales por rotación del sistema de aislamiento.

Los sistemas de aislamiento sísmico, en general, reducen las fuerzas de corte en la base de los muros sismorresistentes, respecto a los edificios con fundación tradicional.

En la Figura 7.35 se comparan las respuestas locales en las viviendas de una planta de base fija y de base aislada, donde se observa una disminución del esfuerzo de corte en el muro M1X del 64% para el terremoto de Mendoza, 59% para el de Caucete y 75% para el de Altadena. En relación a los espectros de diseño se observó una disminución del 15% para los suelos I y II, y se produjo un aumento del 15% para el suelo III.

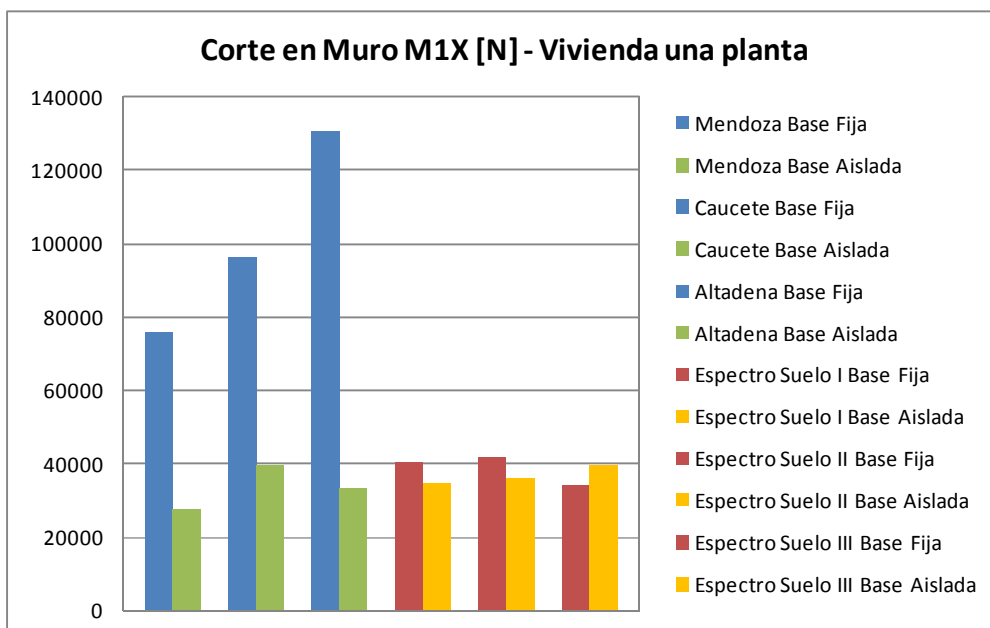


Figura 7.35. Corte en muro M1X en vivienda de una planta, base fija vs base aislada.

En la Figura 7.36 se analiza el corte en el muro M3Y de la vivienda de una planta, en ella se observa una reducción del 71%, 42% y 65% para los terremotos de Mendoza, Cauçete y Altadena respectivamente. Para los espectros de diseño se observó una reducción del 23% para los suelos I y II, y de un 4% para el suelo III.

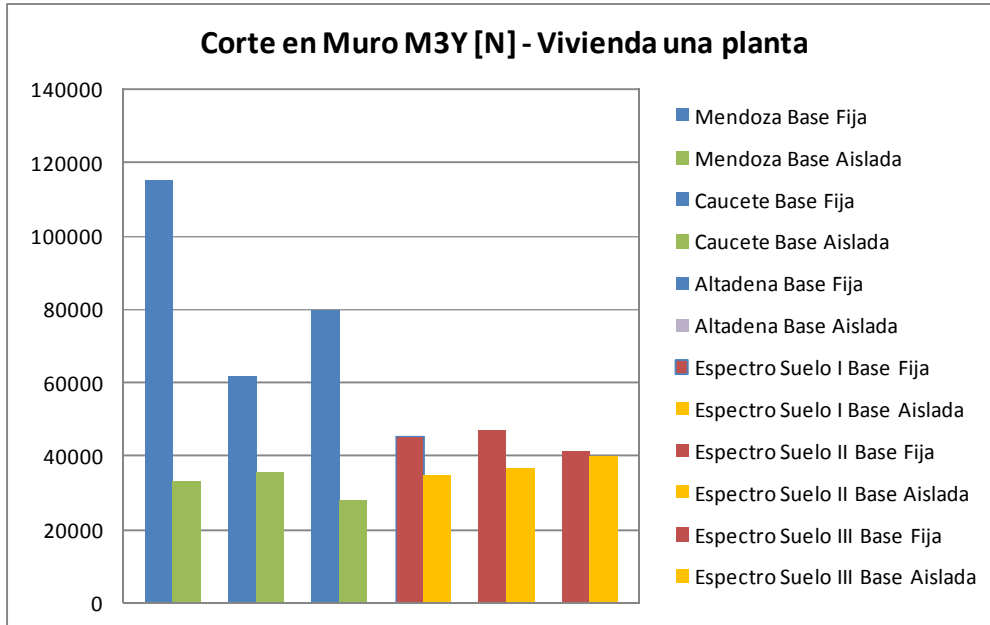


Figura 7.36. Corte en muro M3Y en vivienda de una planta, base fija vs base aislada.

En la vivienda de dos plantas, el sistema de aislación redujo los cortes del muro M3Y en un 88% en el terremoto de Mendoza, 90% en Cauçete y 94% en Altadena. Mientras que, respecto a los espectros de diseño, se redujo un 52%, 49% y 22% para los suelos I, II y III respectivamente (Figura. 7.37).

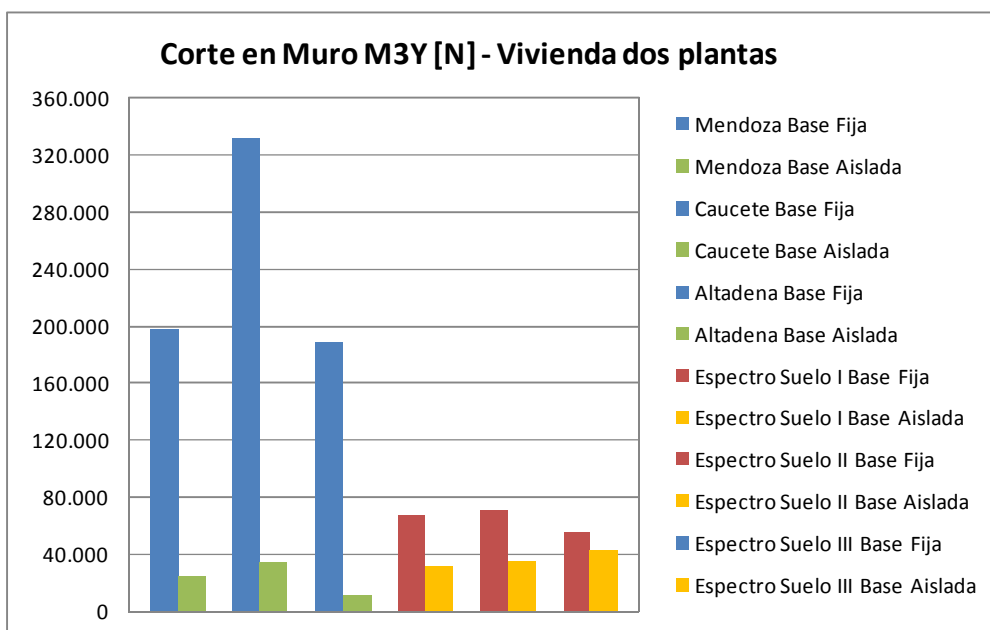


Figura 7.37. Corte en muro M3Y en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

Las solicitudes evaluadas para la vivienda de dos plantas, que permitirá comparar las respuestas de ambos sistemas de fundación, fueron: los esfuerzos de corte y momentos flectores en vigas y columnas de los pórticos. De manera ilustrativa se tomaron, para dicha comparación, una serie de elementos estructurales representativos. Los efectos del sistema de aislamiento se pueden apreciar en las figuras que se muestran a continuación.

En la Figura 7.38 se observa que para la columna del pórtico C9, los momentos máximos se reducen en un 93%, 89% y 96% para los terremotos de Mendoza, Cauçete y Altadena respectivamente. Por otro lado, para los espectros de diseño, para suelo I y II se constata una reducción del 72% en promedio, y para el tipo de suelo III, de un 52%.

Los cortes máximos para la columna del pórtico C9, se reducen un 94% aproximadamente, para los terremotos de Mendoza y Altadena, y un 88% para Cauçete. En cuanto a los espectros de diseño, para suelo I, II y III, las solicitudes disminuyeron un 72%, 69% y 52% respectivamente. Esto se muestra en la Figura 7.39.

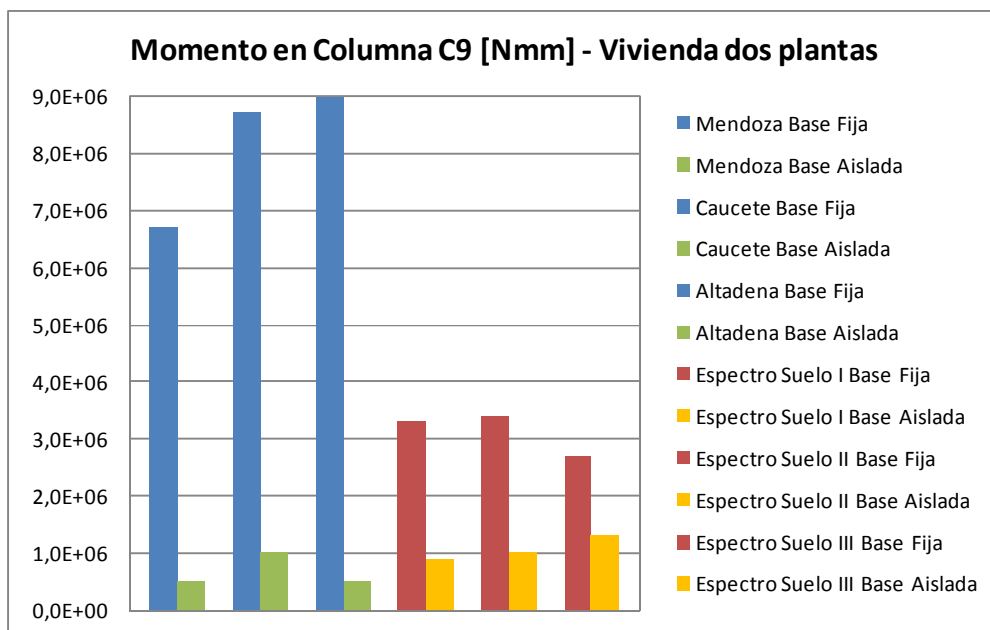


Figura 7.38. Momento en Columna C9 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

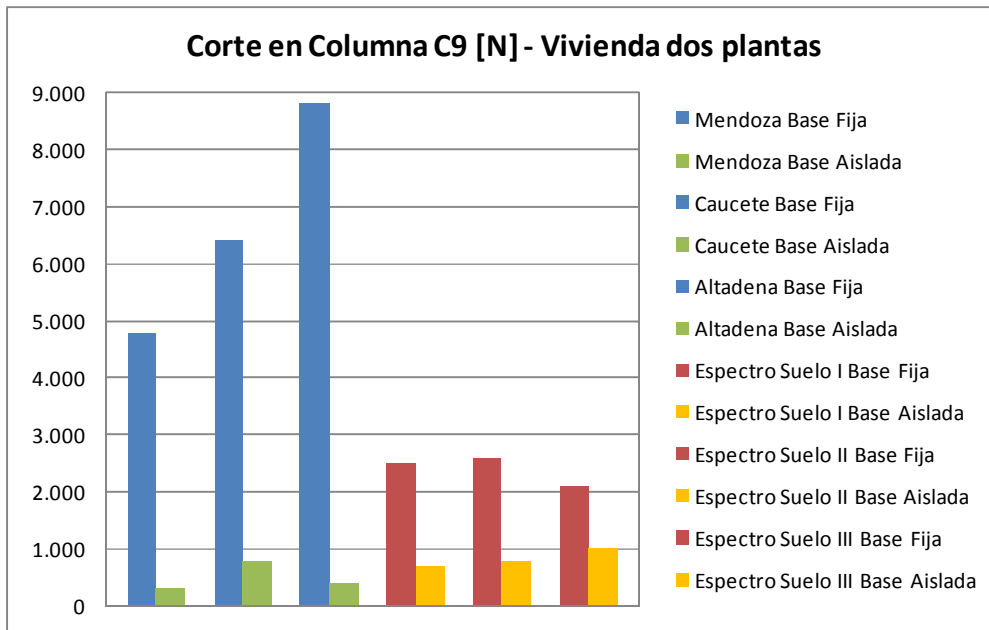


Figura 7.39. Corte en Columna C9 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

Los momentos máximos para la viga de pórtico B4 se reducen un 71%, 75% y 80% para los terremotos de Mendoza, Caucete y Altadena respectivamente. Por otro lado, para los espectros de diseño, para suelo I y II se constata una reducción del 48% en promedio, y para el tipo de suelo III, un 35%. Ver Figura 7.40.

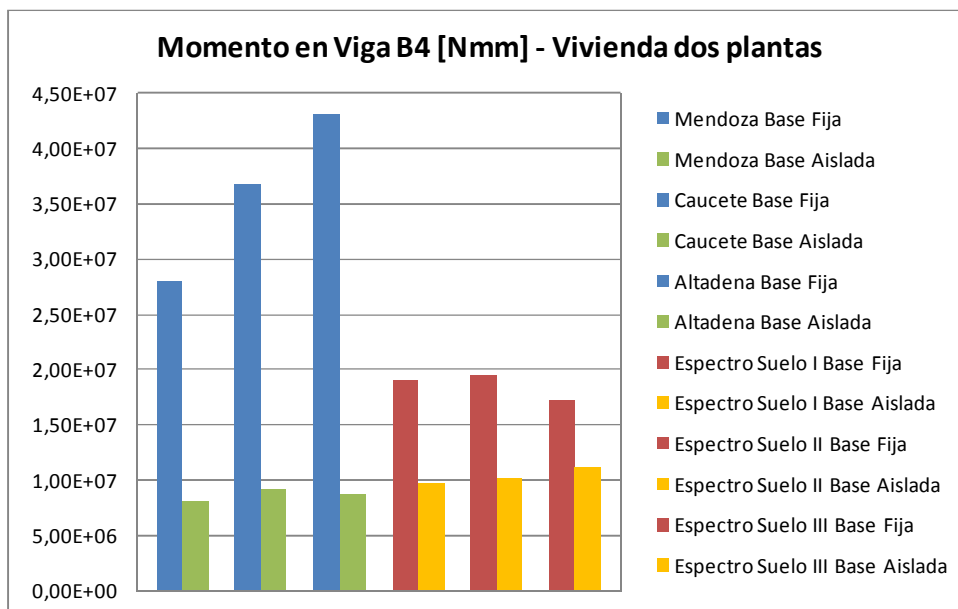


Figura 7.40. Momento en Viga B4 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

En la Figura 7.41 se observa la disminución de los cortes máximos para la viga del pórtico B4, en un 54% para el terremoto de Mendoza, 63% para Caucete y 67% para Altadena. En

cuanto a los espectros de diseño, para los suelos I y II las solicitaciones se redujeron un 32%, y para el suelo tipo III un 22%.

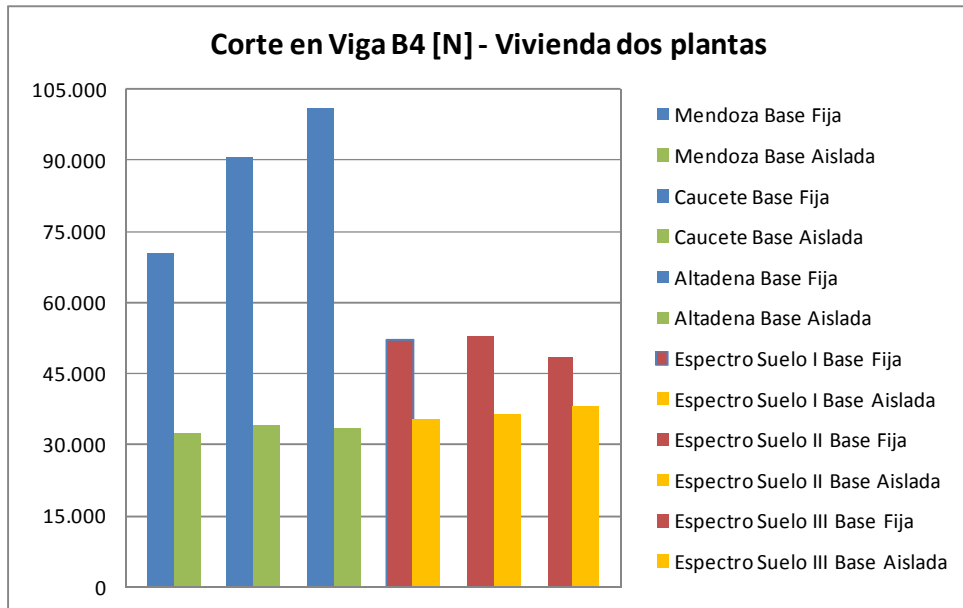


Figura 7.41. Corte en Viga B4 en vivienda de dos plantas, base fija vs base aislada.

Los resultados indican que, en general, el sistema de aislamiento, conformado con los aisladores objeto de la presente tesis, reducen de manera apreciable las solicitaciones producidas en los elementos estructurales de la superestructura respecto a las construcciones con fundaciones tradicionales. Otros resultados del presente análisis son tratados en las conclusiones de la tesis.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

Las investigaciones, teóricas y experimentales, realizadas en el marco de la tesis se desarrollaron con vistas a conseguir los objetivos planteados. Los resultados encontrados, en la mayoría de los casos, fueron los que se buscaban en la caracterización de los dispositivos de aislamiento, en otros casos el desarrollo de la tesis evidenció la necesidad de abordar otros temas o bien profundizar algunos contenidos. Estos últimos se proponen completarlos en el ámbito de futuros trabajos de investigación.

El desarrollo de la tesis, en sus aspectos innovativos, tuvo distintos objetivos entre las cuales se destacan: el diseño de los dispositivos de aislamiento, la fabricación de los aisladores sísmicos, los ensayos experimentales, la validación de modelos numéricos y el estudio de las respuestas sísmicas de obras emplazadas en regiones sísmicas del país. Por lo tanto y en tal sentido, es posible ordenar las conclusiones por cada una de las actividades de investigación que se llevaron a cabo.

8.1. Conclusiones relacionadas con el diseño y la fabricación de los dispositivos de aislamiento

1.a) El diseño de los aisladores objeto de la tesis se realizó con los parámetros de control que define la normativa chilena NCh2745 y las recomendaciones de diseño que indica la teoría básica de la técnica del aislamiento sísmico (J. Kelly 1986 y 1991). Todos los parámetros de diseño verifican los valores estipulados por la normativa de aplicación sin embargo, la verificación al pandeo del dispositivo sin ningún tipo de refuerzo de núcleo no ha sido satisfactoria por lo tanto, los aisladores con las características geométricas y mecánicas utilizadas en la verificación deberían ajustarse. Este aspecto conforma uno de los ítems de futuros trabajos de investigación. Cuando se utilizó la teoría básica del diseño de aisladores elastoméricos, se modificó la expresión del factor de forma, “s”, definido originalmente por J. Kelly (1991) atendiendo a las características de los aisladores que se diseñaron y fabricaron en el marco de la tesis.

1.b) Si bien el proceso de fabricación fue artesanal las fallas inherentes a dicho procedimiento fueron irrelevantes. La calidad de los dispositivos fue aceptable. Los ensayos físicos y mecánicos permitieron también verificar la calidad de la fabricación de los dispositivos, como así mismo los materiales que conformaron los dispositivos.

1.c) Un análisis preliminar y cualitativo del desempeño y de las respuestas de los prototipos de aisladores ensayados a cargas axiales con deformación vertical controlada, indicaron una muy buena performance, situación que vuelve a confirmar los adecuados procedimientos implementados en la fabricación de los dispositivos y también de los materiales utilizados.

1.d) Los ensayos experimentales con cargas verticales y horizontales cíclicas en forma simultánea, indican que los desplazamientos horizontales máximos se alcanzaron sin ningún tipo de falla en los aisladores, situación que indica que los procesos de vulcanizados utilizados durante la fabricación de los mismos fueron adecuados.

1.e) Si se comparan los ensayos realizados a cargas verticales y horizontales cíclicas en forma simultánea, sobre los dos prototipos de aisladores elastoméricos sin núcleo de confinamiento, se concluye que los resultados obtenidos para ambos fueron similares situación que pone de manifiesto que los procedimientos de fabricación pueden considerarse aceptables y que no se evidencian variaciones para dispositivos de las mismas características.

1.f) En los ensayos experimentales los máximos desplazamientos de los dispositivos de aislamiento se consiguieron sin falla en los aisladores. Esta situación pone de manifiesto dos aspectos: i) una adecuada metodología de fabricación y, ii) la apropiada adherencia entre la goma con la pletina de acero, tanto superior como inferior. Finalmente en todos los casos, el aislador recuperó su posición final por lo que es posible garantizar la fuerza restitutiva de los dispositivos.

1.g) Las conclusiones obtenidas del desarrollo de esta etapa de la investigación no solo han permitido obtener información de la respuesta de los dispositivos de aislamiento sino también de cuantificar la metodología utilizada en la fabricación de los aisladores con el objeto de contar con procedimientos probados para futuros trabajos que estén orientados en la línea de la tesis.

8.2. Conclusiones relacionadas con los ensayos experimentales

2.a) Se realizaron ensayos con deformación vertical controlada a un prototipo por serie. Para el caso de las series ASNC (aislador sin núcleo confinado) y ANTC (aislador con núcleo de tela cord) el dispositivo se deformó hasta 50 mm, para la serie ANAG (aislador con núcleo de acero grueso) se aplicó una deformación 15 mm, mientras que para la serie ANAF (aislador con núcleo de acero fino) se llegó a una deformación de 100 mm. En todos los casos, excepto el último, los prototipos permanecieron en el rango elástico, recuperando su forma inicial una

vez retirada totalmente la fuerza axial. En el caso de la serie ANAF, quedaron deformaciones permanentes moderadas producidas por el colapso del núcleo de acero que posee el aislador.

2.b) La relación fuerza – desplazamiento vertical del prototipo sin núcleo de confinamiento (ASNC-1) indican un desplazamiento vertical de 50 mm asociado a una carga vertical de 30.100 N. Este prototipo presentó un comportamiento elástico, en el cual no se producen daños ni alteraciones, situación que indica que los procesos de vulcanizado utilizados durante la fabricación de los mismos fueron los adecuados. Para el prototipo con núcleo de acero grueso (ANAG-1) para un desplazamiento vertical de 15.5 mm, se obtiene una carga vertical de 49.500 N. Para los prototipos con su núcleo confinado con el tubo de acero perforado se logra un considerable aumento de la rigidez vertical. No se presentaron daños y el prototipo recupero su forma y dimensiones iniciales una vez retirada la acción vertical. Para el aislador elastomérico con núcleo de tela cord (ANTC-1) se obtuvo un desplazamiento vertical de 51.74 mm y una carga en la misma dirección de 50.700 N. Durante el ensayo el prototipo presento un desempeño adecuado y un comportamiento elástico.

2.c) La relación fuerza – desplazamiento vertical del prototipo con núcleo de acero fino (ANAF-1) donde, para un desplazamiento vertical de 47.41 mm, se obtuvo una carga vertical de 51.640 N, mostró cambio en su rigidez debido al acomodamiento del núcleo de tubo de acero de chapa perforada, sin embargo, a partir de dicho punto su comportamiento continuó siendo lineal. No se observan ningún tipo de daño en la parte externa del prototipo.

2.d) De los ensayos experimentales a cargas axiales se obtuvo la rigidez vertical de cada prototipo. Los prototipos de aisladores sin núcleo confinado con núcleo de tela cord y con núcleo de acero fino, presentan una rigidez prácticamente constante durante todo el ensayo. Mientras que el prototipo con núcleo de acero grueso muestra una variación de rigidez durante el ensayo, es por ello que este último ha sido caracterizado por una rigidez vertical inicial y una rigidez vertical final.

2.e) La relación fuerza – desplazamiento del prototipo de aislador elastomérico con núcleo de acero fino (ANAF-1) donde, para un desplazamiento vertical de 100 mm, se obtuvo una carga vertical de 159.680 N., el aislador presenta deformaciones permanentes moderadas. El ensayo denota que para un desplazamiento de 60 a 70 mm se produce el colapso del núcleo de confinamiento, y a partir de este hecho se produce un cambio de rigidez en el prototipo, por tal motivo dicho dispositivo fue descartado de los ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas.

2.f) En los ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas, los desplazamientos horizontales máximos se alcanzaron sin ningún tipo de falla en todos los prototipos. Para mayores desplazamientos verticales, como consecuencia de una mayor carga axial de compresión, las curvas fuerzas-desplazamientos horizontales, encierran áreas mayores, por lo tanto, se puede confirmar que existe una mayor disipación de energía.

2.g) La rigidez horizontal efectiva de los prototipos ensayados no presenta significativa degradación cuando se incrementa la carga vertical y la fuerza horizontal. La rigidez efectiva del aislador, se mantiene casi constante lo largo de todo el ensayo y para los escalones de cargas impuestas.

2.h) La respuesta de los aisladores sujetos a cargas verticales y horizontales cíclicas muestra una marcada no linealidad en los ciclos de carga y descarga.

2.i) La valoración de los parámetros mecánicos de los aisladores a través de los ensayos experimentales indican que el amortiguamiento efectivo encontrado alcanzan valores aceptables (10% al 20%) y similares a otros aisladores elastoméricos convencionales que se comercializan en mercados internacionales. Para todos los prototipos ensayados se obtuvo que, a mayor desplazamiento vertical, como consecuencia de una mayor carga axial de compresión, resultan mayores valores de amortiguamiento efectivo y por ende una mayor disipación de energía.

2.j) El desarrollo de la tesis también ha permitido determinar los puntos de fluencia de los aisladores y la capacidad máxima de los mismos en términos de desplazamiento horizontal último y fuerza horizontal última para cada uno de los prototipos investigados en la tesis. Los resultados de tales parámetros han sido consignados en el capítulo correspondiente a la validación de los modelos numéricos.

2.k) Se verifica que la rigidez efectiva de los dispositivos de aislamiento está en función de las características geométricas y mecánicas de los aisladores con valores finales que varían entre 79 y 112 N/mm.

8.3. Conclusiones relacionadas con la validación de los modelos numéricos

3.a) Se desarrolló y calibró un modelo numérico para comparar las respuestas obtenidas experimentalmente. Para evaluar el grado de aproximación se compararon los ciclos histeréticos obtenidos con el modelo numérico de Wen y los generados a partir de los ensayos experimentales, para cada uno de los prototipos. Los ciclos histeréticos de los ensayos

experimentales no presentaron simetrías para la carga y descarga frente a la acción horizontal, mientras que los obtenidos a partir del modelo de Wen son simétricos y de curvas más suaves. La no simetría de los ciclos en los ensayos experimentales responde a factores operativos de del equipamiento disponible para la aplicación de la carga horizontal en los dispositivos de aislamiento, sin embargo, la aproximación cualitativa de ambos ciclos es satisfactoria para todos los casos.

3.b) La valoración cuantitativa se realizó comparando los valores de amortiguamientos efectivos obtenidos a partir de los ensayos (ξ) y los generados con el modelo numérico de Wen (ξ). Los resultados obtenidos indican que el modelo numérico seleccionado, queda adecuadamente validado en cuanto área de ciclo histerético y amortiguamiento efectivo. En cambio este modelo no representa la rigidez post-fluencia, la cual se visualiza en los ensayos experimentales.

3.c) Los prototipos de aislamiento sísmico arrojaron buenas aproximaciones con los valores recomendados por la bibliografía para los dispositivos de aislamiento sísmico estudiados en el ámbito de la tesis.

3.d) Para la implementación de modelos de elemento finitos como por ejemplo en código Abaqus, se obtuvo una relación fuerza- desplazamiento que cualitativamente presenta una adecuada coincidencia con la obtenida del ensayo experimental. Las fuerzas y desplazamientos máximas y mínimas del modelo hiperelástico de Ogden son similares a los obtenidos en los ensayos experimentales.

3.e) La valoración cuantitativa del modelo de Ogden fue la de cuantificar la energía disipada por el aislador y el amortiguamiento efectivo del mismo, dado que los dos parámetros resultan de interés para evaluar las respuestas de los dispositivos elastoméricos. Los resultados concluyen que el modelo numérico de Ogden, es adecuado para representar los ensayos experimentales de los prototipos elastoméricos ASNC.

3.f) Las curvas fuerzas – desplazamientos obtenidos con el modelo numérico propuesto en la tesis y las obtenidas con los ensayos experimentales presentan muy buenas correlaciones, situación que ha permitido validar el modelo numérico utilizado. El modelo numérico de Ogden ha permitido obtener la constitutiva de los aisladores estudiados en la tesis en el formato fuerza-deformación, para un desplazamiento lateral controlado máximo de 70 mm.

8.4. Conclusiones relacionadas con las respuestas sísmicas de obras emplazadas en regiones sísmicas

El estudio de las respuestas de viviendas aisladas con los dispositivos generados en la tesis arrojaron las siguientes conclusiones:

4.a) La estructura, implementada con los dispositivos generados en la tesis, se comporta como un bloque rígido que se desplaza lateralmente sobre los aisladores, y no hay desplazamientos relativos importantes entre los niveles de la vivienda.

4.b) Para cuantificar la respuesta de las construcciones con los dispositivos generados en el ámbito de la tesis se realizó un análisis normativo (INPRES CIRSOC 103. 2013) y para ello se utilizaron como input espectros de diseño y acelerogramas reales. Con relación a las respuestas derivadas del empleo de espectros de diseño se concluyó que la efectividad del sistema de aislamiento de base es función de la forma del espectro y del tipo de suelo.

Por medio del análisis espectral de norma desarrollado en la tesis, se observó que los períodos de las estructuras aisladas se desplazan hacia la rama descendente de los espectros de diseño del reglamento consiguiendo disminuir las ordenadas espectrales y por lo tanto las respuestas estructurales.

4.c) Con relación a los resultados obtenidos del análisis del punto anterior, se concluye que los dispositivos elastoméricos de baja carga axial desarrollados en la tesis, tienen un mejor desempeño en los tipos de suelos I y II, ya que para los suelos blandos (suelo tipo III), resulta difícil alejar el período fundamental del plafón del espectro de diseño correspondiente. En los casos estudiados no se logró la disminución esperada de las respuestas estructurales.

4.d) El estudio realizado en las viviendas, con fundación tradicional (base fija) y con los dispositivos de aislamiento de base diseñado en el ámbito de la tesis, se considera favorable debido a una importante reducción de las solicitaciones en la mayoría de los elementos estructurales. En tal sentido se pueden citar:

4.d.i) Los cortes basales son menores para el modelo con aislamiento de base respecto a los obtenidos para los sistemas con base fija. En la vivienda de una planta, el sistema de aislamiento conduce a una reducción de la respuesta del 95% para el sismo de Mendoza, del 72% para el sismo de Caucete y del 86% para el sismo de Altadena. Para el caso del análisis espectral se observaron reducciones del 57%, 52% 23% para los suelos I, II y III respectivamente. De la misma manera, en la vivienda de dos plantas con aislamiento de base se observaron reducciones de la respuesta del 97% en los sismos de Mendoza y

Altadena, y del 85% en Cauce. Mientras que para el análisis espectral las reducciones fueron del 70%, 67% y 45% en los espectros de suelo I, II y III respectivamente.

4.d.ii) Los desplazamientos para el modelo de base fija son, lógicamente, considerablemente menores que los obtenidos para los sistemas de aislamiento sísmico. Esta respuesta se asocia a la mayor rigidez del edificio con fundación tradicional en relación al modelo con aislamiento de base. La bibliografía clásica (Kelly, 1986, 1993) indica que los desplazamientos del sistema aislado se concentran a nivel de los dispositivos de aislamiento y de allí permanecen prácticamente constantes a lo largo de la altura del edificio. Para los casos estudiados en la tesis y debido a las características de esbeltez que presentan los aisladores utilizados, el sistema presenta una rotación en la base de la estructura y los desplazamientos máximos se concentran a nivel de los dispositivos de aislamiento, pero los desplazamientos no se mantienen constantes con la altura del edificio.

4.d.iii) Con relación a las fuerzas de corte, los sistemas de aislamiento sísmico, en general, reducen los cortes en la base de los muros sismo resistente. Por ejemplo, para la vivienda de una planta, en el muro M1X se observa una disminución del 64% para el sismo de Mendoza, 59% para el de Cauce y 75% para el de Altadena. En relación al análisis espectral, se observan disminuciones del 15% para los suelos I y II e incrementos del 15% para el suelo tipo III.

4.d.iv) En la vivienda de dos niveles, el sistema de aislamiento arroja reducciones, en los esfuerzos de corte en los muros del 88% para el sismo de Mendoza, 90% para Cauce y 94% para Altadena. En el análisis espectral las reducciones son del 52%, 49% y 22% para los suelos I, II y III respectivamente.

4.d.v) Con relación a las demandas en algunos elementos estructurales, representativos de la vivienda de dos niveles, se puede observar que, por ejemplo, para la columna C9 de uno de los pórtico sismo resistentes, los momentos máximos presentan reducciones de un 93%, 89% y 96% para los sismos de Mendoza, Cauce y Altadena respectivamente. Por otro lado, para el análisis con los espectros de diseño para suelo tipo I y II se observaron reducciones del 72% en promedio, y para el tipo de suelo III, del 52% en promedio.

4.d.vi) Los esfuerzos de cortes máximos para la misma columna C9 del pórtico mencionado en el punto anterior, se observan reducciones del 94% aproximadamente, para los sismos de Mendoza y Altadena, y un 88% para el sismo de Cauce. En cuanto al análisis espectral, para suelo I, II y III, las solicitaciones disminuyeron un 72%, 69% y 52% respectivamente.

4.d.vii) Los momentos máximos, por ejemplo para la viga B4 del mismo pódico al cual pertenece la columna C9 acusa reducciones del 71%, 75% y 80% para los sismos de Mendoza, Cauce y Altadena respectivamente. Para el análisis con el espectro de diseño, para suelo I y II se observaron reducciones del 48% en promedio, y para el tipo de suelo III, de un 35%.

4.d.viii) Con relación a los cortes máximos en la misma viga B4, se observaron reducciones del 54% para el sismo de Mendoza, 63% para Cauce y 67% para Altadena. Cuando se realiza un análisis utilizando los espectros de diseño de la normativa, para los suelos I y II las solicitaciones se redujeron un 32% mientras que para suelo tipo III fueron del 22%.

4.e) En general, el sistema de aislamiento reduce de manera aceptable las solicitaciones producidas en los miembros estructurales de la superestructura respecto a la misma vivienda, pero con fundaciones tradicionales. Cabe destacar, que la disminución de las demandas es siempre mayor para el análisis de los sismos reales que para los espectros de diseño que define la normativa de aplicación (INPRES CIRSOC 103, 2013). Esto es debido a que los análisis en el tiempo por naturaleza propia contienen la dinámica del movimiento frente a acciones estáticas del espectro. Para análisis que consideren terremotos reales (sin ser escalados a nivel del espectro de la normativa), con niveles de aceleraciones mayores a las impuestas por el espectro del reglamento, se observan importantes reducciones de la respuestas y por lo tanto queda en evidencia las ventajas del uso de dispositivos de aislamiento como estrategia de protección sísmica.

8.5. Comentarios finales

El plan de investigación desarrollado en el ámbito de la tesis cumplió los objetivos trazados en la misma y ha permitido desarrollar y generar los estándares básicos para el diseño y la fabricación de dispositivos elastoméricos de aislamiento sísmico para estructuras de baja carga axial. Las prácticas desarrolladas también han permitido definir una metodología para los ensayos experimentales y su respectiva validación numérica.

Sin embargo, las limitaciones tecnológicas que existen en el medio local productivo son evidentes por tal motivo es sumamente importante promover la incorporación de tecnología aplicada que permita el desarrollo de dispositivos con mayores capacidades, como así también disponer de equipamiento específico para evaluar la calidad de los dispositivos cuando los

mismos deban ser ensayados, previo a su montaje en obra como lo exige las normas de la especialidad.

8.6. Recomendaciones para futuras investigaciones

El desarrollo de la tesis ha permitido cumplir con los objetivos impuestos para la misma, no obstante, futuros trabajos de investigación en esta línea permitirán avanzar en el nivel de conocimiento logrado en el presente trabajo. Por lo tanto, algunas de las investigaciones futuras deberían estar orientadas en las siguientes líneas:

- Investigar la variación de las características mecánicas del material que componen los aisladores con el objeto de mejorar el amortiguamiento y la disipación de energía.
- Evaluar las respuestas de dispositivos de aislamiento que posean otras características mecánicas y geométricas, distintas a las evaluadas en la presente tesis, por ejemplo, trabajar con otras relaciones de esbeltez.
- Investigar la variación de las características geométricas con el objeto de incrementar el nivel de carga axial que soporta el dispositivo de aislamiento.
- Evaluar nuevos parámetros de diseños para emplearlos en el modelo de Ogden para otros dispositivos de aislamiento desarrollados con materiales elastoméricos.
- Evaluar características geométricas y mecánicas de los aisladores para conseguir una mayor eficiencia de los dispositivos para ser utilizados en suelos blandos de regiones sísmicas.
- Analizar disposiciones alternativas de los dispositivos de aislamiento en las viviendas estudiadas con el objeto de verificar la posibilidad de mejorar la eficiencia en las respuestas estructurales.
- Además de las viviendas analizadas en la tesis, estudiar las respuestas de otros tipos de construcciones, con plantas más extendidas y alturas mayores, con el objeto de cuantificar la respuesta de los dispositivos de aislamiento diseñados en el ámbito de la tesis para acciones sísmicas de normativa o bien de input de terremotos que puedan esperarse en las regiones sísmicas del país.

ANEXO I: BASE TEÓRICA DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

A1.1. Teoría no lineal del aislamiento sísmico

Durante varios años se ha utilizado la simulación numérica de las estructuras aisladas para encontrar y desarrollar algoritmos de cálculo no lineales eficientes que permitan soluciones, dentro de la no linealidad de las ecuaciones de movimiento (Nagarajaiah et al., 1991, Barbat, et al., 1997). Los métodos desarrollados proponen procedimientos para realizar la integración en el tiempo.

Uno de los métodos utilizados se conoce como “monolíticos” los cuales no distinguen los grados de libertad asociados de la estructura de aquellos que corresponden al sistema de aislamiento sísmico, por lo tanto, son métodos pocos eficientes para estructuras aisladas (Bozzo et al, 2000).

Los algoritmos basados en una “condensación estática” son los más utilizados porque permiten reducir el orden del problema no lineal al número de grados de libertad inelástico, es decir, por ejemplo en un edificio de cuatro niveles con tres grados de libertad por planta, tiene un total de quince grados de libertad, incluido los tres de la base, entonces un procedimiento numérico basado en la condensación estática reduce el problema no lineal a sólo los tres grados de libertad correspondiente a la base.

Por último, existen métodos iterativos que permiten resolver las ecuaciones del movimiento de estructuras con aislamiento sísmico (Bozzo, et al, 2000), se los conoce como métodos iterativos por bloques y resultan ser la combinación de procesos iterativos con la linealización de los términos no lineales (Barbat, et al, 1996).

A1.1.1. Métodos monolíticos de integración paso a paso

Para realizar un análisis no lineal de la respuesta sísmica de una estructura con aislamiento sísmico, la ecuación del movimiento puede expresarse como:

$$M_o \ddot{X} + C \dot{X} + f(X) = F \quad \text{A1.1}$$

El vector $f(X)$ representa las fuerzas no lineales, sin embargo el mismo puede linealizarse en términos de las fuerzas equivalentes pseudo estáticas en cada paso de tiempo:

$$f(X) = K_o X + F_N \quad \text{A1.2}$$

En la última ecuación K_o representa la matriz de rigidez, la cual es lineal y puede ser evaluada con la tangente inicial; F_N representa el vector de pseudofuerza el cual es función del tiempo. La ventaja de utilizar pseudofuerzas se debe a que la matriz de rigidez original se descompone una sola vez, al inicio de la integración y precisamente este hecho es lo que hace que el método numérico sea poco eficiente.

Por lo tanto, el problema no lineal se resuelve evaluando las fuerzas equivalentes en cada paso, si ellas corresponden a un número reducido de grados de libertad, el procedimiento numérico puede ser aceptable (Bozzo et al, 2000).

A1.1.2. Métodos de iteración por bloques

Encontrar la solución no lineal de un sistema con aislamiento no es una tarea simple debido a las diferencias importantes de rigideces entre la estructura y la base. Dichas diferencias exigen que los incrementos de tiempos, en un análisis paso a paso, sean muy pequeños, por lo tanto, requieren un gran número de iteraciones lo que hace su convergencia muy lenta (Barbat et al, 1996). Por la causa explicada el método realiza esquemas de iteración por bloque, lo que permite reducir el número de iteraciones y disminuye el tiempo de convergencia (Bozzo et al, 2000).

Con el objeto de expresar el lineamiento global del método se supone un ejemplo para un problema genérico acoplado:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22}(y) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \quad \text{A1.3}$$

En las ecuaciones del sistema (A1.3), “z” e “y”, son vectores por determinar, q_1 y q_2 son los vectores de carga y A_{ij} con $i,j = 1,2$, son matrices donde A_{22} depende del valor de y . Las ecuaciones del sistema (A1.3) están acopladas linealmente. La matriz A_{22} se linealiza de la siguiente forma:

$$A_{22}(y^i) y^i \approx A_{22}^L y^i + \psi^{i-1} \quad \text{A1.4}$$

A_{22}^L , es la forma linealizada de A_{22} . Entonces la ecuación (A1.3) puede ser puesta como:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22}^L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z^i \\ y^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 - \psi y^{i-1} \end{Bmatrix} \quad \text{A1.5}$$

A partir de la ecuación (A1.5) se emplea la iteración por bloque de Gauss-Seidel, de tal manera que se pueden expresar las siguientes dos ecuaciones acopladas (Bozzo, et al, 2000):

$$A_{11} z^i = q_1 - A_{12} y^{i-1} \quad \text{A1.6}$$

$$A_{22}^L y^i = q_2 - \psi_{y^{i-1}} - A_{21} z^i \quad \text{A1.7}$$

Con estas ecuaciones es posible formular un procedimiento iterativo por bloques. Se resuelve primero la ecuación (A1.6) dando un valor a z_i y este se emplea para resolver la ecuación (A1.7) para obtener el valor de y_i . El procedimiento se repite de la manera indicada hasta tanto el algoritmo matemático tenga convergencia.

De la observación de los métodos de análisis no lineales expuestos se concluye que el uso de los mismos, como herramienta de trabajo, requiere de una sólida formación en dicho campo. La ingeniería estructural hoy cuenta con herramientas de trabajo que resuelven con cierta fluidez problemas no lineales en general y también lo hacen para los sistemas de aislamiento sísmico.

Programas computacionales para fines múltiples y específicos, (SAP, ETAB, SeismoStruct, etc.) de ediciones recientes, han incorporado rutinas que permiten evaluar la respuesta no lineal de estructuras con aislamiento sísmico de base utilizando algunos métodos de la dinámica estructural (modal, historia en el dominio del tiempo y paso a paso). Esta herramienta, muy poderosa por cierto, permite “ensayar” distintas soluciones en un tiempo aceptable de manera tal de optimizar el diseño del sistema de aislamiento.

A1.2. Teoría del aislamiento sísmico de base aplicada a edificios de varios grados de libertad

La extensión de la teoría lineal del aislamiento sísmico de dos grados de libertad a varios grados de libertad fue formulada por Kelly J. (1993). El modelo analítico es similar al de dos

grados de libertad. Para varios grados de libertad, expresada en forma matricial, la formulación puede escribirse como:

$$M_o \ddot{X} + C \dot{X} + K X = -M_o J \ddot{u}_{g(t)} \quad \text{A1.8}$$

Se explicitan las matrices de la ecuación (A1.8):

$$M_o = \begin{bmatrix} m_b + m_{tot} & J^t M_s \\ M_s J & M_s \end{bmatrix} \quad (i) \quad C = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix} \quad (ii) \quad K = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \quad (iii) \quad J = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (iv) \quad X = \begin{bmatrix} x_b \\ X_s \end{bmatrix} \quad (v)$$

En la matriz (i) la M_s representa la matriz de masas del edificio y la m_{tot} , sumatoria de las masas del edificio ($m_{tot} = \sum_{i=1}^n m_i$).

En la matriz (ii) C_s representa la matriz de amortiguamiento de la estructura. En la (iii) K_s , es la matriz de rigidez de la estructura y en todos los casos el subíndice b está referido a las características del sistema de aislamiento.

Como en el caso de dos grados de libertad, la solución de la ecuación (A1.8) está asociada a un problema de valores y vectores propios de la forma de la ecuación (A1.9).

$$(K - \omega^2 M_o) \varphi = 0 \quad \text{A1.9}$$

Las frecuencias y las formas modales pueden obtenerse aplicando métodos clásicos de la dinámica estructural que permitan encontrar la solución de la ecuación (A1.9). Sin embargo, la extensión realizada por Kelly J. (1993), indica que dichos métodos pueden conducir a errores numéricos originados por el mal condicionamiento de la matriz de rigidez debido a que aparece un elemento en la diagonal, dos órdenes de magnitud inferior al resto. Para darle solución a este problema el autor (Kelly, 1993, 1996) propone un método iterativo que parte de las frecuencias y modos de vibración de la estructura con base fija. Los resultados numéricos indican que el procedimiento es adecuado, ya que las frecuencias a partir del segundo modo no son afectadas de manera significativa por la presencia del sistema de aislamiento (Bozzo et al, 2000).

A1.3. Influencia del amortiguamiento en la respuesta de los sistemas con aislamiento sísmico

La ecuación de movimiento para sistemas traslacionales de un solo grado de libertad es representada por la ecuación (A1.10), mientras que el factor de amortiguamiento o relación de amortiguamiento ξ se define por la ecuación (A1.11).

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f_{(t)} \quad \text{A1.10}$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c\omega_n}{2k} \quad \text{A1.11}$$

Donde: c : Coeficiente de amortiguamiento del sistema.

k : Rigidez del sistema.

m : Masa del sistema.

El amortiguamiento crítico c_c , se define por la expresión (A1.12) y la razón de amortiguamiento ξ , por la (A1.13).

$$c_c = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} \quad \text{A1.12}$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} \quad \text{A1.13}$$

Un sistema vibratorio dinámico en el cual ($0 < \xi < 1$) se lo conoce como sistema subamortiguado, si ($\xi > 1$), se lo denomina sistema sobreamortiguado. Cuando ($\xi = 1$) se dice que el sistema es amortiguado críticamente.

Los diferentes tipos de amortiguamiento, utilizados en los diseños de dispositivos especiales de disipación de energía, se encuentran referidos al amortiguamiento viscoso, el cual puede resumirse muy brevemente con el siguiente concepto. Cuando un líquido viscoso fluye alrededor de un émbolo en un cilindro (Figura A1.1.), la fuerza de amortiguamiento que se genera es proporcional a la velocidad relativa entre los dos límites que confinan el líquido.

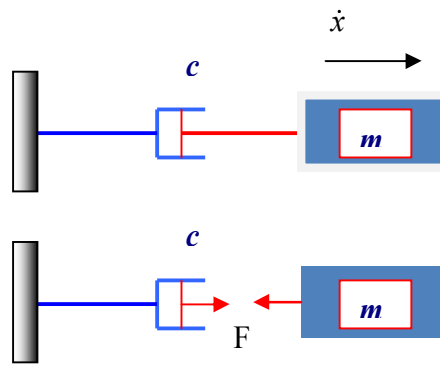


Figura A1.1. Representación de un amortiguador viscoso.

En la figura anterior el pistón se desplaza con una velocidad (\dot{x}) respecto de la carcasa del cilindro, la cual está fija. La magnitud de la fuerza del amortiguador F siempre actúa en la dirección opuesta a la velocidad. La magnitud de la fuerza del amortiguador $F(\dot{x})$ es una función no lineal de la velocidad o bien puede considerarse aproximadamente una función lineal de la misma, lo cual depende de la construcción del amortiguador y del rango de velocidades. En el caso lineal, la relación se expresa según se indica en la ecuación (A1.14).

$$F(\dot{x}) = c \dot{x} \tag{A1.14}$$

Donde c es el coeficiente de amortiguamiento definido anteriormente. Para el caso de un amortiguador viscoso no lineal definido por una función $F(\dot{x})$, el amortiguamiento viscoso lineal equivalente, próximo a una velocidad de operación $\dot{x} = \dot{x}_l$, se determina con la ecuación A1.15.

$$c_e = \left. \frac{dF(\dot{x})}{d\dot{x}} \right|_{\dot{x}=\dot{x}_l} \tag{A1.15}$$

La energía disipada por un amortiguador viscoso lineal puede expresarse por la ecuación A1.16.

$$E_d = \int F_D dx = \int F_D \dot{x} dt = \int c \dot{x}^2 dt = c \int \dot{x}^2 dt \tag{A1.16}$$

Además del amortiguamiento viscoso, existen otros tipos de amortiguamientos entre los cuales se destacan: amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, amortiguamiento por fluido o del cuadrado de la velocidad y amortiguamiento estructural o del material. Los dos primeros son amortiguamientos no lineales, mientras que el estructural es lineal. Es habitual relacionar los tres modelos de amortiguamiento con el modelo de amortiguamiento viscoso

por medio de una cantidad llamada amortiguamiento viscoso equivalente c_{eq} , que es el valor del coeficiente de amortiguamiento c que se requiere para disipar la misma cantidad de energía por periodo de oscilación armónica forzada (Balachandran et al., 2005).

En un sistema vibratorio, las fuerzas asociadas a la rigidez y la inerciales son conservativas, por lo tanto, el trabajo que efectúa cada una de las fuerzas en cada uno de los ciclos de oscilación forzada es cero, en consecuencia, si se desea determinar la disipación de energía en un sistema vibratorio sólo debe ponerse atención en el amortiguador o en la fuerza de disipación (F_D). El valor de la energía disipada queda expresado por la ecuación (A1.16).

Es posible suponer, para excitaciones armónicas de sistemas lineales después de que los transitorios se extinguen, que las respuestas de desplazamiento y velocidad tienen la forma que indican las ecuaciones (A1.17). El periodo de las respuestas de desplazamiento y velocidad es $2\pi/\omega$ y ω es la frecuencia de la fuerza.

$$\begin{aligned}x_{(t)} &= X_o \text{sen}(\omega t - \phi) \\ \dot{x}_{(t)} &= \omega X_o \text{sen}(\omega t - \phi)\end{aligned}\tag{A1.17}$$

Si se admite un modelo de amortiguamiento viscoso lineal, la fuerza disipativa viene dada por la ecuación (A1.14). Si se sustituye dicho valor en la ecuación (A1.16), la energía disipada resulta la cantidad indicada en la (A1.18).

$$E_{vis\ cos\ o} = c \int_0^{2\pi/\omega} \dot{x}^2(t) dt\tag{A1.18}$$

Si en ésta última ecuación se reemplaza la respuesta en términos de velocidad, de la ecuación (A1.17), la energía disipada puede expresarse como indica la ecuación (A1.19).

$$E_{vis\ cos\ o} = c \omega^2 X_o^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \phi) dt = c \pi \omega X_o^2\tag{A1.19}$$

La ecuación (A1.19) indica que la energía disipada es linealmente proporcional al coeficiente de amortiguamiento c , a la frecuencia de excitación ω y al cuadrado de la amplitud del desplazamiento X_o .

Para otros modelos de amortiguamiento también es posible cuantificar la energía disipada a través del amortiguamiento viscoso equivalente c_{eq} (Balachandran et al., 2005). También podemos citar que para el caso de amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco, la energía disipada ($E_{Coulomb}$) es proporcional al coeficiente cinético de fricción (μ), a la carga normal ($N = m.g$) y a la amplitud del desplazamiento (X_o) (A1.20) mientras que el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente es inversamente proporcional a la frecuencia de excitación y a la amplitud de la respuesta de desplazamiento (X_o) (A1.21).

$$E_{Coulomb} = 4\mu m g X_o \quad A1.20$$

$$c_{eq} = \frac{4\mu m g}{\pi \omega X_o} \quad A1.21$$

Por último, para amortiguamiento por fluido, la energía disipada es proporcional a un coeficiente c_d el cual depende del área de la masa del líquido en una dirección normal y de la densidad de la masa del fluido; del cuadrado de la frecuencia de excitación y del cubo de la amplitud de desplazamiento (X_o) (A1.22), mientras que el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente es proporcional a la frecuencia de excitación y a la amplitud de la respuesta ecuación (A1.23).

$$E_{fluido} = \frac{8}{3} c_d \omega^2 X_o^3 \quad A1.22$$

$$c_{eq} = \frac{8 c_d \omega X_o}{3\pi} \quad A1.23$$

La influencia del amortiguamiento en la respuesta de sistemas con aislamiento sísmico ha sido evaluada por distintos autores (Naeim et al., 1999, Jangid et al., 2001). Estudios teóricos del acoplamiento de las ecuaciones dinámicas para sistemas de aislamiento sísmico (Naeim et al., 1999), expresan conclusiones sobre la influencia del amortiguamiento en los valores de las aceleraciones de piso. En la práctica y para los casos frecuentes se asume que los términos ubicados fuera de la diagonal principal de la matriz de coeficientes de amortiguamiento C son despreciables, lo que permite resolver el sistema de ecuaciones del movimiento como un sistema desacoplado, bajo esta condición y con procedimientos simples es posible obtener, de manera rápida, la respuesta de la estructura con aislamiento sísmico (desplazamientos, cortes en la base, distorsión de piso, etc.).

Sin embargo, para determinados terremotos, sobre todo y específicamente para los asociados a campo cercano, o para requerimientos de códigos actuales (UBC-97), se hace necesario controlar los importantes valores de desplazamientos que le imponen tales requerimientos. Dichos desplazamientos pueden ser limitados con la adición de amortiguamiento al sistema de aislamiento sísmico. Los aisladores más comúnmente utilizados (elastoméricos, friccionales, combinados, etc.) son capaces de proveer valores de amortiguamiento limitados (del orden del 10%) y los mismos no son viscosos. Para valores más importantes de amortiguamiento, las ecuaciones no pueden desacoplarse por lo que deberían utilizarse un análisis más complejo, algunos de ellos desarrollados por otros autores (Kelly, 1993, 1996).

Los trabajos realizados sobre el acoplamiento de las ecuaciones de movimiento realizados por Naeim F., et al. (1999) pueden resumirse en la gráfica de la Figura A1.2, donde se representa la variación de la aceleración de piso en función del factor de amortiguamiento (β_d). Se determina el valor de la aceleración máxima ($|\ddot{u}_s|_{\max}$), como suma de dos términos, $|\ddot{u}_s^{(1)}|_{\max}$, $|\ddot{u}_s^{(3)}|_{\max}$ y su valor máximo se obtiene para un amortiguamiento del 26%, mientras que el mínimo se obtiene para un 12%. Por lo tanto, si uno aumenta el amortiguamiento se logra reducir el desplazamiento del sistema de aislamiento a expensas de mayores valores de aceleración y distorsiones de piso.

Para valores crecientes de amortiguamiento, la aceleración absoluta de la estructura primero decrece tendiendo a un mínimo valor y luego crece en la medida que aumenta el valor del amortiguamiento. Se observa que existe un rango de valores de amortiguamiento (valores óptimos) del sistema de aislamiento sísmico para los cuales las aceleraciones en la estructura son menores. En consecuencia, los desplazamientos se reducen en la medida que aumenta el amortiguamiento, si dicho valor aumenta más allá del valor óptimo, el desplazamiento no se reduce ya demasiado y se observan mayores valores de aceleraciones en la estructura (Naeim et al., 1999).

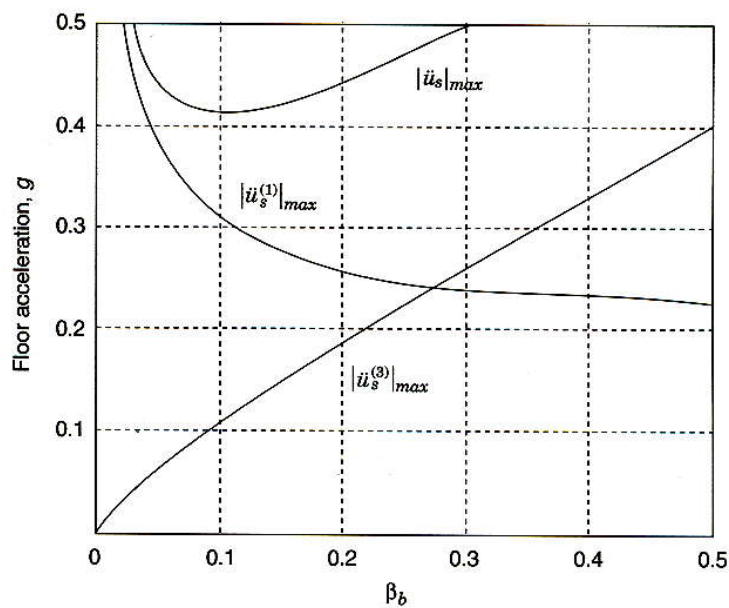


Figura A1.2. Influencia del factor de amortiguamiento en los valores de aceleraciones de piso.

El concepto de amortiguamiento ha sido ampliamente discutido por muchos autores sobre todo cuando comenzaron a estudiarse y caracterizarse los registros de terremotos con presencia de pulsos largos de velocidad y desplazamiento, generalmente de falla cercana. El tema del amortiguamiento tomó aún más relevancia cuando se determinó las diferencias en las respuestas de estructuras sujetas a terremotos del tipo vibratorio respecto de aquellos del tipo impulsivos.

Autores como Gavin H., afirmaban que la protección sísmica de estructuras aisladas sujetas a fuertes terremotos, incluso con presencia de pulsos largos de aceleración, velocidad y desplazamientos no era una tarea simple (Gavin et al., 2002). Otros trabajos de investigación (Heaton, 1995) mostraron que los edificios con aislamiento de base sujetos a terremotos de falla cercana ($M_w = 7.0$), podrían producir, en el sistema de aislamiento, valores altos de distorsiones (los cuales excedían los 50 cm.) incluso para valores altos de amortiguamiento (25% del amortiguamiento crítico) y también, valores altos de desplazamientos en la interfase del dispositivo de aislamiento. Por lo tanto, niveles altos de amortiguamiento reducen los desplazamientos del aislador en el modo fundamental, pero conllevan incrementos de aceleración en la superestructura. Por otro lado, la contribución de los modos superiores puede incrementar los desplazamientos entre pisos.

Otras investigaciones (Lee et al., 2004) indican la importancia de la adición de amortiguamiento en las estructuras de puentes para controlar los desplazamientos que imponen los movimientos asociados a falla cercana y la ubicación más conveniente de los mismos.

Otros trabajos (Tornello et al., 2008), evaluaron las respuestas de estructuras aisladas con dispositivos de resortes y amortiguadores viscosos del tipo Gerb Control System (GCS). Para ello se varió el amortiguamiento del conjunto aislado $C_1 = 2\xi_1 (m_b + m)\omega_1$ dentro de un rango admisible, es decir que se varió el área bajo el lazo fuerza – desplazamiento y por lo tanto la cantidad de energía disipada por los dispositivos de aislamiento. La variación de los valores numéricos de la ecuación anterior implica también una variación de la razón de amortiguamiento dada por la ecuación (A1.24) para el modelo de dos grados de libertad (Figura 2.5).

$$\xi_1 = \frac{W_D \omega_1}{4\pi E_s} = \beta_{eff} \omega_I \approx \xi_1 \quad A1.24$$

Los trabajos de Tornello et al., desarrollados en el 2008 encontraron la variación de la aceleración en el edificio aislado y la del desplazamiento de los dispositivos de aislamiento para una serie de dieciocho terremotos con características impulsivas, es decir pulsos largos de aceleración, velocidad y desplazamiento. En Figura A1.3 se presenta la variación de la aceleración en la superestructura en función del amortiguamiento, mientras que en la Figura A1.4 se muestra la variación de los desplazamientos a nivel del sistema de aislamiento en función del amortiguamiento para algunos de los terremotos considerados en el trabajo.

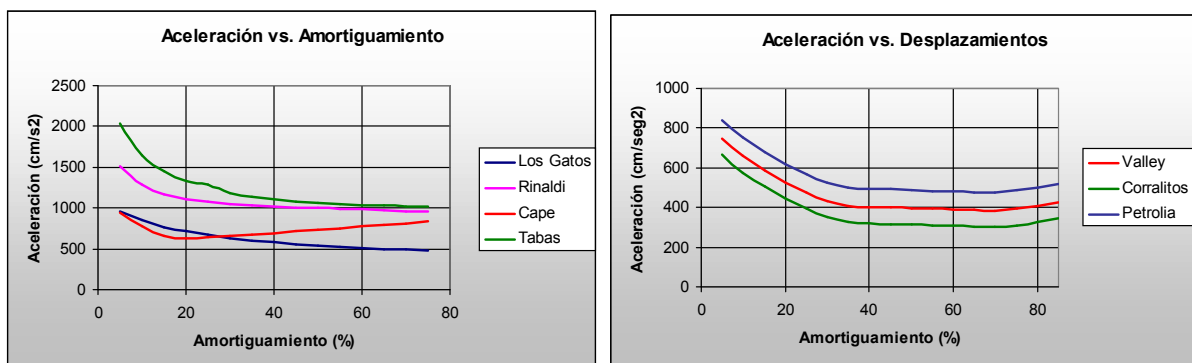


Figura A1.3. Variación de la aceleración en la superestructura en función del amortiguamiento.

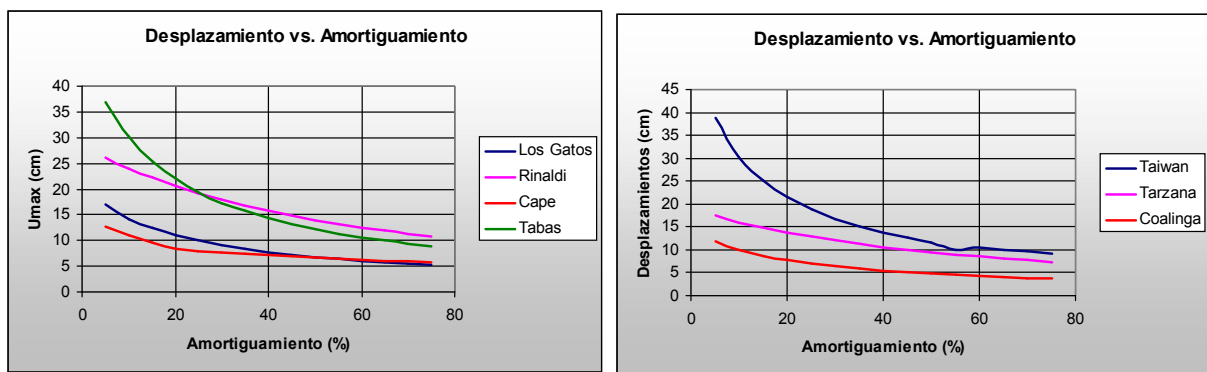


Figura A1.4. Variación del desplazamiento a nivel del sistema de aislamiento sísmico en función del amortiguamiento.

El trabajo de investigación concluye que relaciones entre aceleraciones y amortiguamiento (Figura A1.3) indican, para algunos terremotos analizados, que en la medida que aumenta el amortiguamiento, la aceleración en la superestructura, primero decrece, luego pasa por un valor mínimo y por último vuelve a crecer. En otros casos las aceleraciones muestran una tendencia a disminuir manteniéndose prácticamente constante a partir de un cierto valor de amortiguamiento respecto del crítico.

Por otro lado, las relaciones entre desplazamientos, a nivel de los dispositivos de aislamiento y su amortiguamiento, (Figura A1.4) indican que los desplazamientos decrecen en la medida que aumenta el amortiguamiento. Por lo tanto, el valor del amortiguamiento a suministrarle a los dispositivos de protección se encuentra controlado por el valor de la aceleración que llega a la superestructura y no por el desplazamiento de los dispositivos de aislamiento porque, la aceleración presenta una tendencia a aumentar a partir de un valor comprendido entre el 20 y 25% del amortiguamiento crítico.

El mismo trabajo de investigación (Tornello et al., 2008) indicaron que existen algunas diferencias en el concepto de amortiguamiento lineal equivalente para los movimientos del suelo con presencia de pulsos importantes de velocidad y desplazamientos. Para exponer algunos de dichos resultados, se estudió la respuesta de un edificio aislado, de tres niveles con aislamiento sísmico conformado por resortes de acero y amortiguadores viscosos. Se admitieron sólo dos valores de amortiguamiento y dos acelerogramas correspondientes a los terremotos de Coalinga y Kobe. En la Figura A1.5 se representa la historia de desplazamientos y la relación corte en la base (por encima del sistema de aislamiento) versus desplazamiento al mismo nivel para un amortiguamiento del 15% para los dos terremotos

citados. En la Figura A1.6 se representan los mismos parámetros, pero para un amortiguamiento del 30%.

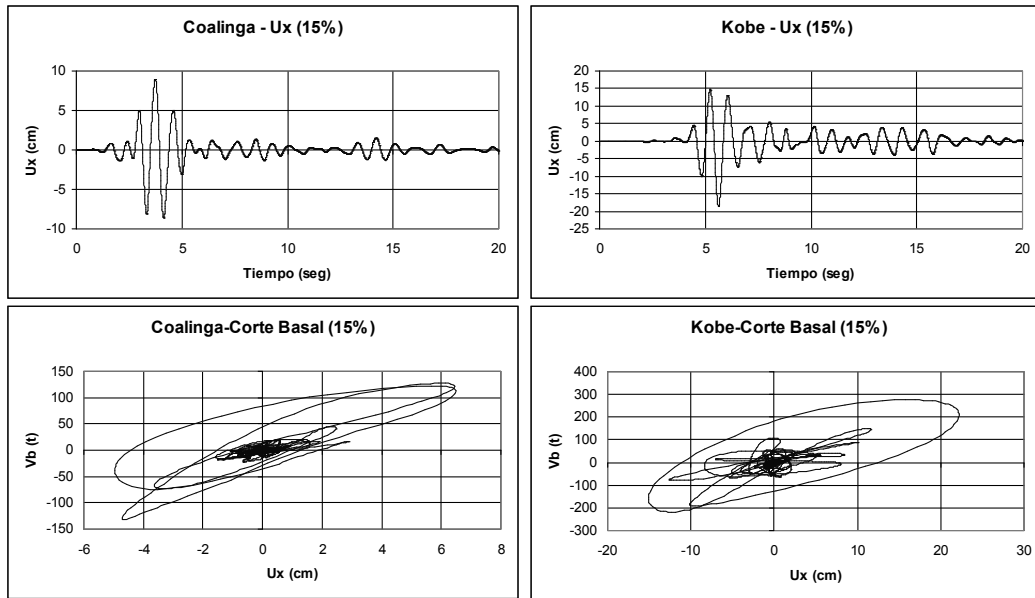


Figura A1.5. Historia de desplazamientos en la base del edificio con aislamiento y relaciones: corte en la base versus desplazamientos en la base para un amortiguamiento del 15% (Terremotos de Coalinga y Kobe).

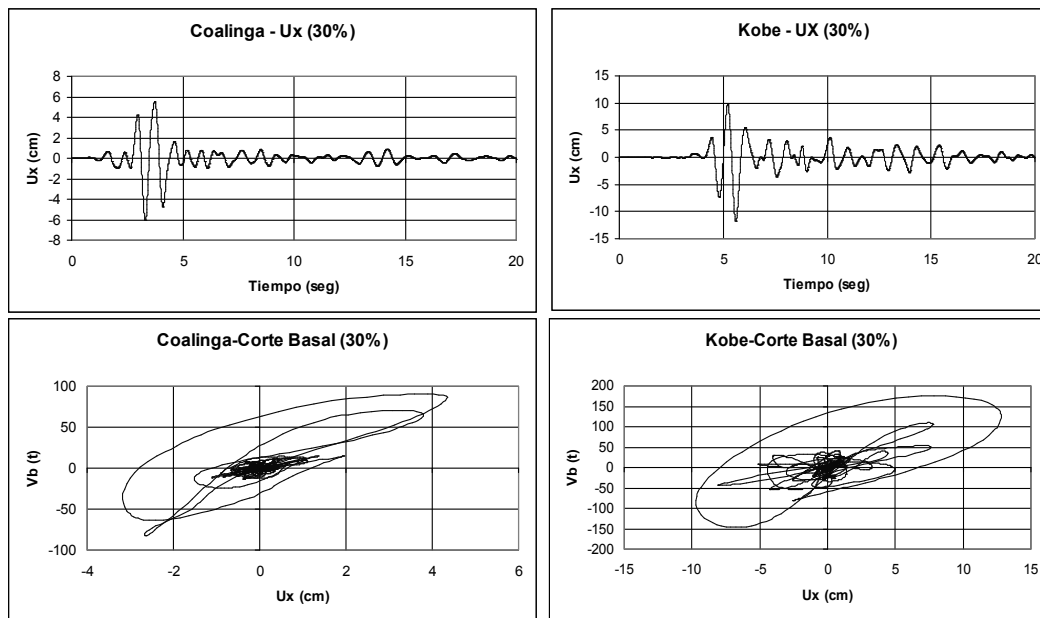


Figura A1.6: Historia de desplazamientos en la base del edificio con aislamiento y relaciones: corte en la base versus desplazamientos en la base para un amortiguamiento del 30% (Terremotos de Coalinga y Kobe).

En la Tabla A1.1 se sintetizan los valores de desplazamiento en la base del edificio aislado y los cortes asociados a dicho desplazamientos en el mismo nivel para los dos terremotos estudiados.

Tabla A1.1. Respuestas en términos de desplazamientos y cortes en la base del edificio con aislamiento sísmico para los terremotos de Coalinga y Kobe.

Terremoto	Respuesta	Amortiguamiento	
		$\xi_I = 15\%$	$\xi_I = 30\%$
Coalinga	ub (mm)	90	60
	Vb (KN)	1.200	980
Kobe	ub (mm)	180	120
	Vb (KN)	3.000	1.800

Los resultados indican que en la medida que aumenta el amortiguamiento se observan reducciones en los desplazamientos de aproximadamente un 30% y de un 20% y 40%, según el terremoto considerado, para los valores de corte en la base. El hecho de que el corte en la base se reduzca, para mayores valores de amortiguamiento, se debe a un aumento de las fuerzas de amortiguamiento lo que conduce a menores desplazamientos y menores fuerzas elásticas. Con relación al coeficiente de amortiguamiento efectivo se puede mencionar que ante la presencia de un pulso en la excitación del suelo, de duración menor a la del periodo natural de la estructura, evidencia vibraciones comprendidas dentro del periodo natural de la misma. Los gráficos de desplazamientos indicados en Figura A1.5 y A1.6 muestran ciclos dentro del rango de periodos de 1 segundo, valor de periodo del edificio aislado que fue estudiado.

$$\xi = \xi_1 = \frac{\omega_1}{\Omega} \beta_{eff} \quad A1.25$$

En el trabajo se asumió que, $\Omega = \omega_1$, y que de acuerdo a la ecuación (A1.25) el coeficiente de amortiguamiento efectivo debería ser $\beta_{eff} = \xi_I = 15\%$ y $\beta_{eff} = \xi_I = 30\%$ respectivamente para los dos casos.

ANEXO II: RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO

A2.1. Obtenidos a partir de ensayos experimentales

Aislador ASNC-1-15mm

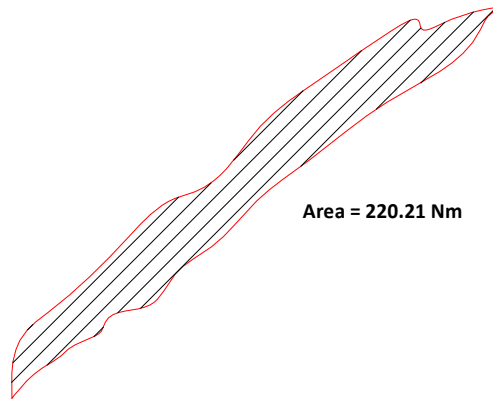


Figura A2.1. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-1-15mm.

Rigidez efectiva:
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 87,64 \text{ N/mm}$$

$F^+ = 3.709 \text{ N}$

$\Delta^+ = 60 \text{ mm}$

$F^- = -6.808 \text{ N}$

$\Delta^- = -60 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 220.210 \text{ Nmm}$

Energía elástica: $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 157.760 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{220.210 \text{ Nmm}}{4 \pi 157.760 \text{ Nmm}} = 0,111 = 11,1\%$

Aislador ASNC-1-30mm

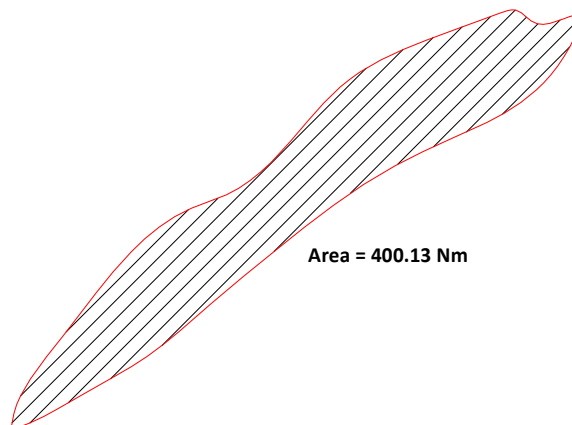


Figura A2.2. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-1-30mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 77,06 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.000 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$$

$$F^- = -6.865 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -71 \text{ mm}$$

$$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 400.130 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 188.790 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{400.130 \text{ Nmm}}{4 \pi 188.790 \text{ Nmm}} = 0,169 = 16,9\%$$

Aislador ASNC-2-15mm

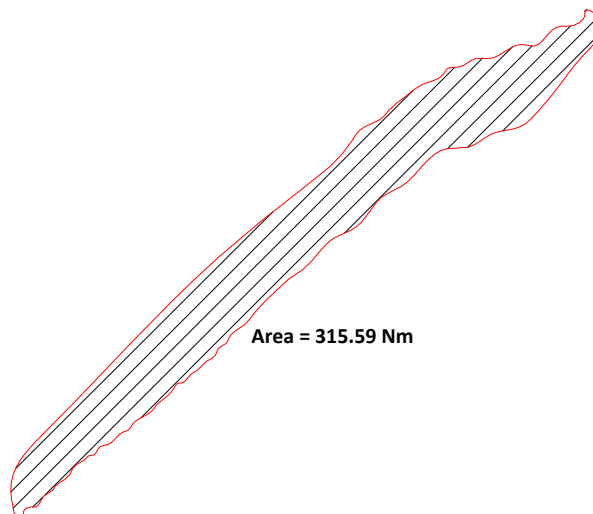


Figura A2.3. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ASNC-2-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 90,19 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 5.481 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 71 \text{ mm}$$

$$F^- = -7.236 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -70 \text{ mm}$$

$$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 315.590 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 227.330 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{315.590 \text{ Nmm}}{4 \pi 227.330 \text{ Nmm}} = 0,110 = 11,0\%$$

Aislador ASNC-2-30mm

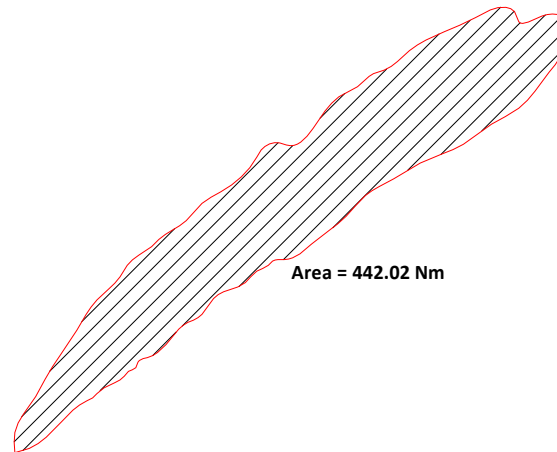


Figura A2.4. Área del ciclo histérico obtenida a partir del ensayo ASNC-2-30mm.

Rigidez efectiva:
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 88,39 \text{ N/mm}$$

$F^+ = 4.759 \text{ N}$

$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$

$F^- = -7.616 \text{ N}$

$\Delta^- = -70 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histérico} = 442.020 \text{ Nmm}$

Energía elástica $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 216.560 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo:
$$\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{442.020 \text{ Nmm}}{4 \pi 216.560 \text{ Nmm}} = 0,162 = 16,2\%$$

Aislador ANAG-1-15mm

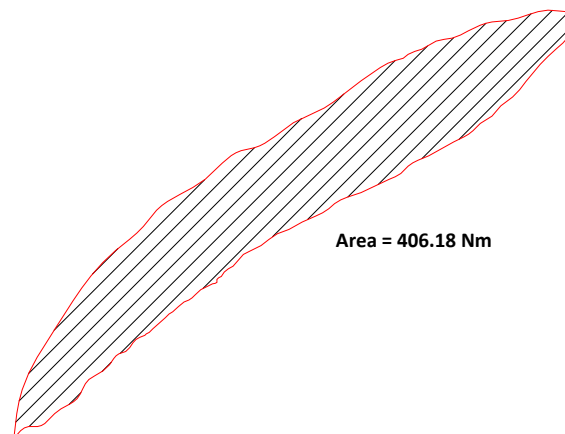


Figura A2.5. Área del ciclo histérico obtenida a partir del ensayo ANAG-1-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 85,01 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.554 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$$

$$F^- = -7.348 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -70 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 406.180 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 208.290 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{406.180 \text{ Nmm}}{4 \pi 208.290 \text{ Nmm}} = 0,155 = 15,5\%$$

Aislador ANAG-1-3mm

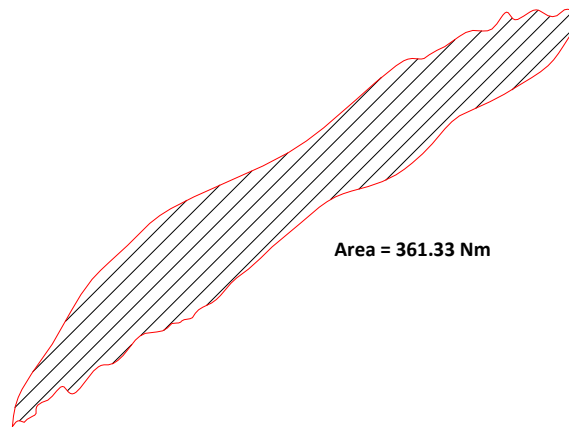


Figura A2.6. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAG-1-3mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 82,07 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.736 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 71 \text{ mm}$$

$$F^- = -6.836 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -70 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 361.330 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 206.860 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{361.330 \text{ Nmm}}{4 \pi 206.860 \text{ Nmm}} = 0,139 = 13,9\%$$

Aislador ANAG-2-15mm

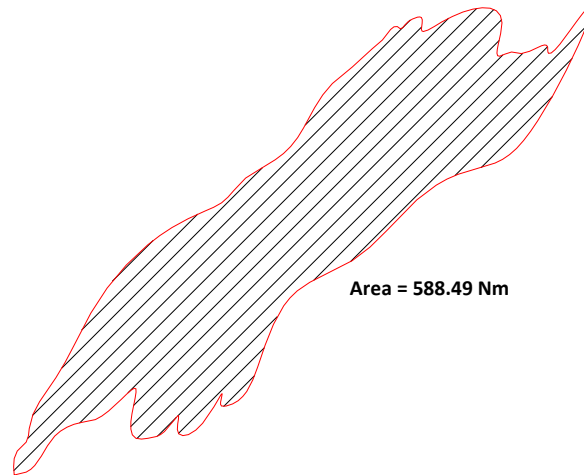


Figura A2.7. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAG-2-15mm.

Rigidez efectiva:
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 89,28 \text{ N/mm}$$

$F^+ = 5.923 \text{ N}$

$\Delta^+ = 71 \text{ mm}$

$F^- = -6.665 \text{ N}$

$\Delta^- = -70 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 588.490 \text{ Nmm}$

Energía elástica $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 225.020 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo:
$$\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{588.490 \text{ Nmm}}{4 \pi 225.020 \text{ Nmm}} = 0,208 = 20,8\%$$

Aislador ANTC-1-15mm

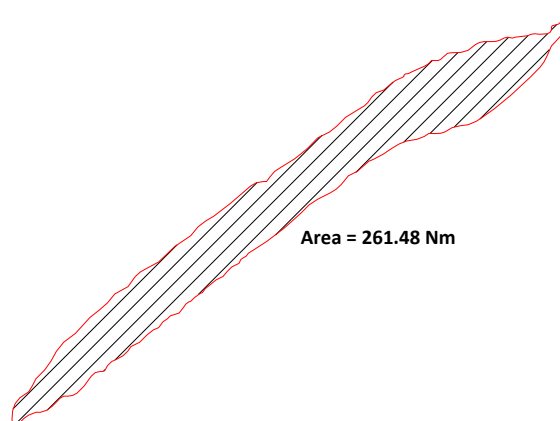


Figura A2.8. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANTC-1-15mm.

Rigidez efectiva: $K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 84,07 \text{ N/mm}$

$F^+ = 4.926 \text{ N}$

$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$

$F^- = -6.928 \text{ N}$

$\Delta^- = -70 \text{ mm}$

$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 261.480 \text{ Nmm}$

Energía elástica $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 205.970 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{261.480 \text{ Nmm}}{4 \pi 205.970 \text{ Nmm}} = 0,101 = 10,1\%$

Aislador ANTC-1-30mm

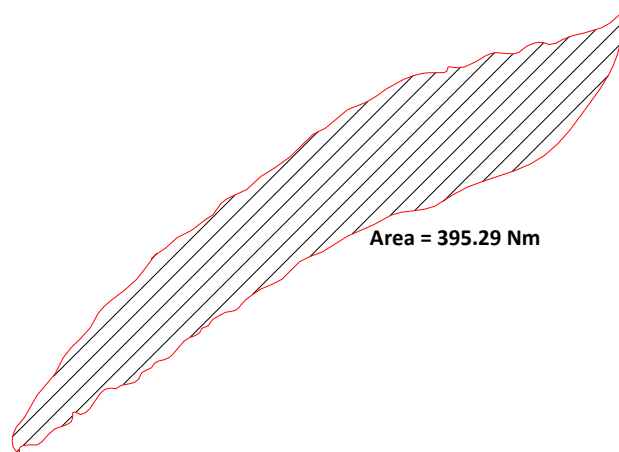


Figura A2.9. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANTC-1-30mm.

Rigidez efectiva: $K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 79,70 \text{ N/mm}$

$F^+ = 4.365 \text{ N}$

$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$

$F^- = -6.793 \text{ N}$

$\Delta^- = -70 \text{ mm}$

$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 395.290 \text{ Nmm}$

Energía elástica $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 195.270 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{395.290 \text{ Nmm}}{4 \pi 195.270 \text{ Nmm}} = 0,161 = 16,1\%$

Aislador ANTC-2-15mm

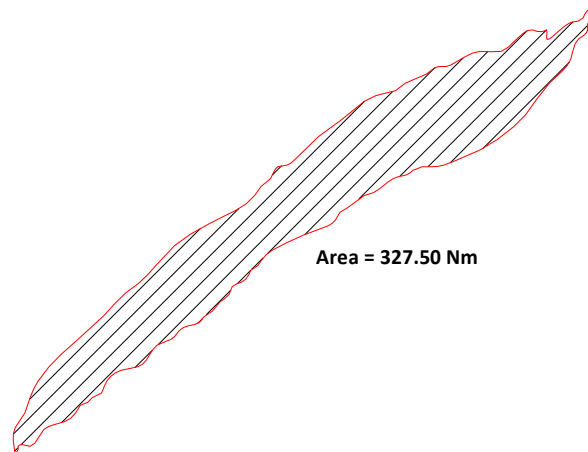


Figura A2.10. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANTC-2-15mm.

Rigidez efectiva: $K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 84,87 \text{ N/mm}$

$F^+ = 4.863 \text{ N}$

$\Delta^+ = 71 \text{ mm}$

$F^- = -7.104 \text{ N}$

$\Delta^- = -70 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 327.500 \text{ Nmm}$

Energía elástica $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 213.920 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{327.500 \text{ Nmm}}{4 \pi 213.920 \text{ Nmm}} = 0,122 = 12,2\%$

Aislador ANAF-1-15mm

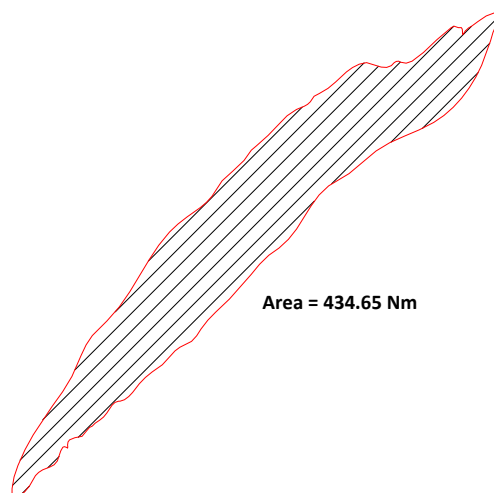


Figura A2.11. Área del ciclo histerético obtenida a partir del ensayo ANAF-2-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 111,65 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 5.901 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$$

$$F^- = -9.730 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -70 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 434.650 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 273.540 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{434.650 \text{ Nmm}}{4 \pi 273.540 \text{ Nmm}} = 0,126 = 12,6\%$$

A1.2. Obtenidos a partir del modelo numérico de Bouc - Wen

Aislador ASNC-1-15mm

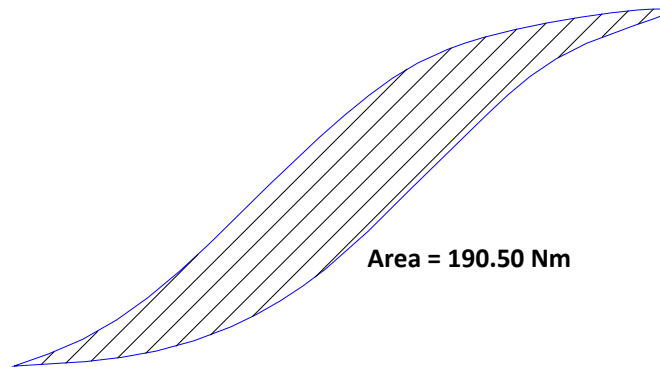


Figura A2.12. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-1-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 59,42 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 3.714 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 66 \text{ mm}$$

$$F^- = -3.714 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -59 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 190.500 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 129.430 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{190.500 \text{ Nmm}}{4 \pi 129.430 \text{ Nmm}} = 0,117 = 11,7\%$$

Aislador ASNC-1-30mm

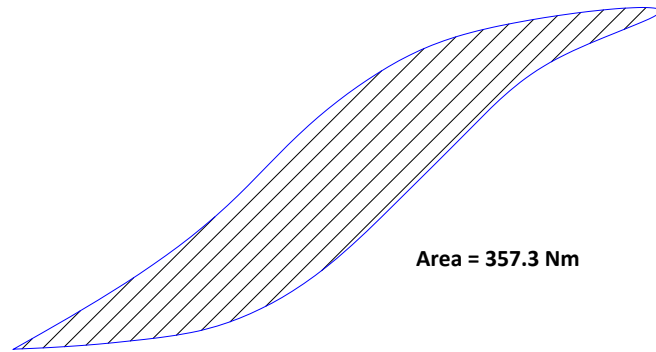


Figura A2.13. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-1-30mm.

Rigidez efectiva:
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 58,50 \text{ N/mm}$$

$F^+ = 4.183 \text{ N}$

$\Delta^+ = 76 \text{ mm}$

$F^- = -4.183 \text{ N}$

$\Delta^- = -67 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 357.300 \text{ Nmm}$

Energía elástica: $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 168.960 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo:
$$\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{357.300 \text{ Nmm}}{4 \pi 168.960 \text{ Nmm}} = 0,168 = 16,80\%$$

Aislador ASNC-2-15mm

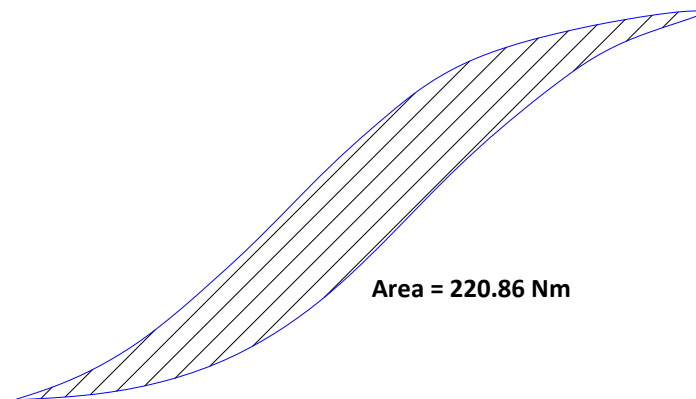


Figura A2.14. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-2-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 62,69 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.219 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 70 \text{ mm}$$

$$F^- = -4.181 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -64 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 220.860 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 153.580 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{220.860 \text{ Nmm}}{4 \pi 153.580 \text{ Nmm}} = 0,114 = 11,40\%$$

Aislador ASNC-2-30mm

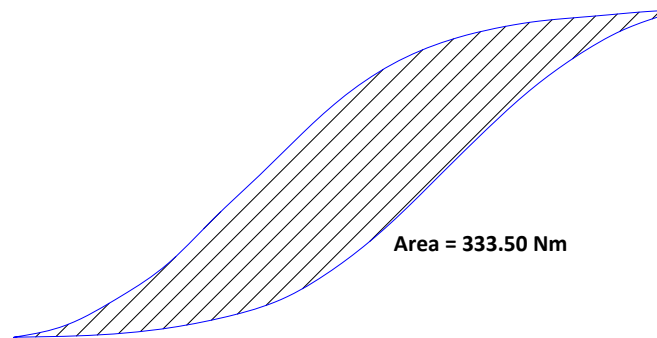


Figura A2.15. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ASNC-2-30mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 55163 \text{ N/m}$$

$$F^+ = 4.050 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 76 \text{ mm}$$

$$F^- = -4.059 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -71 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 333.500 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 159.310 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{333.500 \text{ Nmm}}{4 \pi 159.310 \text{ Nmm}} = 0,167 = 16,70\%$$

Aislador ANAG-1-15mm

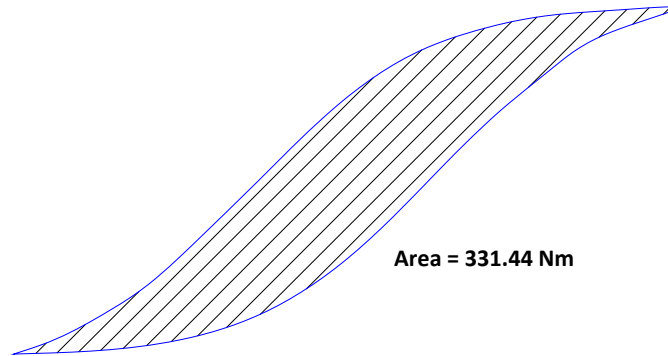


Figura A2.16. Área del ciclo histérico obtenida del modelo de Wen ANAG-1-15mm.

Rigidez efectiva: $K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 58,52 \text{ N/mm}$

$F^+ = 4.186 \text{ N}$

$\Delta^+ = 76 \text{ mm}$

$F^- = -4.183 \text{ N}$

$\Delta^- = -67 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histérico} = 331.400 \text{ Nmm}$

Energía elástica: $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 169.020 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{331.400 \text{ Nmm}}{4 \pi 169.020 \text{ Nmm}} = 0,156 = 15,60\%$

Aislador ANAG-1-3mm

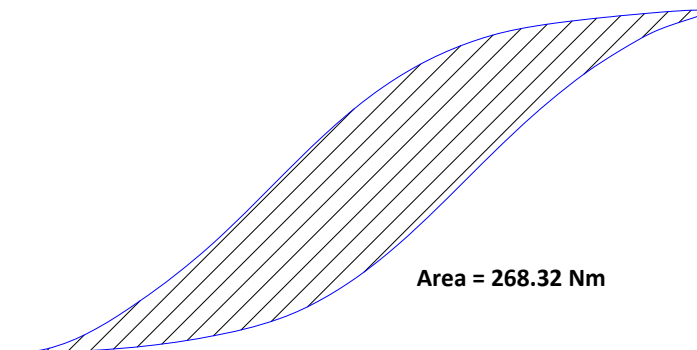


Figura A2.17. Área del ciclo histérico obtenida del modelo de Wen ANAG-1-3mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 54,99 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 3.899 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 73 \text{ mm}$$

$$F^- = -3.910 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -69 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 268.320 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 146.530 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{268.320 \text{ Nmm}}{4 \pi 146.530 \text{ Nmm}} = 0,146 = 14,60\%$$

Aislador ANAG-2-15mm

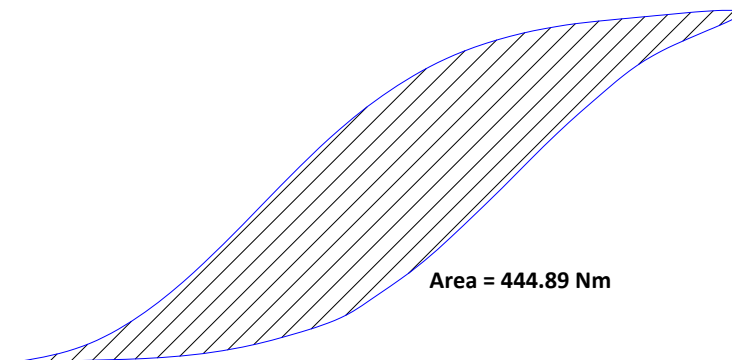


Figura A2.18. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANAG-2-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 53,39 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.158 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 79 \text{ mm}$$

$$F^- = -4.171 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -77 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 444.890 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 166.610 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{444.890 \text{ Nmm}}{4 \pi 166.610 \text{ Nmm}} = 0,212 = 21,20\%$$

Aislador ANTC-1-15mm

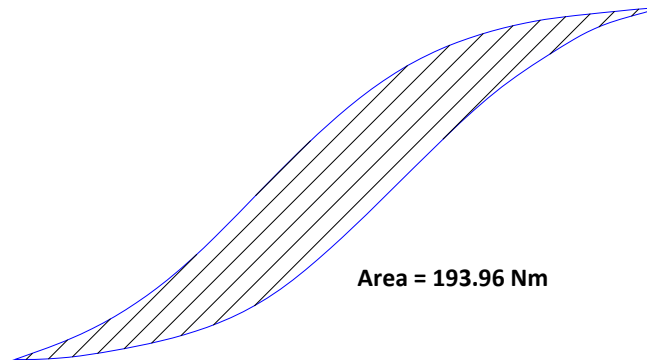


Figura A2.19. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANTC-1-15mm.

Rigidez efectiva: $K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 60,76 \text{ N/mm}$

$F^+ = 4.001 \text{ N}$

$\Delta^+ = 69 \text{ mm}$

$F^- = -3.958 \text{ N}$

$\Delta^- = -62 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histerético} = 193.960 \text{ Nmm}$

Energía elástica: $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 144.630 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo: $\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{193.960 \text{ Nmm}}{4 \pi 144.630 \text{ Nmm}} = 0,107 = 10,70\%$

Aislador ANTC-1-30mm

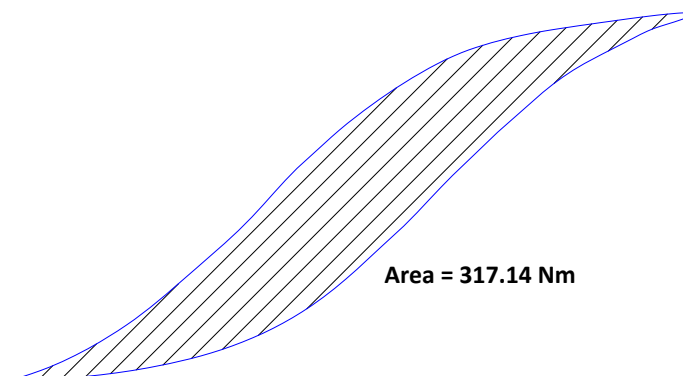


Figura A2.20. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANTC-1-30mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 59,79 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.119 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 73 \text{ mm}$$

$$F^- = -4.072 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -64 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 317.140 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 159.310 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{317.140 \text{ Nmm}}{4 \pi 159.310 \text{ Nmm}} = 0,158 = 15,8\%$$

Aislador ANTC-2-15mm

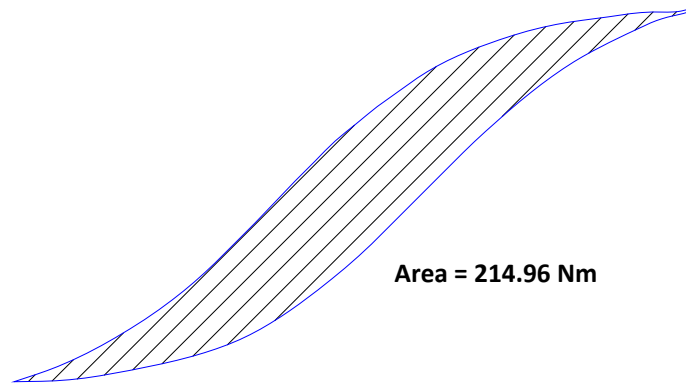


Figura A2.21. Área del ciclo histerético obtenida del modelo de Wen ANTC-2-15mm.

$$\text{Rigidez efectiva: } K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 60,74 \text{ N/mm}$$

$$F^+ = 4.001 \text{ N}$$

$$\Delta^+ = 69 \text{ mm}$$

$$F^- = -3.956 \text{ N}$$

$$\Delta^- = -62 \text{ mm}$$

$$W_o = \text{Área ciclo histerético} = 214.960 \text{ Nmm}$$

$$\text{Energía elástica: } w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 144.590 \text{ Nmm}$$

$$\text{Amortiguamiento efectivo: } \xi_{eff} = \frac{w_o}{4 \pi w_e} = \frac{214.960 \text{ Nmm}}{4 \pi 144.590 \text{ Nmm}} = 0,118 = 11,8\%$$

Aislador ANAF-1-15mm

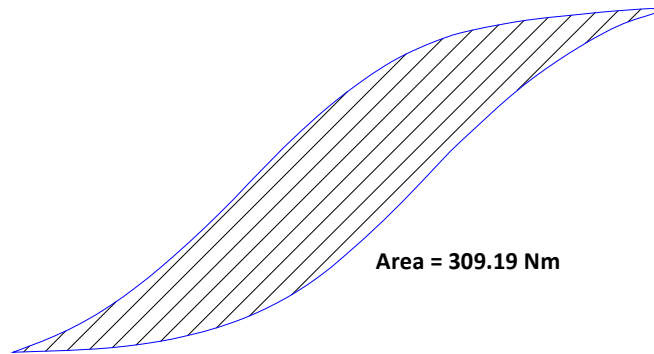


Figura A2.22. Área del ciclo histérico obtenida del modelo de Wen ANAF-1-15mm.

Rigidez efectiva:
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 59,10 \text{ N/mm}$$

$F^+ = 4.633 \text{ N}$

$\Delta^+ = 83 \text{ mm}$

$F^- = -4.586 \text{ N}$

$\Delta^- = -73 \text{ mm}$

$W_0 = \text{Área ciclo histérico} = 309.190 \text{ Nmm}$

Energía elástica: $w_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 203.560 \text{ Nmm}$

Amortiguamiento efectivo:
$$\xi_{eff} = \frac{w_0}{4 \pi w_e} = \frac{309.190 \text{ Nmm}}{4 \pi 203.560 \text{ Nmm}} = 0,121 = 12,1\%$$

ANEXO III: RUTINA DE TRABAJO PARA LA CALIBRACIÓN LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE NUMÉRICO DE WEN

A3.1. Rutina de trabajo en Matlab correspondiente al prototipo ASNC-1-15mm

A continuación, se observa la rutina de trabajo del código comercial MatLab, utilizada en la calibración de los parámetros del modelo numérico de Wen para el prototipo ASNC-1-15mm. Los datos incorporados a la misma se obtienen de los ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas realizado a los prototipos de aisladores sísmicos (MatLab, 2010).

% Constitutiva de Wen ASNC-1-15mm

load caucete.dat;

ac=caucete;

T=0.02;%T=input('Paso de muestreo(seg)T:');

*Y=(7*ac)';%*

n=length(Y);

%Ingreso de datos

al=0.5%input('alfa: ');

m=5000%input('masa: ');

k=600000%input('Rigiez: ');

c=0.111%input('Amortig: ');

fy=2600%input('Fuerza fluencia: ');

xy=0.034%input('Def. fluencia: ');

*fly=fy-(al*k*xy);*

*Ac=[0 1; -al*k/m -c/m];*

Bc=[0; -1];

Bfc=[0; -1/m];

*Ad=expm(Ac*T);*

*Bd=Ac\((Ad-eye(2))*Bc;*

```

Bfd=Ac\ (Ad-eye(2)) *Bfc;

A=I;

be=0.12;

ga=0.88;

up(1)=0;

fnl(1)=0;

zw(1)=0;

x(:,1)=zeros(2,1);

load fuerza.txt;

load displ.txt;

%1ª Iteración.

for i=1:n-1

x(:,i+1)=Ad*x(:,i)+Bd*Y(i)+Bfd*fnl(i);

up(i+1)=(x(2,i)+x(2,i+1))/(2*xy);

[t z]=ode15s('wen',[0 T],zw(i),[],up(i+1),A,be,ga);

[nn,m]=size(z);

zw(i+1)=z(nn);

fnl(i+1)=fly*(1-al)*zw(i+1);

dmax=max(abs(x(1,:)));

vmax=max(abs(x(2,:)));

fprintf('Desplaz máx: %f m \n', dmax)

fprintf('Veloc máx: %f m/s \n', vmax)

t=[0:1:n-1]*T;

figure(1)

set(gcf,'defaultLineLineWidth',1)

subplot(2,1,1)

```

```
plot(t,x(1,:)); Title('Desplazamientos'),...  
subplot(2,1,2)  
plot(t,x(2,:)); Title('Velocidades'),...  
figure(2)  
set(gcf,'defaultLineLineWidth',1)  
plot(-x(1,:),fnl,despl,fuerza,'r'); Title('ciclo histerético'),...
```


REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2010). Guide Specifications for seismic isolation design.

Abaqus 6.4-1. (2003). Theory Manual. Hibbit, Karlson and Sorenson, Inc.: Pawtucket, U.S.A.

Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., (2008.) Aisladores de base Elastoméricos y FPS, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito, Ecuador.

Araya Aclé L. M., Moroni O. M., Sarrazin A. M., Jorquera P. (1994). Desarrollo y fabricación de aisladores sísmicos para edificio habitacional. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil. Santiago Chile.

ASTM D2240 - 05 (2010). Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness

ASTM D412 – 06a (2013). Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension.

ASTM D395 - 14 (2014). Standard Test Methods for Rubber Property—Compression Set

Auqui M. V., Aguiar R., Gómez P. (2010). Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador. Proyecto previo a la obtención de título de ingeniero civil.

Balachandran, B.; Magrab , B. E., (2005). Vibraciones. Editorial Thompson. Capitulo 5. pp. 226. México. Septiembre de 2005.

Barbat, A. H. and Canet, J. M. (1994). Estructuras sometidas a acciones sísmicas. Barcelona, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, 2º edición.

Barbat , A. H., Bozzo, L. M., (1997). Seismic analysis of base isolated buildings. Archives of Computational Methods in Engineering, 4 (2), pp. 153-192.

Barbat, A. H., Molinares, N., Codina, R., (1996). Effectiveness of block iterative schemes in computing the seismic response of buildings with non linear base isolation. Computer and Structures, 58 (1), pp. 133-141.

Bellomo F., Nallim G., Oller S. (2008). Modelo para el análisis del comportamiento mecánico de materiales compuestos de matriz elastomérica reforzada. Mecánica Computacional, Vol

XXVII, págs. 593-613 Alberto Cardona, Mario Storti, Carlos Zuppa. (Eds.) San Luis, Argentina.

Bertero V. et al (1976). Establishment of design Earthquakes: evaluation of present methods. Proceeding, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, Vol. 1, St. Louis, Univ. of Missouri-Rolla, 551-580.

Besa, J., de la Llera J. C., Jünemann R. (2010). Experimental behavior and design of a new kinematic isolator. Engineering Structures , Vol.32, 508-522.

Bozzo, L. M., Barbat A. H., (2000). Diseño Sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas. Editorial Reverté. Barcelona. España. Capítulo 8. pp. 275.

Bozzo, L. (1996). Análisis de edificios con sistemas de aislamiento de base. En: Barbat, A.; L. Aguiar, eds. Ingeniería de estructuras. Escuela superior politécnica del ejército. Quito, Ecuador. 1(1): 17-38

Bozzo, L., M., Barbat, A. H. (1995). Non-linear response of structures with sliding base isolation. Journal of Structural Control, 2 (2), 59-77.

Bozzo, L. M., Foti, D., Lopez-Almanza, F. (1990). Design of friction base isolation system. 4th US National Conference on Earthquake Engineering. Palm Springs. California.

Cascante, A. R.; Rodellar, J.; López Almanza, F. (1993). Control Predictivo en Sistemas de Protección Sísmica de Estructuras. Monografías de Ingeniería Sísmica. Editor A. H. Barbat. España, Cimne Is-2 .

Código de Construcciones Sismorresistentes de la Provincia de Mendoza (CCSR), (1987). Decreto Acuerdo N° 4235/87 del Gobierno de la Provincia de Mendoza. Ordenanza N° 2965 y 13283/89 del Concejo Deliberante de la Ciudad de Mendoza. Exp. N° 310-D-89 y 12334-O-89.

Clark P., Aiken I., Nakashima M., Milyasaki M., Midorlkawa M., (1999). New Design Technologies. The 1995 Kobe Earthquake as a trigger for Implementing New Seismic Design Technologies in Japan. Lesson Learned over time, Learning from Earthquakes. Volume III. Earthquake Engineering Research Institute.

CSI, 2000. Computer and Structures, Inc., (2003). SAP 2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Version 9, Berkeley, California.

Constantinou M. C.; Tadjbakhsh, I. G., (1984) The optimum design of a base isolation system with frictional elements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 203-214.

Constantinou M. C., Mokha, A. S., Reinhorn, A. M., (1990). Teflon bearing in base isolation II: Modelling. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 116 (2), 455-474.

Constantinou M.C., Tsopelas, P., Kasalanati, A., Wolf, E., (1999). Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearing. Technical Report MCE ER-99-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.

Corporación de Desarrollo Tecnológico, (2011). Protección Sísmica de Estructuras. Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. Documento Técnico N° 29. www.cdt.cl

Crisfield M.A. (1996). *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*. John Wiley & Sons, Volume II: Advanced Topics.

De La Llera J. C., Inaudi J. A., Lüderss C. (1998). Análisis y diseño de sistemas de aislación sísmica y disipación de energía. SIRVE.

EM-DAT. (2011). The OFDA/CRED International Disaster Database - www.emdat.be. Bruselas: Université Catholique de Louvain.

Enea Aismej, Enez, Elis, Crea. (1991). Earthquake protection of building. Universidad degli studi di Ancona. Istituto di scienza e tecnica delle costruzioni.

Erman B., Mark J. E., Ronald C. M. (2013). *The Science and Technology of Rubber*, Fourth Edition. Editorial Elsevier.

Escandar, A., Moroni, M., Sarrazin, M., (2005). Propiedades Mecánicas de Goma de Alto Amortiguamiento en Función de la Temperatura. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería antisísmica IX Jornadas, Concepción, Chile.

Fan, F. G., Ahmadi, G., Mostaghel, N., & Tadjbakhsh, I. G. (1991). Performance analysis of a seismic base isolation systems for a multi-story building. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , Vol.10 (No.3), 152-171.

FEMA 450, (2003). The 2003 NEHRP Recommended Provisions For New Building And Other Structures. Part 1: Provisions (FEMA 450). Federal Emergency Management Agency. Building Seismic Safety Council, Washington, D.C. [on line] [Available in <http://www.bssconline.org/NEHRP2003/provisions/>].

Fenz D. M. and Constantinou M. C. (2008). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 37:163–183

Freakley P. K. and Payne A. R. (1978) *Theory and Practice of Engineering with Rubber*. Applied Science Publishers. Editorial Elsevier.

Freakley P. K. (2011) *Rubber Processing and Production Organization*. Editorial Springer.

Forni, M., Martelli, A., (1994). Proposal for Design Guidelines for Seismically Isolated Nuclear Plants. Final Report. Contract ETNU-0031-IT (CCSH) between the European Energy Community and ENEA. November 1994.

Garevski, M. A., Kelly, J. M., & Zisi, N. V. (2000). Analysis of 3-D vibrations of the base isolated school building Pestalozzi by analytical and experimental approach. 12 WCEE World Conference Earthquake Engineering (págs. 1683-1691). Auckland: WCEE.

Gavin H., Alhan C., (2002). Inter-story Drift Amplification and Damping in Passive Isolation Systems. 00212 Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE). Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Boston Massachusetts.

Gent A. N., Meinecke E. A. (1970). Compression, Bending and Shear of Bonded Rubber Blocks. Institute of Polymer Science. University of Akron. Ohio. *Polymers Engineering and Science*, January, 1970. Vol. 10. Nº 1.

Gioacchini G., Medina M., Montenegro O., Tornello M. (2003). Respuesta sísmica de un edificio con aislación sísmica en la base. XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica y 6 – EIPAC. Mendoza. Argentina.

Gioacchini G., Tornello M., Frau C. (2015). Cuantificación de los parámetros elásticos y mecánicos de un nuevo dispositivo de aislamiento sísmico. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Vol. 20,2, 199 - 212. Editores: Alex H. Barbat, Roberto Aguiar. ISSN 1390-1117.

Heaton T. H., Hall J. F., Wald D. J., Halling M. W., (1995) . Response of high-rise and base-isolated building in a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake. *Science* 1995; 267:206 a 211.

IRAM 113003 (1989). Elastómeros y plastómeros. Método de determinación de la dureza Shore A y Shore D.

INPRES CIRSOC 103 (2013) Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Instituto Nacional de Prevención Sísmico (INPRES). Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales de seguridad de Obras Civiles (CIRSOC).

Jangid R. S., Kelly J. M., (2001). Base Isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 30:691-707. 16

Kelly, J. M., (1982). A seismic Base Isolation. *Shock Vib. Dig.*, Vol. 14. N° 5, pp. 17-25.

Kelly J. M. (1986). Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , Vol. 5, 202-216.

Kelly, J. M., (1991). Base Isolation: Linear theory and design. *Earthquake Spectra*, 7 (2), 301-323.

Kelly, J. M., Quiroz, E. (1992) Mechanical Characteristics of Neoprene Isolation Bearings. *Earthquake Engineering Research Center, University of California*.

Kelly, J. M. (1993, 1996 2nd ed). *Earthquake-Resistant Design With Rubber*. Springer – Verlag. London.

Kelly J. M. (1998). *Earthquake resistant design with rubber*. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y naturales. Departamento de ingeniería civil. División ingeniería estructural

Kelly J. M., Inaudi J., De La Llera J. C. (1998). *Análisis, diseño y aplicaciones de sistemas de aislación sísmica y disipación de energía*. Facultad de Ingeniería. U.N.C.

Kelly, T. E., Robinson, W. H., & Skinner, R. I. (2008). *Seismic isolation for designers and structural engineers*. Kanpur: National Information Centre of Earthquake Engineering.

Kelly J. M. and Marsico M. R. (2010). *Stability and post-buckling behavior in nonbolted elastomeric isolators*. Mathematical sciences publishers. Vol 1- n°1.

Kelly J. M. (2012). Calabrese A. y Serino G., *Design criteria for Fiber Reinforced Rubber Bearings*. 15WCEE, Lisboa.

Lee, T. Y.; Kawashima K. (2004). Effectiveness of Supplementary Dampers for Isolated Bridges under strong near-field ground motions. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. B. C., Canadá. August 1-6, 2004. Paper N° 138.

Malhotra, P. (1999). Response of building to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, N° 28, 1309-1326.

Martelli A., (2005). Modern seismic protection systems for civil and industrial structures. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas. 16-19 Noviembre de 2005.

MatLab version 7.10.0. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.

Mazza F., Vulcano, A., (2004). Base Isolation Techniques for the seismic protection of RC Framed Structures subjected to near-fault ground motions. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. B. C., Canadá. August 1-6, 2004. Paper N° 2935.

Manual de Diseño de Obras Civiles (MOC), (2008) México. Diseño por Sismo.

Mokha, A. S., Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M., (1988). Teflon Bearing in A seismic Base Isolation: Experimental Studies and Mathematical Modeling. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER-88-0038. State University of New York at Buffalo.

Mokha, A. S., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., (1990). Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of Sliding Isolation System with a Spherical Surface. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER-90-0020. State University of New York at Buffalo.

Moroni, M. O., Sarrazin, M., Boroscheck, R., Zamorano, R., Vargas J., Garrido, J., (1995). Seismic Base Isolation research in Chile: Recent results. International Post-Smirt Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures. Santiago, Chile. August 16 to 21, 1995. pp. 119-135.

NCh2745. Of 2003 (2003). Análisis y Diseño de Edificios con Aislamiento sísmico. Requisitos.

Naeim F., Kelly J. M. (1999). Design of seismic isolated structures. Editorial J. Wiley and Sons. INE.

Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. M., Constantinou, M. C. (1991). 3d-Basis – Non-linear Dynamics Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures: Part II. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER-91-0005. State University of New York at Buffalo.

Nawrotzki, P. (2000). Some Strategies for the reduction of seismic structural responses. The First International Conference on Structural Stability and Dynamics. December 7-9, 2000. Taipei. Taiwan.

Nawrotzki, P. (2001). Seismic Protection of structures by viscoelastic elements. The Eighth Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 5-7 December 2001. Nanyang Technological University. Singapore.

Nawrotzki P., (2005). Visco-elastic device for the seismic control of machinery, equipment and buildings. 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structure. Kobe. Japan. Session 13. Paper N° 34. pp. 587-594.

Núñez C. A. y Celentano D. J. (2005) Caracterización experimental y numérica de compuestos elastoméricos utilizados en disipadores de energía. Mecánica Computacional Vol. XXIV A. Larreteguy (Editor) Buenos Aires, Argentina.

Ogden R. (1984). Non-linear elastic deformations, Dover Publications, New York.

Ordoñez, D. (1996). Estudio comparativo de la respuesta estructural inelástica de edificios sismorresistente con aislamiento de base. Tesis Mag. Ing. Sísmico y Dinámica Estructural. Universidad Politécnica de Cataluña. 58p.

Quintana, P. (2011). Uso de aisladores sísmicos en edificios en Chile: un caso de estudio. Director: Mohammed Ismail y José Rodellar. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.

Revista BIT, Especial terremoto Chile 2010. (2010). Aislación y disipación de energía. mayo2010. (Disponible online www.fiic.la/lxv_consejo_directivo_panama/delallera_2.pdf).

Saragoni G. R. (2004). Características destructivas de los acelerogramas de fuente cercana y los grandes terremotos argentinos. XVIII Jornadas de Ingeniería Estructural. Conferencia N° 4. Buenos Aires. Argentina.

Sarrazin M., Izzo F., Vergara R., Sosagui R. (1995). Applications of seismic isolations to the Santiago Metro. International post – smirt conference seminary seismic isolation, passive energy dissipation and control of vibrations of structures.

Sarrazin, M., Osorio, F., Herbach, E., Moroni, O. F., Figueroa, A., (1989). Diseño Sísmico de Edificios de Viviendas con aislamiento de base. Actas de las 5tas Jornadas Chilenas de

sismología e Ingeniería Antisísmica. 7 al 11 de Agosto 1989. Santiago de Chile. Vol. 2. pp. 1107-1117.

Sasani, M. And Bertero, V. (2000). Importance of severe pulse-type ground motions in performance-based engineering: historical and critical review. 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, paper 1302.

Shedlock, K. M. (2001). Global seismic hazards. En R. A. Meyers, Encyclopedia of Physical Science and Technology (págs. 825-832). California: Elsevier

Simo, J. C. (1993). Topics on the Numerical Analysis and Simulation of Plasticity. Handbook of Numerical Analysis, Elsevier Science Publishers, Vol. III.

Stewart, Jonathan P. Et Al. (2001). Ground Motion Evaluation Procedures for Performance - Based Design [on line]. PEER Report 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center. College of Engineering, University of California, Berkeley, September 2001. [Available in <http://nisee.berkeley.edu/library/PEER-200109/contents.pdf>].

Stagno, P., Frerk, J., Stagno, D., Rendic, P., Iturriaga, W., De La Llera, J. C., Lüder, C., Sady, H., Guendelman, T., Guendelman, M., Lindenberg, J., Astudillo, M., Boroschek, R., (2001). Análisis y Diseño del Hospital Militar. VIII Jornadas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras civiles y Achisina, Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Valparaíso, 22 al 27 de Abril del 2002. Chile. CD. Sesión: Control Activo y Pasivo de la Respuesta sísmica.

Stuardi, J. (2003). Dispositivos viscoelásticos para protección sísmica de edificios: Residencia Estudiantil en Mendoza. XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica y 6° Encuentro de Investigadores y Profesionales argentinos de la construcción, arquitectura y diseño sismorresistente. CD. Facultad de Ingeniería UNC y Asociación Argentina de Ingeniería Sísmica. Mendoza. Argentina, 2003.

Stuardi, J., Massa, J., Brewer A. (2005) Eficiencia de Sistemas de Aislamiento Sísmico basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos comparada con aisladores tradicionales goma – metal. VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional. CD. 16-18 noviembre 2005. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Centro de Estudios Avanzados Universidad Argentina de la Empresa.

Thompson, A., Whittaker, A., Fenves, G., Mahin, S. (2000). Property Modification Factors for Elastomeric Seismic Isolation Bearings. 12 th World Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, Auckland, N° 1307.

Tornello, M., Sarrazin, A. M., (2003). Desarrollo e implementación de un sistema de aislación sísmica para un edificio civil. XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. 25-29 Agosto de 2003. Mendoza. Argentina. CD. Paper 28. pp. 18.

Tornello, M., Sarrazin, A. M., (2004). Desarrollo e implementación de un sistema de aislación sísmica de base para el edificio de la residencia universitaria de la Facultad Regional Mendoza de la UTN. Revista Internacional de Estructuras. Editores: Barbat A., Aguiar R., Revista semestral de la Escuela Politécnica del Ejercito. Ecuador. Vol. 9, N° 1, 2004. pp. 71-91. SIN 1390-0315. © 2004 ESPE, Quito. Ecuador.

Tornello M., Sarrazin A. M., (2005). Respuesta estructural de dos sistemas de aislamiento sísmico frente a terremotos de fuente cercana. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas. 16-19 Noviembre de 2005. Paper N° A13-04. CD. SIN 07118-2678.

Tornello M. (2007). Aislamiento sísmico de base en construcciones civiles, emplazadas en zonas de alto riesgo sísmico. Director: Dr. Sarrazin A. M. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza.

Tornello M.E.; Frau C.D; Palazzo G. (2008). Behaviours of energy dissipation devices and seismic isolation in presence of near-fault ground motions. Proceedings 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China. Octubre 2008.

Tsopelas, P., Constantinou, M. C., (1994). NCEER-Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of a System Consisting of Sliding Bearing and Fluid Restoring Force/Camping Devices. National Center for Earthquake Engineering Research. NCEER-94-0014. State University of New York at Buffalo.

Trifunac, M. D; Brady, A. G. A. (1975). Study of the duration of strong earthquake ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 65, 581-626.

Revista BIT, Especial terremoto Chile 2010. Aislación y disipación de energía. Mayo 2010. (Disponible online [www.fiic.la/lxv consejo directivo panama/delallera 2.pdf](http://www.fiic.la/lxv_consejo_directivo_panama/delallera_2.pdf)), 2010.

Uang, C. M., Bertero, V. (1990). Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 77-90.

Uniform Building Code UBC (1997). International Conference of Building Officials, Whittier, CA.

Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L. Ed. Prentice, 6ª edición Hall. (1998). *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*.

Weinberg K. (2010). Lecture Notes for Zur Methode der finiten Elemente in der Mechanik II: Nichtlineare Probleme, TU Berlin [in English]. <http://mechanik.tu-berlin.de/weinberg/Lehre/fem2/Chapter4.pdf>.

Wen, Y. (1976). Method for random vibration of hysteretic system. *Journal of the engineering mechanics division*. Abril . 102 (EM2):249-26

Wilson E. L. 3ª Edición (2002). *Three – dimensional static and dynamic analysis structures*. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA

Wood L. A., Martin G. M. (1964) “Compressibility of natural rubber at pressures below 500 kg/cm²”. National Bureau of Standards. Washington DC. *Rubber Chemistry and Technology*. 1964. 37. 850-856.

Xu Z., Agrawal A.K., He W. L. Tan P., 2007. Performance of passive energy dissipation systems during near-field ground motion type pulses. *Engineering Structures* 29 (2007) 224-236. (Disponible online at www.sciencedirect.com.)