



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN ESTANQUE DE ACERO INOXIDABLE DE PARED DELGADA (EAIPD) CON APOYOS.

ANDRÉS ARTURO GONZÁLEZ CORNEJO

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JOSÉ LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY

Santiago de Chile, Septiembre, 2009

© 2009, Andrés González



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN ESTANQUE DE ACERO INOXIDABLE DE PARED DELGADA (EAIPD) CON APOYOS.

ANDRÉS ARTURO GONZÁLEZ CORNEJO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JOSÉ LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY

HERNAN SANTA MARIA OYANEDEL

RODRIGO FLORES COOMBS

IGNACIO LIRA CANGUILHEM

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Septiembre, 2009

A mis grandiosos padres, los que muchas veces pospusieron sus sueños, para que sus hijos los lográramos por ellos.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a todos mis profesores, desde la infancia hasta ahora, por la formación recibida, los ejemplos de vida y el afán por el conocimiento, sin la docencia el conocimiento no penetra ni deja huella.

Agradezco en forma especial a mi profesor guía, José Luis Almazán, por ser una muestra del verdadero espíritu docente, por su paciencia, dedicación y preocupación hacia mi persona. También le agradezco por las horas de discusión compartidas tanto de temas académicos así como “simplemente” sobre la vida.

Agradezco también a los miembros de la comisión de defensa de tesis, por su disposición a ayudarme y por sus valiosos comentarios y ayudas en esta investigación.

No puedo dejar de nombrar también a mis amigos, los que siempre estuvieron a mi lado, escuchándome y acompañándome cuando más lo necesitaba.

Finalmente, el mayor de mis agradecimientos a mi familia, mis padres, hermanos, cuñados y sobrinos, sin ellos, sin su cariño y sus ejemplos, sería débil como una casa fundada en arena, sin bases sólidas para enfrentar las adversidades que nos depara la vida.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
1 Introducción	14
1.1 Antecedentes Generales	14
1.1.1 Motivación, comportamiento de los estanques.....	15
1.1.2 Aislación y disipación de energía en estanques, situación actual. .	17
1.2 Objetivos del Estudio	21
2 Validación analítica, numérica y experimental del comportamiento del fluido	23
2.1 Descripción del modelo empleado	23
2.2 Modelo de Elementos Finitos.....	26
2.3 Identificación del sistema.....	28
2.3.1 Resultados Ruido Blanco:.....	29
2.3.2 Resultados señales armónicas:.....	35
2.3.3 Excitaciones impulsivas y sísmicas	37
3 Aislador Vertical Friccional.....	49
3.1 Descripción de la solución implementada.....	49
3.2 Modelo Teórico.	56
3.3 Resultados Experimentales.	59
3.4 Cálculo de Parámetros equivalentes del Dispositivo	73
3.5 Mejoras posibles al dispositivo	76
4 Estudio numérico del Comportamiento del sistema aislado mediante elementos finitos	78

4.1	Modelo real y simplificaciones consideradas.....	78
4.2	Modelo de Elementos Finitos.....	80
4.3	Análisis Modal	83
4.4	Análisis de Superposición Modal Espectral.....	90
5	Estudio Experimental del Comportamiento del sistema aislado	99
5.1	Ensayos en Mesa 3D	99
5.1.1	Montaje e Instrumentación Ensayos en Mesa 3D.....	100
5.1.2	Resultados Ensayos en Mesa 3D	103
5.2	Ensayos en Mesa 1D	123
5.2.1	Montaje e Instrumentación Ensayos en Mesa 1D.....	123
5.2.2	Resultados Ensayos en Mesa 1D	127
6	Conclusiones.....	147
6.1	Conclusiones Generales	147
6.2	Sistema de Disipación / Aislación Propuesto.....	148
6.3	Sistemas de Ensayos Dinámicos	149
6.4	Comentarios para Futura Investigación.....	149
6.4.1	Mejoras al Modelo Numérico	150
6.4.2	Mejoras al Sistema de Aislación.....	150
	BIBLIOGRAFIA.....	152

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.2-1: Propiedades del Modelo de Elementos Finitos.....	27
Tabla 2.3-1: Modos de vibración	34
Tabla 2.3.3-1: Datos Señales Medidas en los Ensayos	40
Tabla 3.3-1: Resumen Rigideces Dispositivo 1 y 2	70
Tabla 4.3-1: Propiedades Dinámicas de los modelos.....	86
Tabla 4.4-1: Reacciones y Desplazamientos Análisis Superposición Modal Espectral	92
Tabla 5.1.2.3-1: Ensayos sísmicos 3D realizados	112
Tabla 5.2.2.1-1: Ensayos sísmicos 1D	128

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1.1: Tipos de falla por pandeo en el manto.....	17
Figura 1.1.2-1: Sistemas de disipación de energía en fluidos contenidos (Maleki y Ziyaeifar, 2007).....	18
Figura 1.1.2-2: Sistema de aislación basado en aisladores elastoméricos y fondo flexible. (Malhotra, 1997).....	20
Figura 1.1.2-3: Sistema de disipación fundamentado en un elemento que fluye a torsión. (Malhotra, 1998).....	21
Figura 2.1-1: Montaje del ensayo.....	24
Figura 2.1-2: Instrumentos de Medición.	25
Figura 2.1-3: Montaje del Ensayo	25
Figura 2.2-: Modelo de Elementos Finitos Contenedor Pequeño	27
Figura 2.3.1-1: Señales en el tiempo Ruido Blanco 01, RMS 0.10g.	30
Figura 2.3.1-2: Espectros de potencia Ruido Blanco 01, RMS 0.10g.....	31
Figura 2.3.1-3: Señales en el tiempo Ruido Blanco 02, RMS 0.10g.	32
Figura 2.3.1-4: Espectros de potencia Ruido Blanco 02, RMS 0.10g.....	33
Figura 2.3.2-1: Modos Experimentales.	35
Figura 2.3.2-2: Modos modelo Elementos Finitos.....	36
Figura 2.3.2-3: Modos modelo Elementos Finitos, detalle superficie Libre	36
Figura 2.3.3-1: Contenido de frecuencia de las señales de aceleración basal, Escala Lineal.	38

Figura 2.3.3-2: Contenido de Frecuencia de las Señales de Aceleración Basal, Escala semi-logarítmica.....	39
Figura 2.3.3-3: Comparación en el Tiempo de Respuesta en Presiones, Señal P1	41
Figura 2.3.3-4: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, señal P2.....	42
Figura 2.3.3-5: Comparación en el Tiempo de Respuesta en Presiones, señal P3.....	43
Figura 2.3.3-6: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, señal P4.....	44
Figura 2.3.3-7: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, señal P5.....	45
Figura 2.3.3-8: Comparación en el Tiempo de Respuesta en Presiones, Señal Sísmica de Northridge	46
Figura 2.3.3-9: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, detalle zona movimiento fuerte, señal sísmica de Northridge.....	47
Figura 3.1-1: Vista General del aislador	51
Figura 3.1-2: Vista general del dispositivo	52
Figura 3.1-3: Detalle Sistema de Disipación.....	53
Figura 3.1-4: Fuerzas en Dispositivo de Roce	54
Figura 3.1-6: Aisladores Montados en Estanque	56
Figura 3.2-1: Esquema de las constitutivas Teóricas del Dispositivo.....	57
Figura 3.3-1: Prototipo Aislador Vertical Friccional	60
Figura 3.3-2: Ensayo Dinámico del Aislador Vertical Friccional.....	61
Figura 3.3-3: Ensayo Dinámico del prototipo.	62
Figura 3.3-4: Constitutiva Experimental Dispositivo 1.	64
Figura 3.3-5: Constitutivas Experimentales Dispositivo 1, amplitud 1cm	65
Figura 3.3-6: Constitutivas Experimentales Dispositivo 1, amplitud 2cm	66

Figura 3.3-7: Constitutiva Experimental Dispositivo 2	67
Figura 3.3-8: Constitutivas Experimentales Dispositivo 2, amplitud 1cm	68
Figura 3.3-9: Constitutivas Experimentales Dispositivo 2, amplitud 2cm	69
Figura 3.3-10: Constitutiva Experimental Resorte Principal.	71
Figura 4.1-1: Estanque empleado en Análisis y Ensayos.....	79
Figura 4.2-1: Modelo de Elementos Finitos, Vista Lateral y Panorámica	81
Figura 4.2-2: Detalle Estructura soportante y de refuerzo de fondo	82
Figura 4.3-1: Comparación de Masa modal acumulada normalizada (Cumulative Modal Mass Ratio, CMMR) en dirección X (superior) y Z (inferior), caso base fija y aislada.	84
Figura 4.3-2: Formas modales Modelo Base Fija	88
Figura 4.3-3: Formas modales Modelo Base Aislada	89
Figura 4.4-1: Espectros de Aceleraciones NCh2745	91
Figura 4.4-2: Deformaciones Verticales Base Fija y Aislada	93
Figura 4.4-3: Deformación de Corte en Shells.....	94
Figura 4.4-4: Deformaciones Equivalentes (Von Misses) Modelo Estanque Base Fija	96
Figura 4.4-5: Deformaciones equivalentes (Von Misses) Modelo Estanque Base Aislada	97
Figura 4.4-6: Deformaciones Equivalentes (Von Misses) Fondo Estanque, Caso Base Fija y Aislada.....	98
Figura 5.1-1: Montaje Ensayo Estanque Base Aislada mesa MOOG.....	100
Figura 5.1-3 : Sistemas de Adquisición de Datos (SAD).....	102
Figura 5.1-2: Sistemas de Adquisición de Datos (SAD).....	103
Figura 5.1.2.1-1: Ensayos Verticales Sinusoidales	105
Figura 5.1.2.1-2: Bloqueo Aislador en Tracción por Resonancia.....	106

Figura 5.1.2.2-1: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.4g.....	107
Figura 5.1.2.2-2: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.4g Racionalizados por Input	108
Figura 5.1.2.2-3: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.3g.....	109
Figura 5.1.2.2-4: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.3g, Racionalizados por Input	110
Figura 5.1.2.3-1: Espectros de Potencia Señales Sísmicas Ensayos 3D.	114
Figura 5.1.2.3-2: Espectros de Potencia Señales Sísmicas Ensayos 3D, Detalle Zona Frecuencias Altas.	115
Figura 5.1.2.3-3: Aceleraciones en Mesa MOOG señal Melipilla IS	117
Figura 5.1.2.3-4: Aceleraciones en Estanque señal Melipilla IS	118
Figura 5.1.2.3-5: Aceleraciones en Estanque señal Melipilla IS, Detalle Zona Movimiento Fuerte.....	119
Figura 5.1.2.3-6: Deformaciones en Aisladores y Presiones Fluido señal Melipilla IS ...	120
Figura 5.1.2.3-7: Deformaciones Equivalentes o de Von Misses (ϵ_{eq}) en Estanque señal Melipilla IS.....	121
Figura 5.1.2.3-8: Deformaciones Unitarias Verticales (ϵ_z) en Estanque señal Melipilla IS	122
Figura 5.2.1-1: Montaje Ensayo Caso Base Fija Mesa 1D.	124
Figura 5.2.1-2: Detalle Instrumentación Roseta en Pata.....	126
Figura 5.2.1-2: Detalle Sensores Presión	127
Figura 5.2.2.1.1-1: Espectro de Potencia Ensayos con registro El Centro.....	129
Figura 5.2.2.1.1-1: Espectro de Potencia Ensayos con Registro Melipilla.	131
Figura 5.2.2.1.1-3: Espectro de Potencia Ensayos con Registro El Centro (Detalle).	132

Figura 5.2.2.1.1-4: Espectro de Potencia Ensayos con registro Melipilla (Detalle).	133
Figura 5.2.2.1.1-5: Espectros de respuesta de las señales empleadas, $\xi=2\%$	134
Figura 5.2.2.1.2-1: Excitación y Respuesta en Aceleraciones registro El Centro.....	135
Figura 5.2.2.1.2-2: Respuesta en Presiones Registro El Centro.....	136
Figura 5.2.2.1.2-3: Deformaciones Unitarias en Roseta Pata +X, Registro El Centro.	137
Figura 5.2.2.1.2-4: Deformaciones Unitarias en manto, 10 cm sobre fondo +X, registro El Centro.....	138
Figura 5.2.2.1.2-5: Deformaciones Unitarias en Manto, 60 cm sobre Fondo +X, Registro El Centro.	139
Figura 5.2.2.1.2-6: Excitación y Respuesta en Aceleraciones Registro Melipilla.	141
Figura 5.2.2.1.2-7: Respuesta en Presiones Registro Melipilla.	142
Figura 5.2.2.1.2-8: Deformaciones Unitarias en Roseta Pata +X, registro Melipilla.	143
Figura 5.2.2.1.2-9: Deformaciones Unitarias en manto, 10 cm sobre fondo +X, registro Melipilla.	144
Figura 5.2.2.1.2-10: Deformaciones Unitarias en manto, 60 cm sobre fondo +X, registro Melipilla.	145

RESUMEN

Impulsado por la pujante industria vitivinícola en Chile, a inicios del año 2003 comienza un ambicioso proyecto innovativo para crear un sistema de aislación sísmica y disipación para Estanques de Acero Inoxidable de Pared Delgada con Apoyos (EAIPD). Este documento presenta la primera investigación teórico experimental donde se idea e implementa la solución de mayor eficiencia para estos estanques, la aislación vertical rotacional en un estanque de dimensiones reducidas. Este estudio comienza con una comparación de la solución teórica para contenedores cilíndricos de paredes rígidas con la solución numérica mediante un programa de elementos finitos comercial y con mediciones experimentales, mostrando un adecuado nivel de consistencia entre las 3 opciones. Posterior a esto, se ideó e implementó un dispositivo de aislación y disipación vertical con disipación de energía por roce, basándose en los parámetros de estudios anteriores, produciendo un dispositivo de bajo costo y comportamiento histerético de acuerdo a lo esperado, con el objetivo de implementarlo en el estanque disponible para este estudio. Para estimar la modificación en la respuesta del sistema se realizó un modelo de elementos finitos sobre el que se realizaron análisis modal y de superposición modal espectral con los parámetros equivalentes lineales de los dispositivos fabricados, obteniéndose reducciones en torno al 40% para el corte basal y las deformaciones equivalentes y de 60% para el momento volcante. Finalmente, para comprobar el comportamiento del sistema con aislación y sin ella se realizaron análisis en mesa vibradora 3D que demostraron el buen comportamiento del sistema cualitativamente y en mesa vibradora 1D para dos registros sísmicos, obteniendo factores de reducción para las aceleraciones y presiones de hasta 50% y 85 % respectivamente y para las deformaciones equivalentes de hasta 20%.

Palabras Claves: Aislación Sísmica, Estanques, Acero Inoxidable, Aislación vertical rotacional, Sloshing, ANSYS, FLUID80, análisis experimental, ensayos mesa vibradora, Disipación.

ABSTRACT

Driven by the burgeoning wine industry in Chile, in early 2003 began an ambitious innovative project to create a seismic isolation system and dissipation for stainless steel thin-walled legged tanks (EAIPD). This document presents the first theoretical and experimental research where creates and implements the most efficient theoretical solution to legged tanks, the rocking isolation system. This it's done in a legged supported tank of reduced dimensions. This study begins with a comparison of the theoretical solution for hard-walled cylindrical container with the numerical solution using a commercial finite element program and experimental measurements, showing an adequate level of consistency between the 3 options. Following this, was created and implemented a device for vertical isolation and dissipation of energy by friction, based on the parameters of previous studies, producing a low cost device and hysteretic behaviour according to expectations, with the aim of implementing in the tank in study. To estimate the change in the system response was performed a finite element model were conducted modal analysis and spectral modal overlap with the equivalent linear parameters of the isolation devices manufactured, estimating reduction factors around 40% for the basal cut and equivalent deformations (Von Misses) and 60% for the overturning moment. Finally, to verify the behaviour of the isolated system an Base Fixed (non isolated), analysis were made in 3D shaking table that showed the good performance of the system qualitatively and 1D vibrating table for two seismic records, obtaining reduction factors for the accelerations and pressures up to 50 % and 85% respectively and the reductions for equivalent strain up to 20%.

Keywords: Seismic Isolation, Thin-Walled Steel Tanks, Legged Stainless Steel Tanks, Rocking Isolation, Sloshing, ANSYS, FLUID80, Experimental Analysis, Shaking Table Tests, Dissipation.

1 INTRODUCCIÓN

La utilización de la aislación sísmica como técnica de diseño sismorresistente es algo de probada eficiencia, lo que ha sido mostrado tanto en forma teórica y experimental como en la práctica durante sismos reales. Sin embargo, es una tecnología reciente si tomamos como parámetro de comparación el diseño tradicional. Es por lo anterior que hay áreas donde la aislación se ha desarrollado menos que en otras, siendo una de éstas la de estructuras del tipo de los estanques de acero inoxidable de pared delgada con apoyos, de ahora en adelante EAIPD. Estas estructuras se caracterizan por ser estructuras esbeltas, de bajo amortiguamiento y por contener grandes masas de fluido, lo que se traduce en grandes solicitaciones durante un sismo severo y una ínfima capacidad de disipación de energía.

Debido a lo anterior, unido con el masivo uso de los EAIPD en la industria del Vino en Chile y sus países vecinos, en el año 2004 se inicia un ambicioso proyecto de investigación referente al uso de aislación sísmica en estanques de acero inoxidable para la guarda y fermentación del vino, del cual esta investigación comprende el primer estudio con una fuerte componente experimental.

1.1 Antecedentes Generales

Diversas publicaciones y estudios sobre el comportamiento de estanques de acero inoxidable de pared delgada, han mostrado desempeños insatisfactorios frente a las demandas impuestas por un sismo (Haroun, 1983; Liu y Schubert, 2002; Haroun, 1995). Fallas como el pandeo local del manto sobre los apoyos, o en las patas mismas han dejado estanques inutilizables después de sismos severos, además de causar en algunos

la pérdida de su contenido. En contraparte, hacer estanques más seguros de la manera actual (sin aislación ni disipación), tiene un alto costo debido principalmente al alto precio del acero inoxidable.

El uso del aislamiento basal para reducir los efectos del sismo en estanques no ha sido desarrollado para sistemas como los estanques con patas hasta el momento, lo que unido a la eficiencia demostrada en un reciente estudio analítico (Cerdeira, 2006) y el creciente uso de estas tecnologías en Chile y el mundo en estructuras tradicionales como edificios y puentes, indican que es el camino a seguir para este tipo de estructuras. Como fue mencionado anteriormente, la motivación principal de este estudio está dado por el uso masivo de los EAIPD en la industria del vino en Chile, sin embargo, estos estanques son también utilizados para otros productos tales como la leche, cerveza e incluso líquidos peligrosos, los que de producirse un derrame del contenido, causarían graves daños más allá de lo económico.

1.1.1 Motivación, comportamiento de los estanques.

En la práctica se han observado daños en estanques después de verse expuestos a un sismo severo, y aunque las fallas observadas y/o documentadas han sido principalmente de estanques apoyados (sin patas), los estanques con patas son igualmente vulnerables.

a) Estanques con Patas

El comportamiento último de los estanques con patas y sus posibles mecanismos de falla, fueron analizados mediante modelaciones computacionales con elementos finitos (Rendel, 2006), concluyéndose principalmente que los posibles mecanismos de falla son principalmente tres: (i) falla local en la estructura soportante; (ii) falla por excesiva distorsión torsional de las patas que producen deformaciones grandes y localizadas en el manto cilíndrico y; (iii) falla tipo "pata de elefante" en el manto

cilíndrico, provocada por el momento volcante, falla prácticamente idéntica a la observada y documentada para los estanques apoyados. El tipo de falla que se produce, está relacionada con las relaciones entre resistencia y rigidez entre el sistema soportante y el manto, y además de la configuración de los refuerzos en la unión de éstas, dada la concentración de tensiones que se produce.

Las fallas causadas por sismos en estanques con patas no han sido documentadas formalmente, presumiblemente por la menor importancia que se les da, comparado con los grandes estanques apoyados. Sin embargo, existen algunos datos post-sismos que evidencian algunas fallas diferentes a las tradicionales, causadas por deficiencias en el sistema de anclaje de estos estanques al suelo, o incluso su ausencia, lo que provoca un deslizamiento descontrolado y aleatorio. Se ha visto que en algunos contenedores se llega a producir volcamiento, en tanto otros muestran deformaciones, e incluso grietas, que evidencian el choque con otros estanques, o bien con partes de otras estructuras.

b) Estanques con Apoyo Continuo

Referente a este tipo de estanque, se pueden encontrar varios documentos y estudios, muchos de ellos incluyen observaciones post-sismo, donde quedan documentadas diversas formas de falla, siendo dos las principales: la falla denominada “pata de elefante”, y otra tipo “punta de diamante”. Ambas fallas son producidas por el pandeo del manto. Estas fallas pueden llegar a causar la pérdida del contenido del estanque, si es que llegan a afectar zonas de soldaduras o de refuerzos, debido a fisuras o rajaduras. Imágenes de estos tipos de fallas se muestran en las Figura 1.1.1 El comportamiento de estos estanques está gobernado principalmente por la presencia o ausencia de anclajes de fijación del estanque a la superficie de apoyo, y la capacidad resistente de los mismos. Los estanques sin anclaje, o bien con anclaje deficiente, presentan el fenómeno de levantamiento o “uplifting” durante un sismo severo, lo que acarrea un gran cambio en el estado tensional y en la magnitud de las tensiones (Hamdan, 1999).



Figura 1.1.1: Tipos de falla por pandeo en el manto

Por todo lo anterior, actualmente se emplea en grandes estanques situados en zonas de riesgo sísmico la aislación basal lateral, lográndose buenos resultados en términos económicos y de seguridad, lo que se verá con más detalle, en la siguiente sección.

1.1.2 Aislación y disipación de energía en estanques, situación actual.

Uno de los motivos determinantes de las grandes solicitaciones sufridas por los estanques durante un evento sísmico importante es el bajo amortiguamiento que presenta el sistema, el fluido contenido aporta fundamentalmente masa al sistema, lo que se hace más manifiesto en los modos verticales, donde se alcanzan amortiguamientos menores al 0.5%, en tanto para los modos laterales el modo impulsivo presenta un amortiguamiento similar al vertical, mientras que en el modo convectivo se presentan valores cercanos al 2% (Cerda, 2006). Los códigos de diseño actualmente en uso entregan valores cercanos a los anteriores, proponiendo un 5% de amortiguamiento para los modos impulsivos y

un 0.5% para los modos convectivos (API, 2007). En la norma chilena para estructuras industriales se especifica un amortiguamiento de un 2% para modos impulsivos horizontales y un 0.5% para los modos convectivos (INN, 2003).

Se han realizado estudios para aumentar el amortiguamiento del sistema, aprovechando el oleaje del fluido al interior del estanque, básicamente mediante dos métodos: (i) colocando anillos perpendiculares a las paredes verticales y (ii) colocando placas verticales. Ambos sistemas pretenden generar disipación de energía adicional al sistema, por la separación del fluido en torno al disipador y reducir las fuerzas generadas por el movimiento convectivo del líquido. En la Figura 1.1.2-1 se muestran los esquemas de las soluciones propuestas e investigadas (Maleki y Ziyaeifar, 2007).

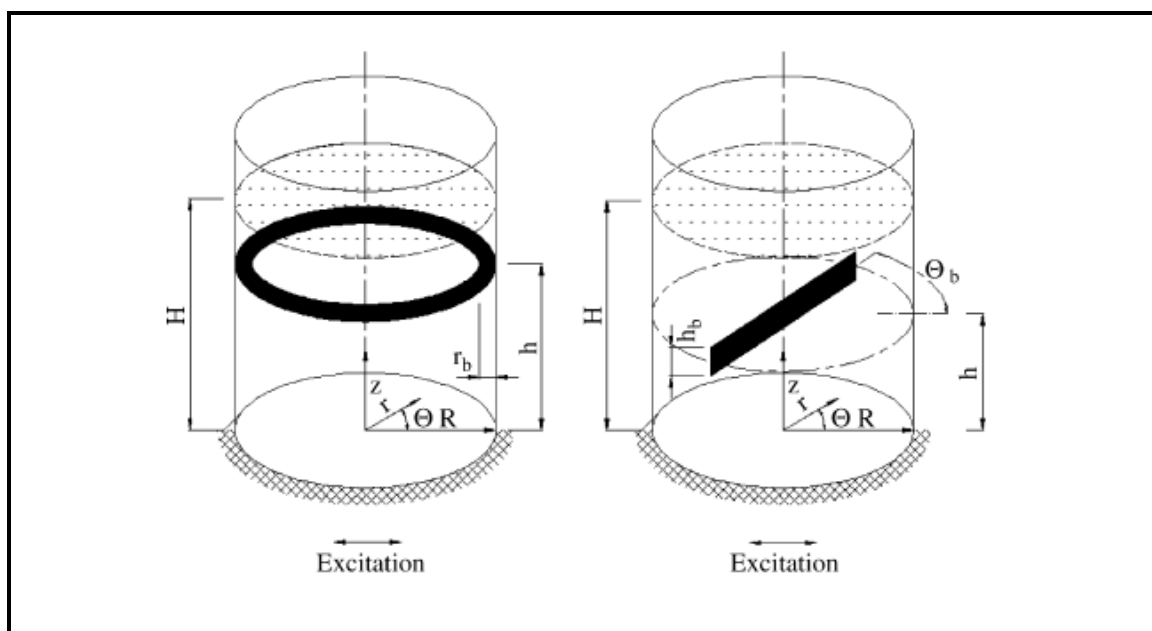


Figura 1.1.2-1: Sistemas de disipación de energía en fluidos contenidos

(Maleki y Ziyaeifar, 2007)

Tanto los estudios experimentales como analíticos demostraron que se modifica la respuesta del sistema; sin embargo, los cambios no son significativos, concluyéndose

que no es la solución correcta para mejorar el comportamiento de este tipo de contenedores.

En la actualidad, la aislación basal de estanques con apoyo continuo ha sido implementada principalmente mediante péndulos friccionales (FPS) o con aisladores de goma como los usados en las estructuras tradicionales, aunque sólo para estanques de gran tamaño, quedando los estanques de capacidad media y pequeña fuera de estos sistemas de aislamiento. Es precisamente en esta área donde resulta necesario crear un dispositivo de aislamiento sísmico de bajo costo, que aporte seguridad a esos sistemas y/o pueda reducir los costos en material.

Para el caso de los grandes estanques apoyados, últimamente se han propuesto nuevos sistemas tanto para el aislamiento como para la disipación de energía, para los que se ha mostrado un buen desempeño analíticamente. A continuación destacaremos algunos de estos.

En el campo del aislamiento, destaca una modificación de los aisladores convencionales de elastómero, donde la innovación consiste en dejar fijo el fondo del estanque al suelo, en tanto las paredes están soportadas sobre aisladores elastoméricos, reduciendo el costo del sistema significativamente al ahorrarse la construcción de una losa sobre los aisladores para soportar el estanque. La solución propuesta para permitir el desplazamiento entre las paredes y el fondo y evitar la pérdida del contenido, se logra mediante el uso de una membrana en la unión del fondo con las paredes. En la Figura 1.1.2-2 se muestra el sistema (Malhotra, 1997)

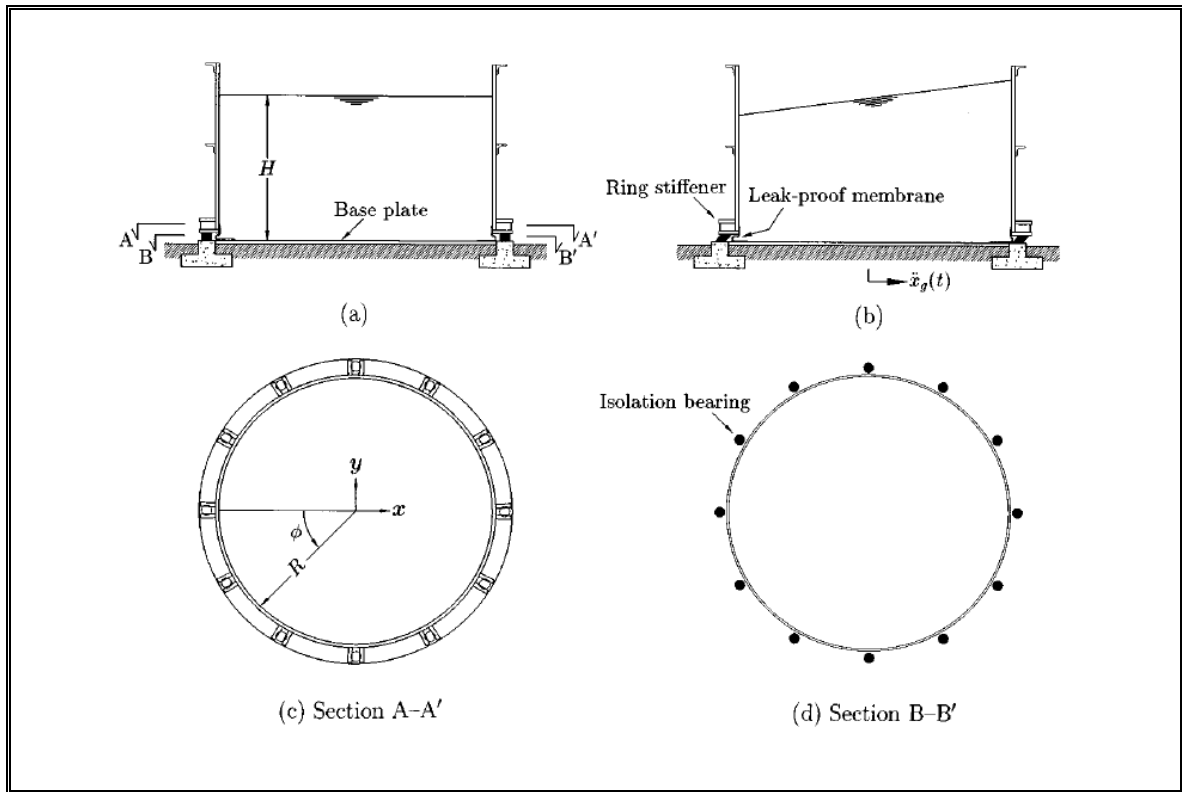


Figura 1.1.2-2: Sistema de aislación basado en aisladores elastoméricos y fondo flexible. (Malhotra, 1997)

Otro estudio interesante de destacar, dice relación con dispositivos de anclaje y disipación de energía en estanques de apoyo continuo. La idea fundamental es anclar los grandes estanques al piso con un dispositivo que posea un elemento que fluya a la torsión (Malhotra, 1998). En comparación con el caso tradicional de tanques chatos o anchos (Broads tanks), sin anclaje, mediante el uso de este dispositivo se logra aumentar el amortiguamiento, reducir el movimiento de la superficie libre del líquido, reducir el levantamiento de la base y las deformaciones plásticas. A continuación, en la Figura 1.1.2-3 se muestran esquemas del dispositivo y su implementación.

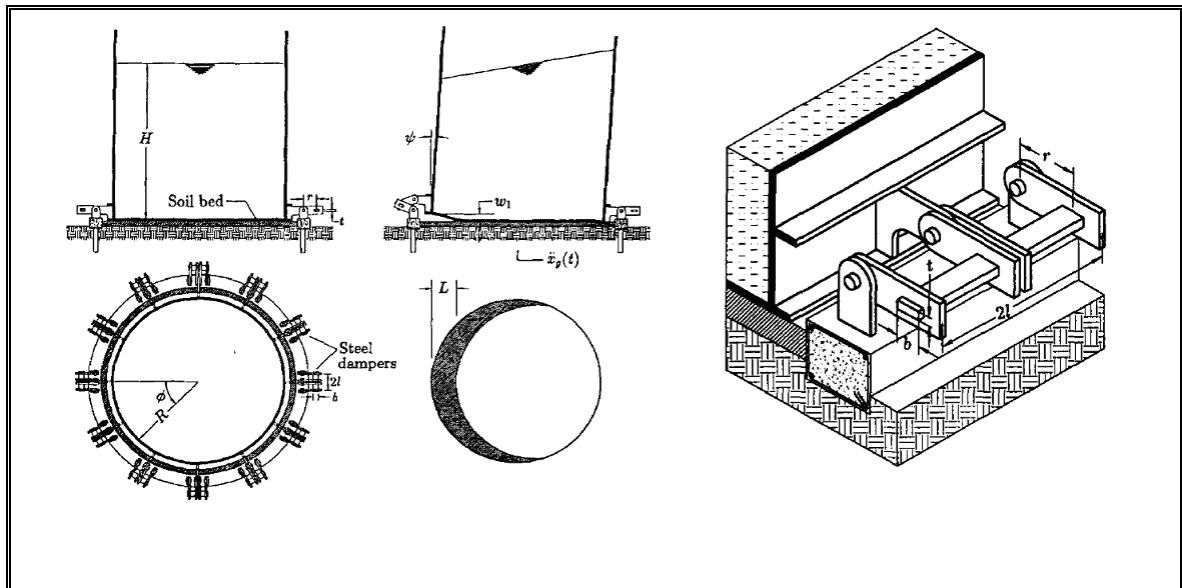


Figura 1.1.2-3: Sistema de disipación fundamentado en un elemento que fluye a torsión. (Malhotra, 1998)

Finalmente, otro método es el uso de sliding bearings (Shrimali, 2001). En el 2001, Shrimali demostró en forma analítica la efectividad del uso de dispositivos deslizantes, para sistemas como el péndulo friccional, sistemas de fricción pura y otros similares. Las reducciones de la respuesta sísmica resultaron notables para cualquiera de los sistemas estudiados, confirmando el resultado esperado de que la reacción horizontal máxima está controlada por el coeficiente de fricción y el peso del sistema y que además existen valores óptimos para el coeficiente de roce y el amortiguamiento para los que el corte basal es mínimo. También demostró que la interacción bi-direccional de las fuerzas de roce no se puede ignorar, ya que lleva a subestimar las deformaciones máximas.

1.2 Objetivos del Estudio

Por todo lo expuesto anteriormente, en este estudio se pretende demostrar experimentalmente la efectividad del uso de la aislación sísmica en estanques, más específicamente, el uso de la aislamiento vertical-rotacional en los estanques de acero

inoxidable con patas, con objeto de suplir la ausencia de sistemas de aislación sísmica en estanques de pequeña a mediana capacidad, para obtener un aumento del nivel de seguridad de estas estructuras y/o una disminución de costo en acero inoxidable en el proceso de manufactura del estanque.

Los objetivos específicos son: i) Desarrollar un dispositivo que permita una aislación vertical-rotacional; ii) Estudiar el comportamiento del sistema aislado analítica y experimentalmente y; iii) Contrastar los resultados de un modelo computacional realizado mediante un software de elementos finitos comercial, contra los resultados experimentales.

2 VALIDACIÓN ANALÍTICA, NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO

Dada la complejidad de los sistemas que se pretende estudiar y por la gran cantidad de variables que presenta nuestro problema, se estimó esencial realizar una serie de ensayos simples, que tuvieron como objetivo conocer el comportamiento del fluido, obteniendo valores para realizar una comparación con valores experimentales de las presiones que se pueden calcular mediante la solución analítica para estanques circulares de paredes rígidas y la simulación del mismo problema en el programa de elementos finitos ANSYS.

Se realizaron ensayos en una mesa vibradora unidireccional, sometiendo al espécimen a ondas sinusoidales, ruido blanco y pulsos, para cada uno de los cuales se registraron las aceleraciones en la base de la mesa y presiones al interior del fluido.

2.1 Descripción del modelo empleado

El modelo empleado para esta serie de ensayos fue un recipiente cilíndrico de polipropileno de alta densidad, con radio interno medio de 0.137 m., altura total del recipiente de 0.382 m. y espesor de 4 mm. La altura de agua total empleada en los ensayos fue de 0.3 m.

El montaje del ensayo y el sistema de adquisición empleado se muestra en la Figura 2.1-1.



Figura 2.1-1: Montaje del ensayo

La instrumentación utilizada se compuso por un acelerómetro uniaxial y dos sensores de presión, modelo WL400. Ambos instrumentos fueron conectados a un sistema de adquisición de datos dinámico, capaz de medir la señal de corriente que entregan los sensores de presión, así como la señal de voltaje del acelerómetro. Imágenes de los sensores empleados en el ensayo se muestran en la Figura 2.1-2.

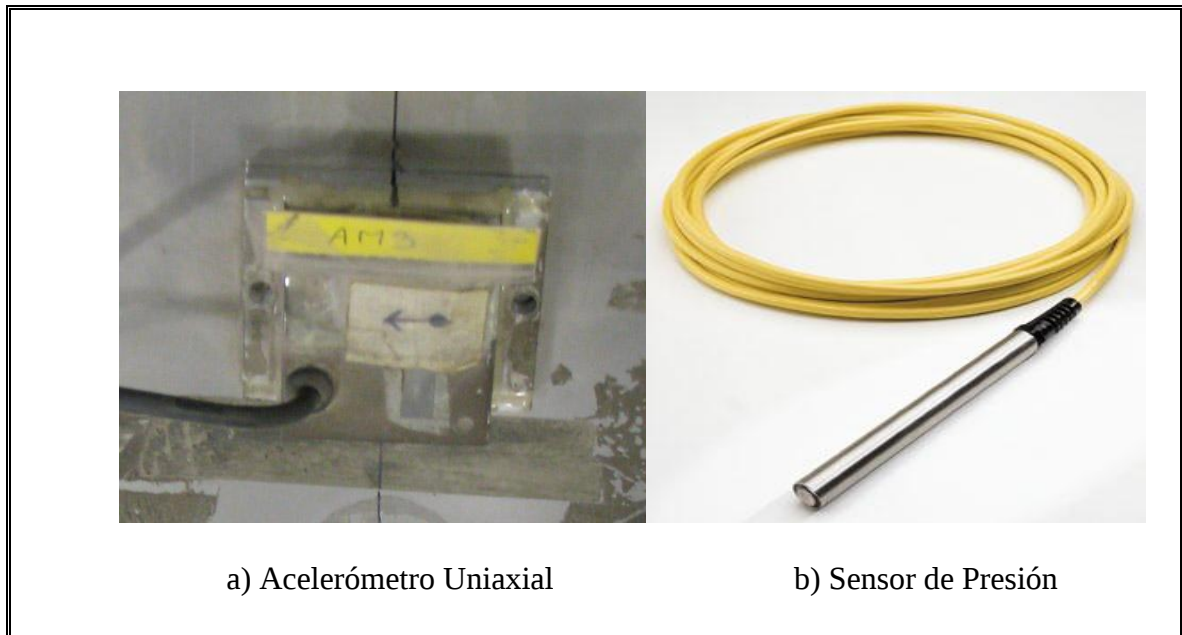


Figura 2.1-2: Instrumentos de Medición.

Los sensores de presión se colocaron en diferentes niveles y en lados opuestos del recipiente, en el eje del movimiento de la mesa vibradora. El acelerómetro uniaxial se colocó bajo la cubierta de la mesa. Un esquema de la ubicación de los sensores se presenta en la Figura 2.1-3.

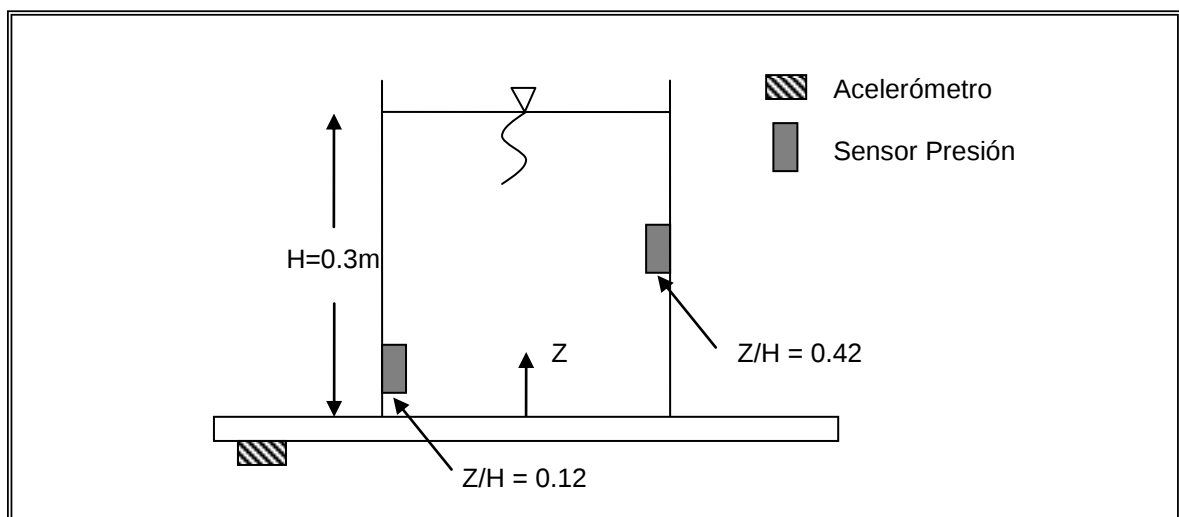


Figura 2.1-3: Montaje del Ensayo

2.2 Modelo de Elementos Finitos.

Para evaluar y comparar la respuesta del modelo de elementos finitos de un software comercial para el problema de la interacción fluido estructura y sloshing con valores experimentales, se utilizó el programa ANSYS. El modelo computacional desarrollado consiste de elementos SHELL63, tipo cáscara de comportamiento lineal y 4 nodos, los que representan el contenedor, y elementos FLUID80 para el líquido, el que corresponde a una modificación de los elementos sólidos 3D de 8 nodos, con alta flexibilidad y baja compresibilidad. Para poder representar el comportamiento de la superficie libre, el programa incluye resortes en los nodos pertenecientes a esta, los que tienen la misión de simular el efecto de la gravedad sobre la superficie del fluido en contacto con la atmosfera.

Una descripción de las características y propiedades del modelo se encuentra en la Tabla 2.2-1, e imágenes del modelo se pueden ver en la Figura 2.2-1

Tabla 2.2-1: Propiedades del Modelo de Elementos Finitos

Diámetro	[cm]	27.4
Altura fluido (H)	[cm]	30.0
Densidad del fluido	[Kg/m ³]	1000
Compresibilidad fluido	[MPa]	193000
Viscosidad del fluido	[kg / (s-m)]	1.1 E-03
Espesor Manto	[cm]	0.4
Elasticidad Polipropileno	[MPa]	1000
Masa fluido	[Kg]	1.798
Número total de nodos		25741
Número total de elementos		23826

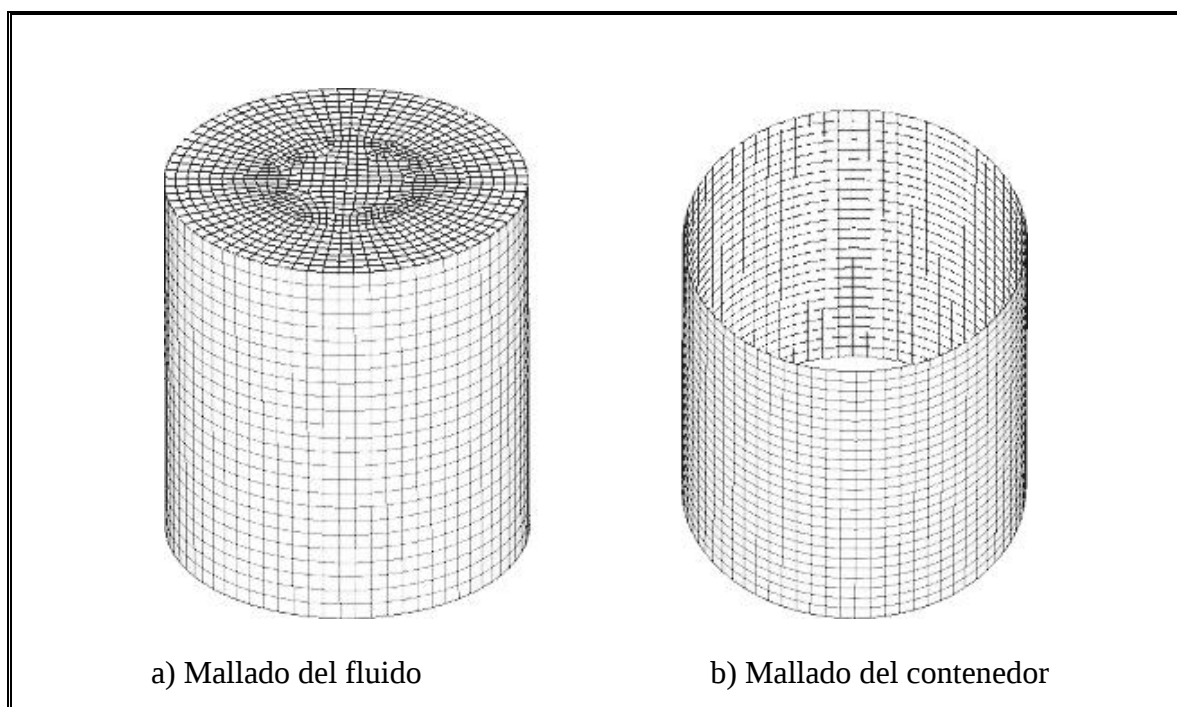


Figura 2.2-: Modelo de Elementos Finitos Contenedor Pequeño

Con el modelo desarrollado se realizaron análisis para obtener los modos de vibración y análisis de tiempo-historia para comparar con los datos experimentales. Los resultados de cada uno de los análisis y su comparación con valores experimentales y teóricos de la solución del fluido con paredes rígidas, se presentan en las siguientes secciones.

2.3 Identificación del sistema

Para identificar los modos de vibración propios del sistema en estudio se realizaron dos tipos de ensayos: excitaciones mediante señales con múltiples contenidos de frecuencia, comúnmente denominadas ruido blanco, y señales armónicas de tipo sinusoidal.

La primera metodología consiste en analizar el espectro de potencia de las señales de entrada, y compararlo con el espectro obtenido de procesar las señales de respuesta. En el caso estudiado, la entrada o excitación del sistema es la aceleración basal medida en la mesa vibradora, en tanto la salida o respuesta corresponde a las señales de presión medidas al interior del fluido. Si el contenido de frecuencias de la señal de entrada es lo suficientemente uniforme, las frecuencias donde aparecen los peaks en la respuesta corresponden a las frecuencias naturales del sistema.

La segunda metodología consiste en someter el sistema a excitaciones armónicas, mediante señales sinusoidales de diferente frecuencia manteniendo cada señal hasta observar que el sistema alcance el estado de régimen o “steady state”. De la observación de la respuesta en régimen, por la forma y la amplitud observada para cada frecuencia de excitación, se pueden reconocer los modos de vibrar. A continuación presentamos los resultados para ambas metodologías, junto con la comparación con la solución teórica para paredes rígidas.

2.3.1 Resultados Ruido Blanco:

Se sometió la probeta a 4 señales de aceleración de 120 segundos de duración cada una, las que fueron generadas aleatoriamente mediante MATLAB; luego fueron escaladas para obtener un valor de la Raíz media cuadrática (RMS) adecuada para que el comportamiento del fluido se mantenga en rango lineal. En este caso, las aceleraciones medias usadas en las señales fueron de 5% y 10% de la aceleración de gravedad g . A continuación se muestran los resultados obtenidos para las señales de 0.10g, donde se grafican los espectros de potencia de la señal de entrada (aceleración basal) y de la respuesta (presiones en 2 diferentes niveles con respecto al fondo). Las presiones se presentan normalizadas por el valor de la presión hidrostática en el fondo del recipiente, ρgH , donde H es la altura total de fluido.

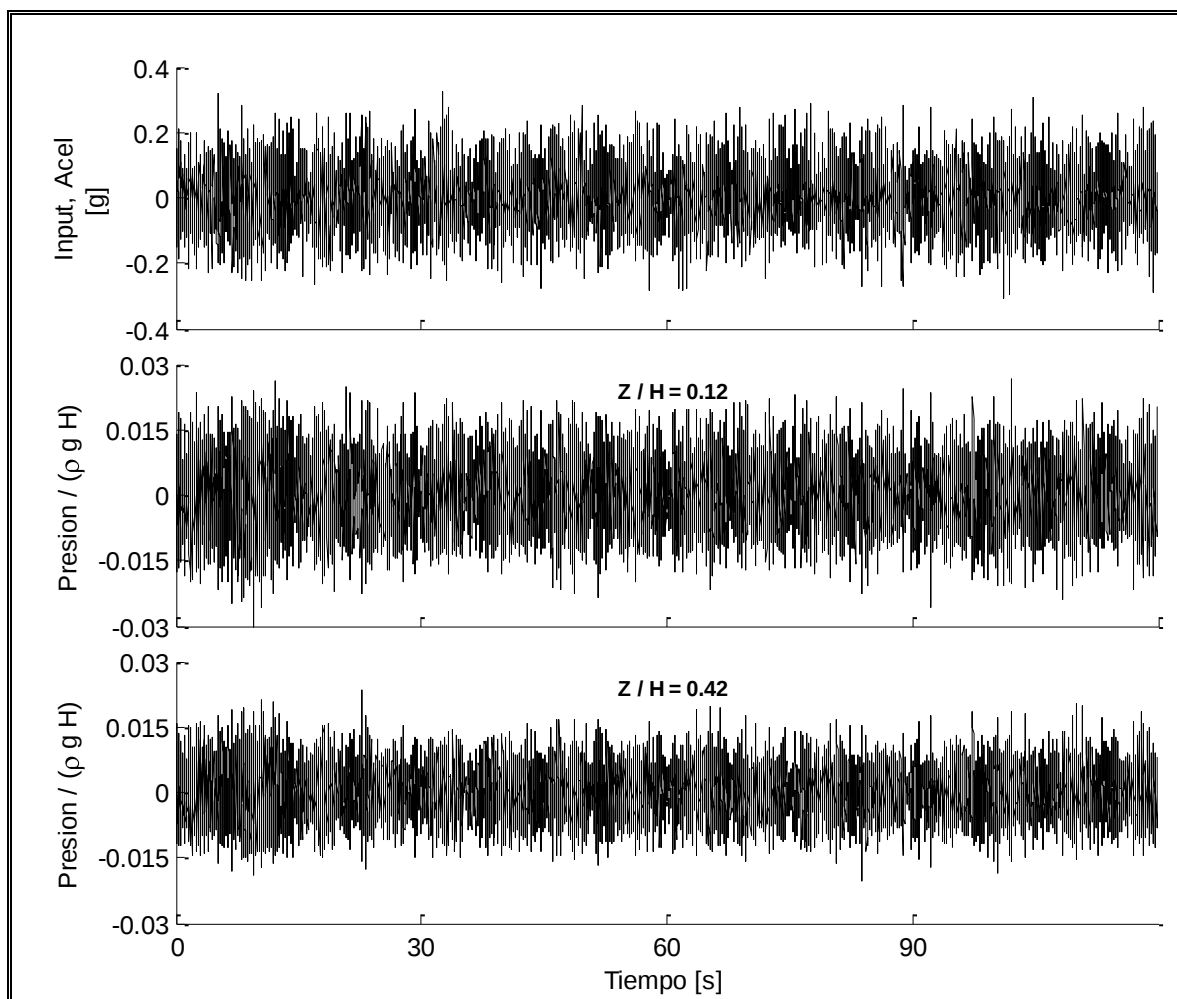


Figura 2.3.1-1: Señales en el tiempo Ruido Blanco 01, RMS 0.10g.

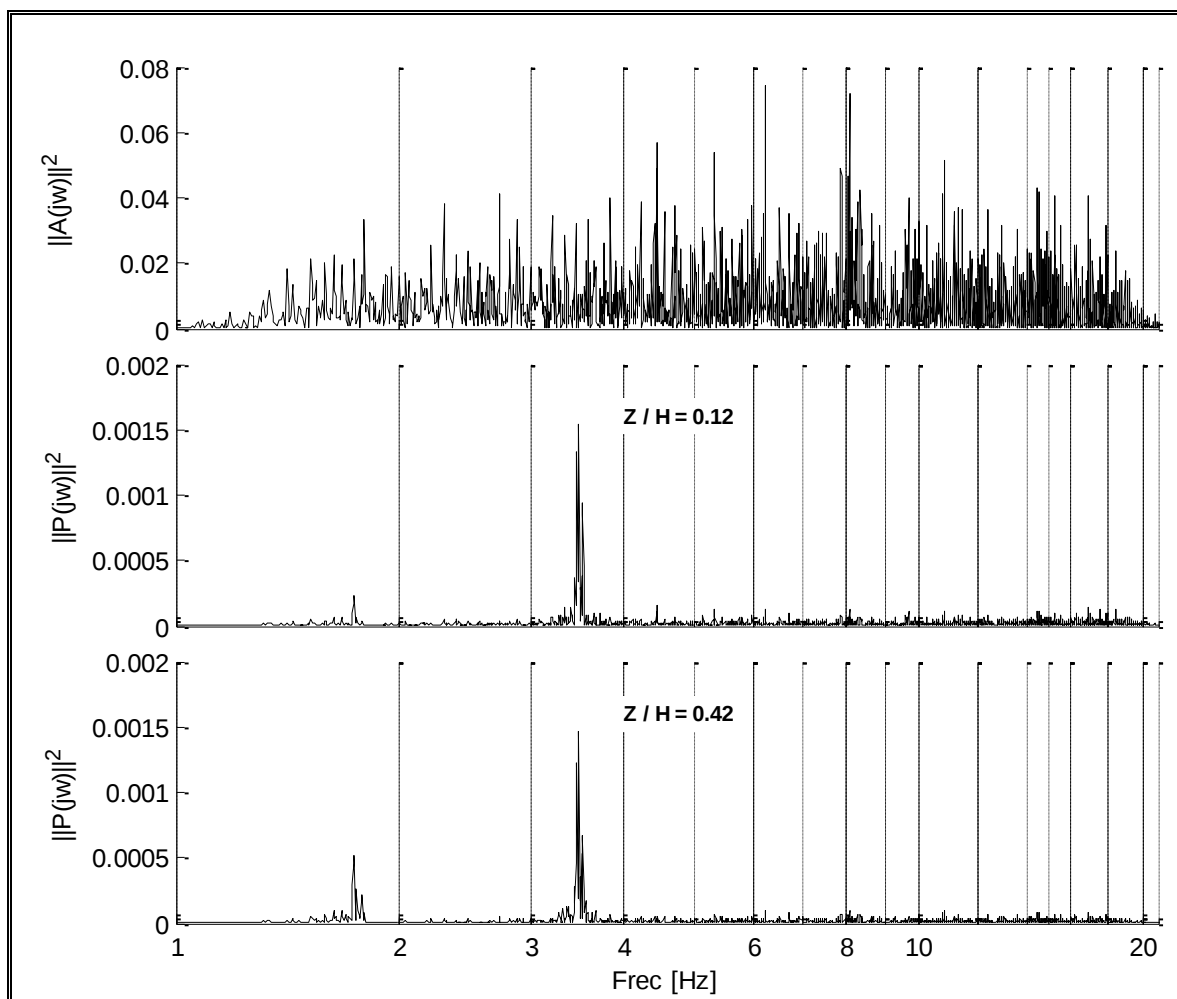


Figura 2.3.1-2: Espectros de potencia Ruido Blanco 01, RMS 0.10g.

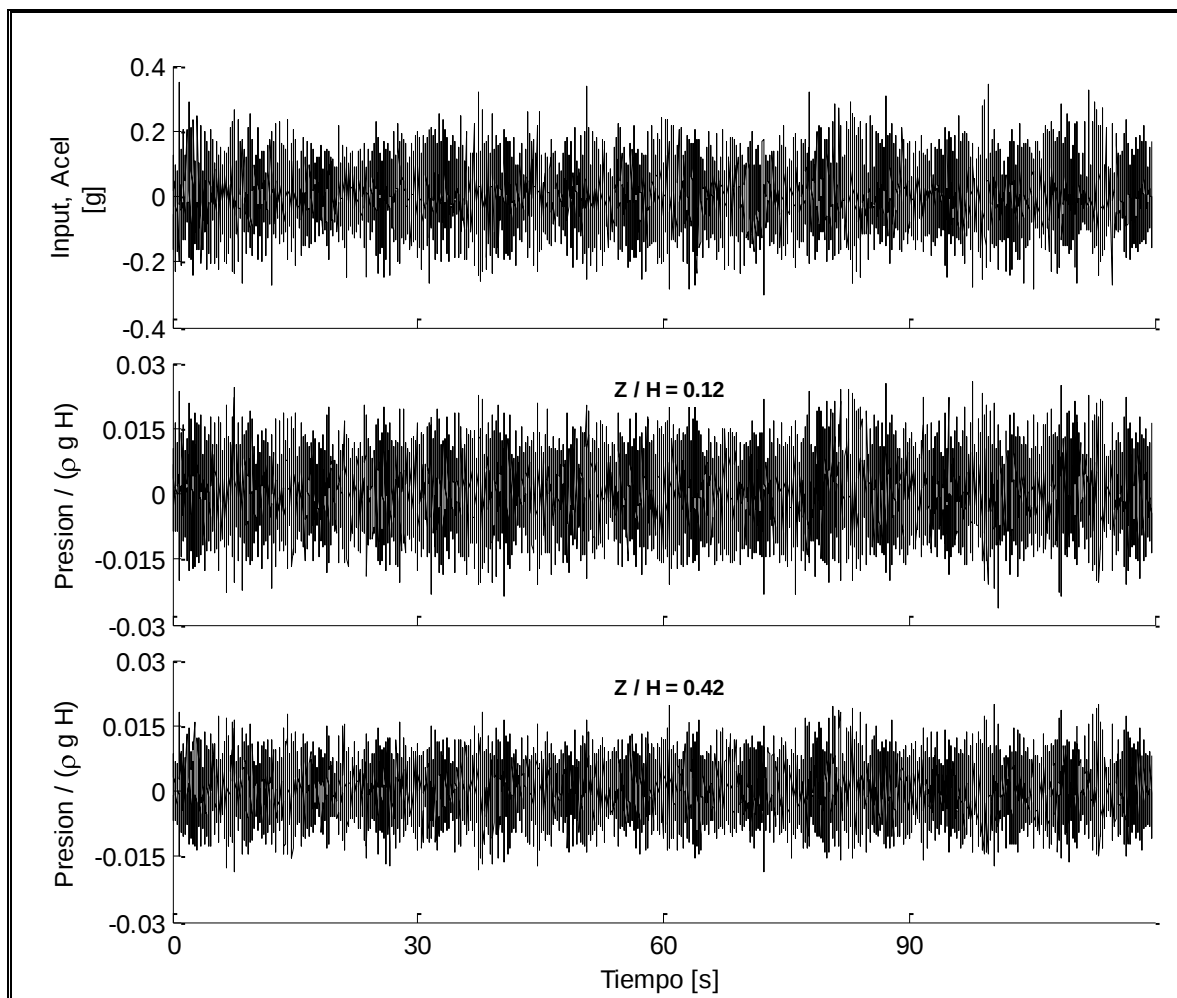


Figura 2.3.1-3: Señales en el tiempo Ruido Blanco 02, RMS 0.10g.

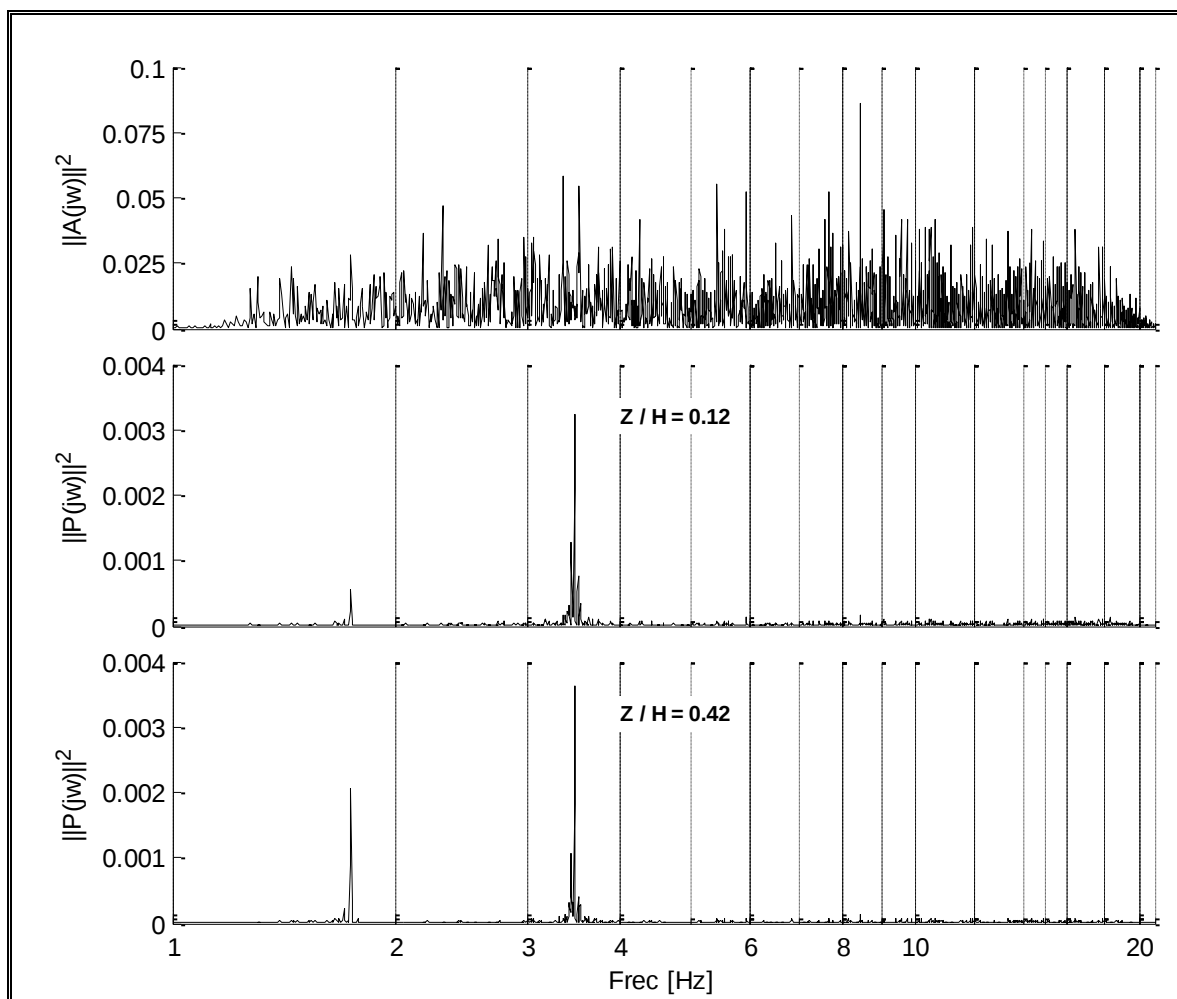


Figura 2.3.1-4: Espectros de potencia Ruido Blanco 02, RMS 0.10g.

De un rápido análisis de las figuras anteriores, se puede observar que la respuesta en frecuencia dentro del rango estudiado refleja la existencia de dos modos principales que controlan la respuesta. Los valores son coincidentes para las cuatro señales: 1.75 Hz y 3.4 Hz. La comparación con los valores obtenidos del modelo de elementos finitos, y de la solución analítica, se muestran en la Tabla 2.3-1.

Tabla 2.3-1: Modos de vibración

Modo	Experimental (Ruido Blanco)		Ansys		Teórico, modelo paredes rígidas	
	frec. [Hz]	Masa [Kg] / %	frec. [Hz]	Masa (*) [Kg] / %	frec. [Hz]	Masa (*) [Kg] / %
1	1.75	-- / --	1.823	0.3530 / 96.7%	1.827	0.3726 / 95.8%
2	3.4	-- / --	3.173	0.0098 / 2.7%	3.110	0.0112 / 2.89%
3	--	-- / --	4.04	0.0016 / 0.45%	3.935	0.0027 / 0.69%

(*) Porcentaje de masa (%), se calcula con respecto a la masa de los modos convectivos, ya que los modos impulsivos son de frecuencias muy altas y masas muy menores a las de los primeros modos.

Para los dos primeros modos queda manifiesto que los valores resultan muy cercanos para los tres casos, y las diferencias entre estos se pueden explicar por: a) la diferencia en la geometría real del contenedor, el cual no es perfectamente cilíndrico como está supuesto en los dos modelos teóricos, el contenedor real es de diámetro variable ($\phi_{\text{inferior}}=26.5$ cm; $\phi_{\text{superior}}=28.3$ cm); b) Las propiedades mecánicas del contenedor en el modelo computacional no fueron obtenidas experimentalmente, sino de las propiedades nominales del polipropileno; c) las condiciones de borde usadas en el modelo fueron ideales, ya que no se modeló la base que fijaba el contenedor a la mesa vibradora.

2.3.2 Resultados señales armónicas:

Para identificar los modos de manera cualitativa, se procedió a someter el espécimen a excitaciones sinusoidales de diferentes frecuencias, cubriendo el rango donde se debían encontrar los modos propios de vibrar. Las dos primeras formas modales fueron identificadas tanto por la forma de la superficie libre, como por la amplitud de los desplazamientos de la misma. El primer modo se produjo para excitaciones armónicas con frecuencias entre 1.75 y 1.85 Hz, en tanto el segundo modo se manifestó para frecuencias entre 3.0 y 3.1 Hz.

A continuación, en la Figura 2.3.2-1 se muestran imágenes de los dos primeros modos experimentales y se comparan con los modos obtenidos del modelo en ANSYS.

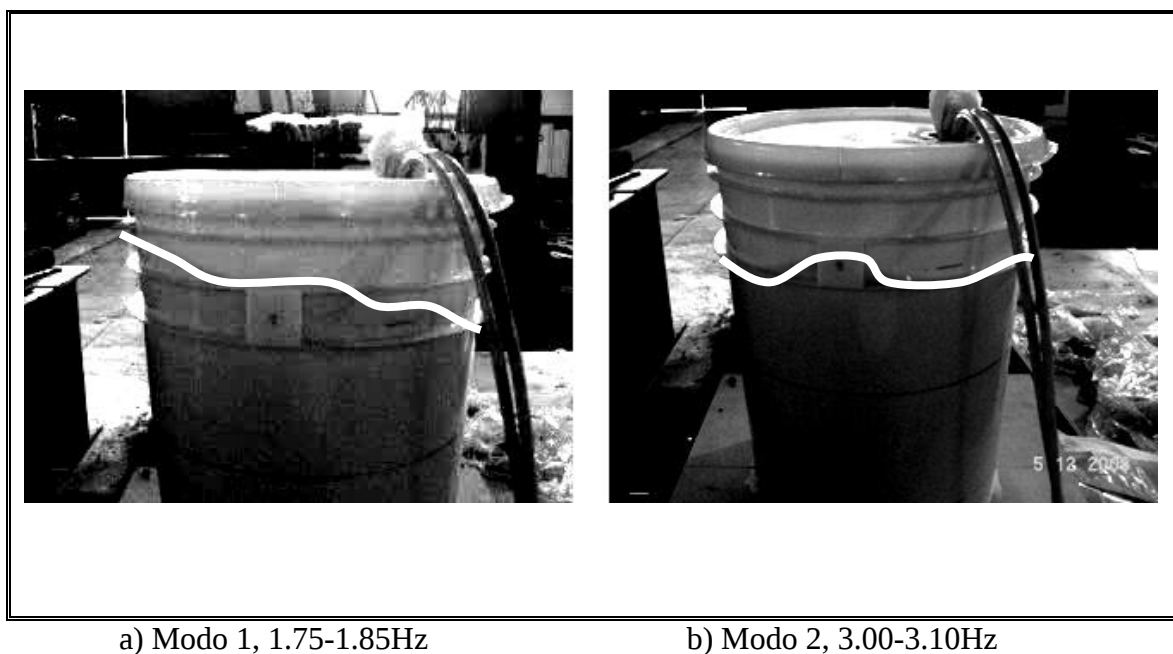


Figura 2.3.2-1: Modos Experimentales.

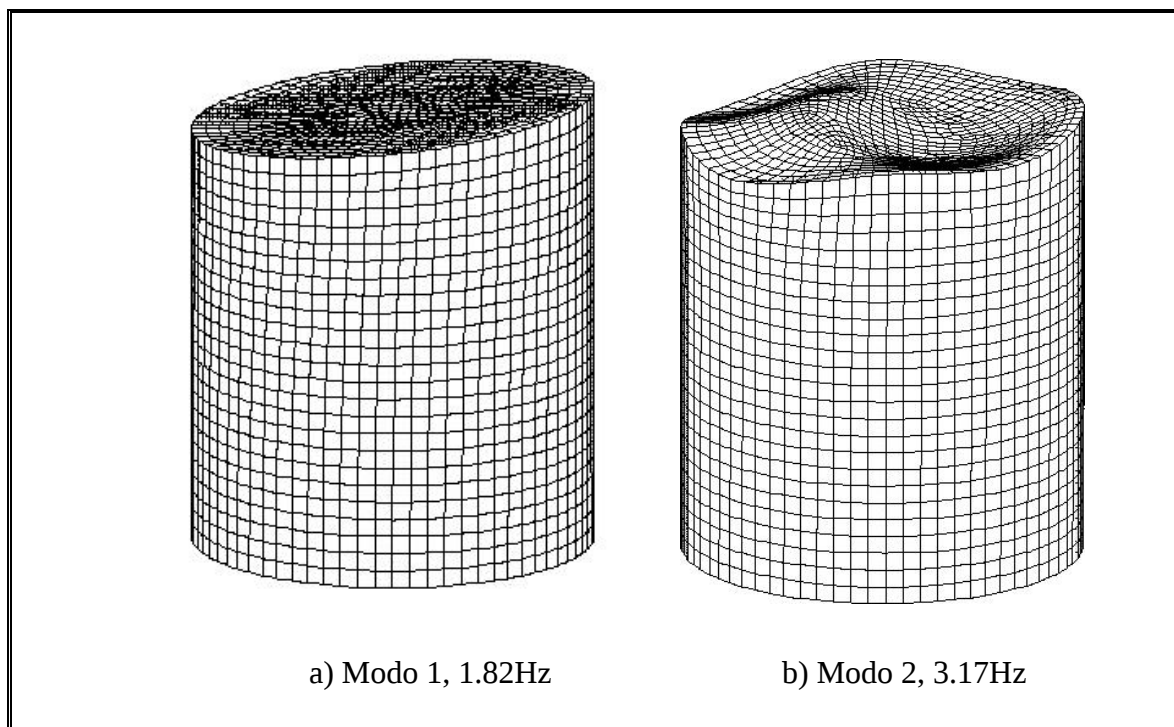


Figura 2.3.2-2: Modos modelo Elementos Finitos.

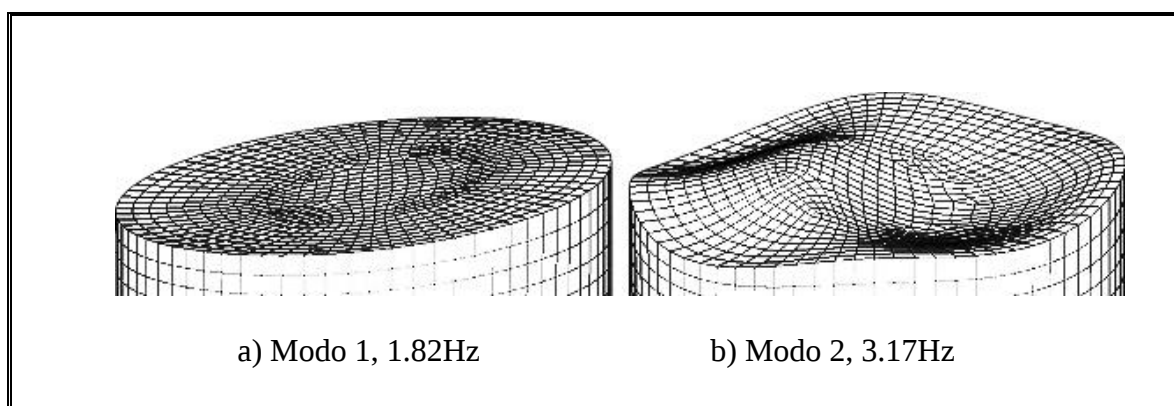


Figura 2.3.2-3: Modos modelo Elementos Finitos, detalle superficie Libre

De la rápida inspección de las figuras 2.3.2-1 a la 2.3.2-3 se aprecia la buena concordancia entre las formas modales observadas, v/s las obtenidas del modelo en ANSYS.

2.3.3 Excitaciones impulsivas y sísmicas

Para comparar el comportamiento del modelo de elementos finitos y de la solución analítica para paredes rígidas con los datos experimentales obtenidos, se procedió a someter el modelo a 5 pulsos sinusoidales de diferentes frecuencias, denominados P1 a P5, de duración igual a una longitud de onda, y al registro sísmico de Northridge escalado. A continuación, en las Figuras 2.3.3-1 y 2.3.3-2 se muestran los espectros de potencia de las señales aplicadas en gráficos de escala lineal y semi-logarítmica:

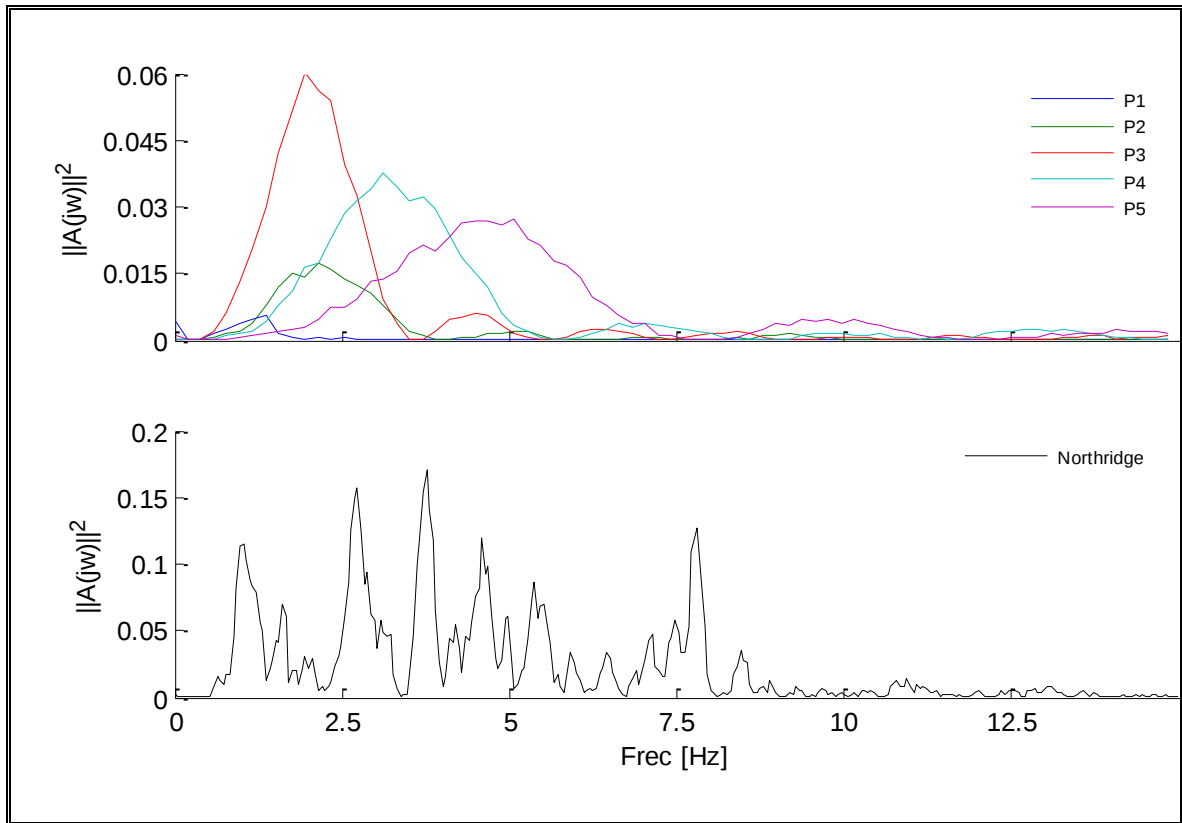


Figura 2.3.3-1: Contenido de frecuencia de las señales de aceleración basal,

Escala Lineal.

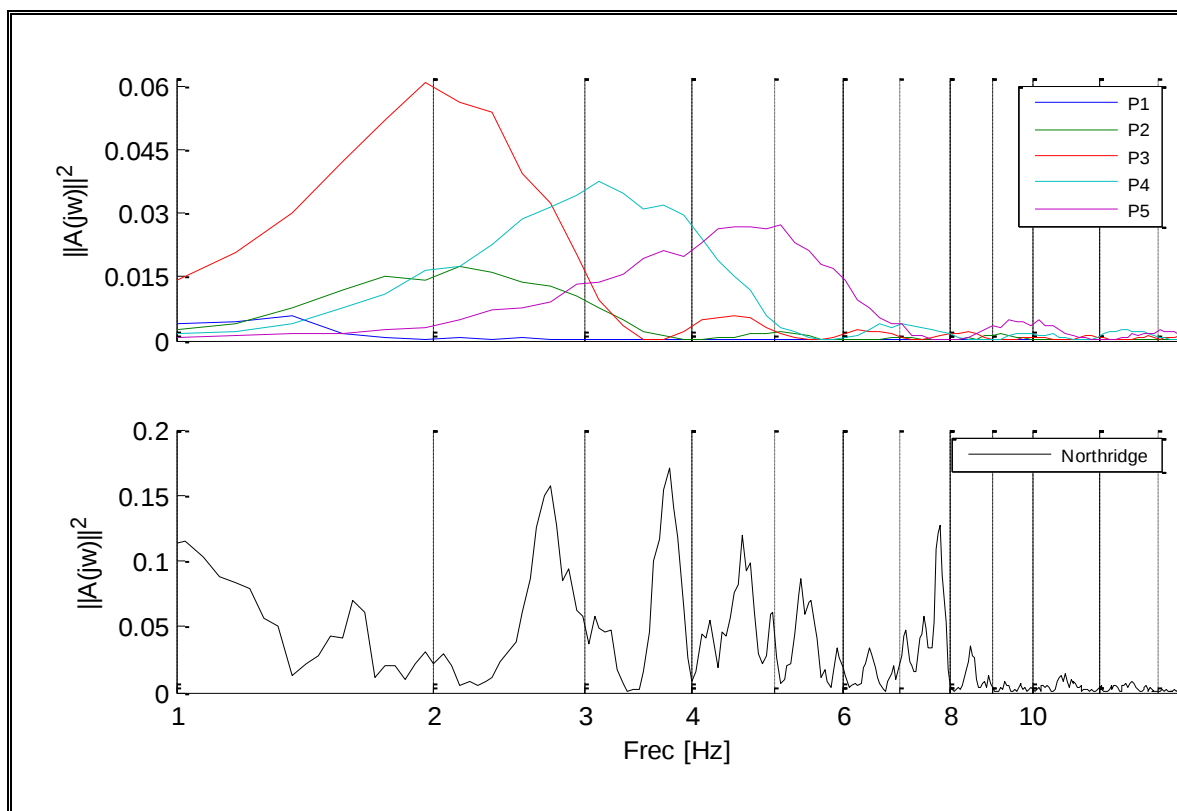


Figura 2.3.3-2: Contenido de Frecuencia de las Señales de Aceleración Basal,
Escala semi-logarítmica.

Como se observa en las figuras 2.3.3-1 y 2.3.3-2, los impulsos no tienen un contenido de frecuencia discreto, sino que son la composición de frecuencias en torno a la que se intentaba reproducir mediante el pulso, además de tener presente señales del tipo armónica superior, con frecuencias iguales al doble de la señal ideal.

En la Tabla 2.3.3-1 se presenta el listado de las señales de aceleración medidas en los ensayos y detalles de las mismas.

Tabla 2.3.3-1: Datos Señales Medidas en los Ensayos

Señal	Rótulo	Aceleración Punta [g]	Frecuencia Predominante [Hz]
Impulso 01	P1	0.03	1.3
Impulso 02	P2	0.10	2.0
Impulso 03	P3	0.15	2.2
Impulso 04	P4	0.18	3.3
Impulso 05	P5	0.20	4.6
Sismo Northridge	Northridge	0.67	múltiples

La comparación entre los valores experimentales y teóricos se realizó considerando sólo las presiones, por considerarse la variable más importante del punto de vista del comportamiento estructural, y por la dificultad de medir los desplazamientos de la superficie libre.

En los gráficos siguientes se presenta la comparación de presiones hidrodinámicas de la respuesta experimental, junto con los valores calculados mediante el modelo de elementos finitos usando como input las aceleraciones basales medidas en cada ensayo.

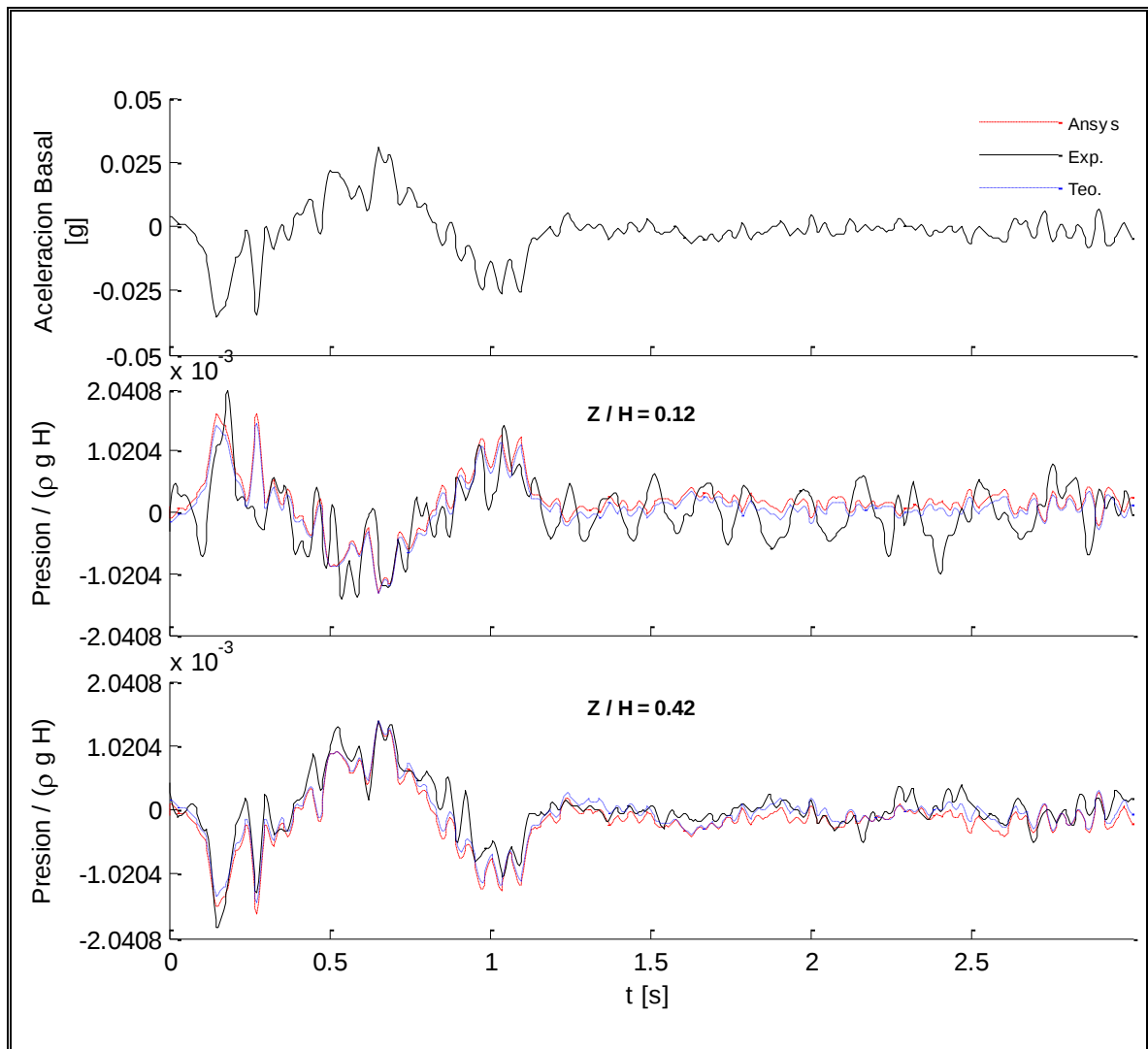


Figura 2.3.3-3: Comparación en el Tiempo de Respuesta en Presiones, Señal

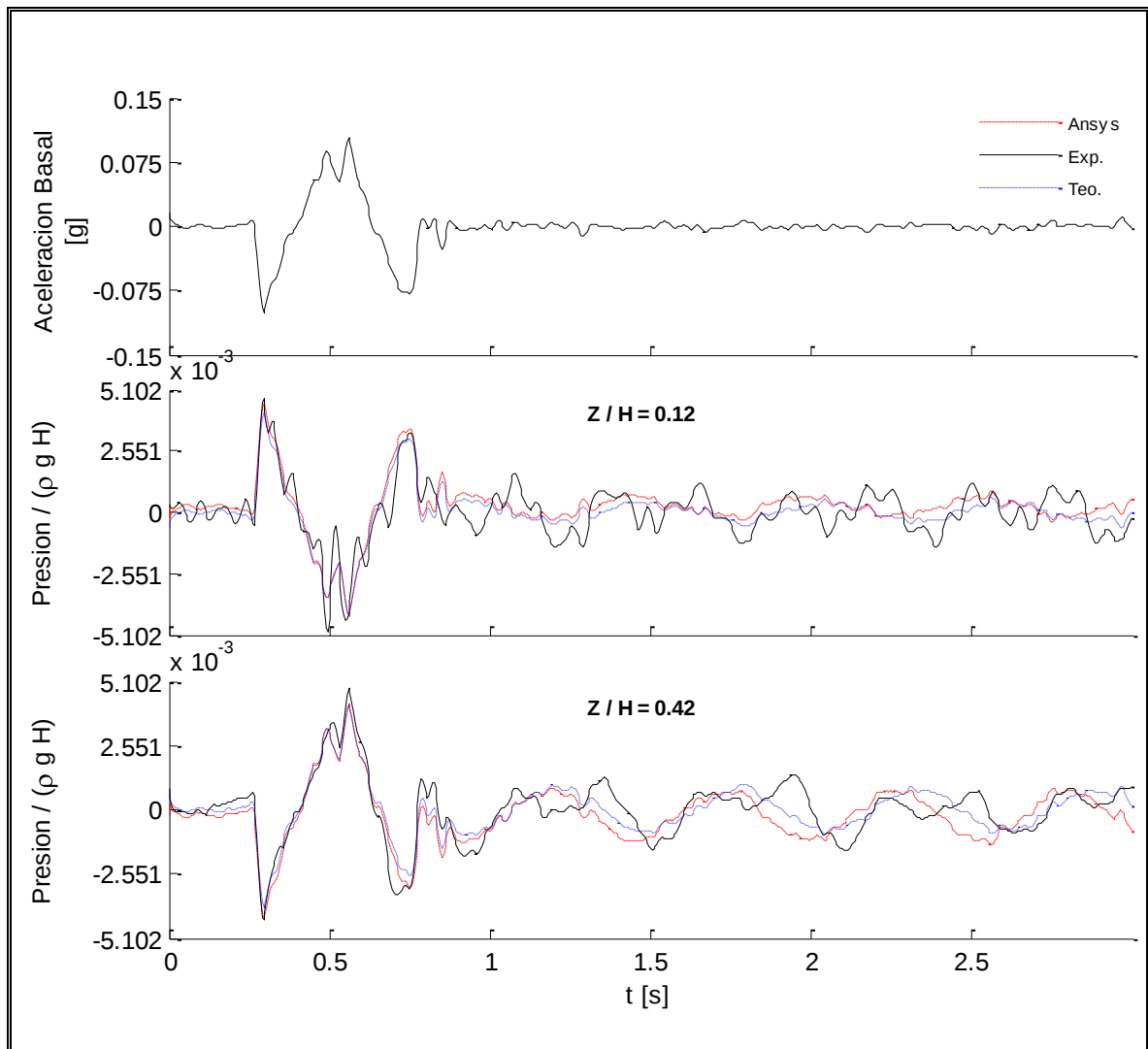


Figura 2.3.3-4: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, señal P2

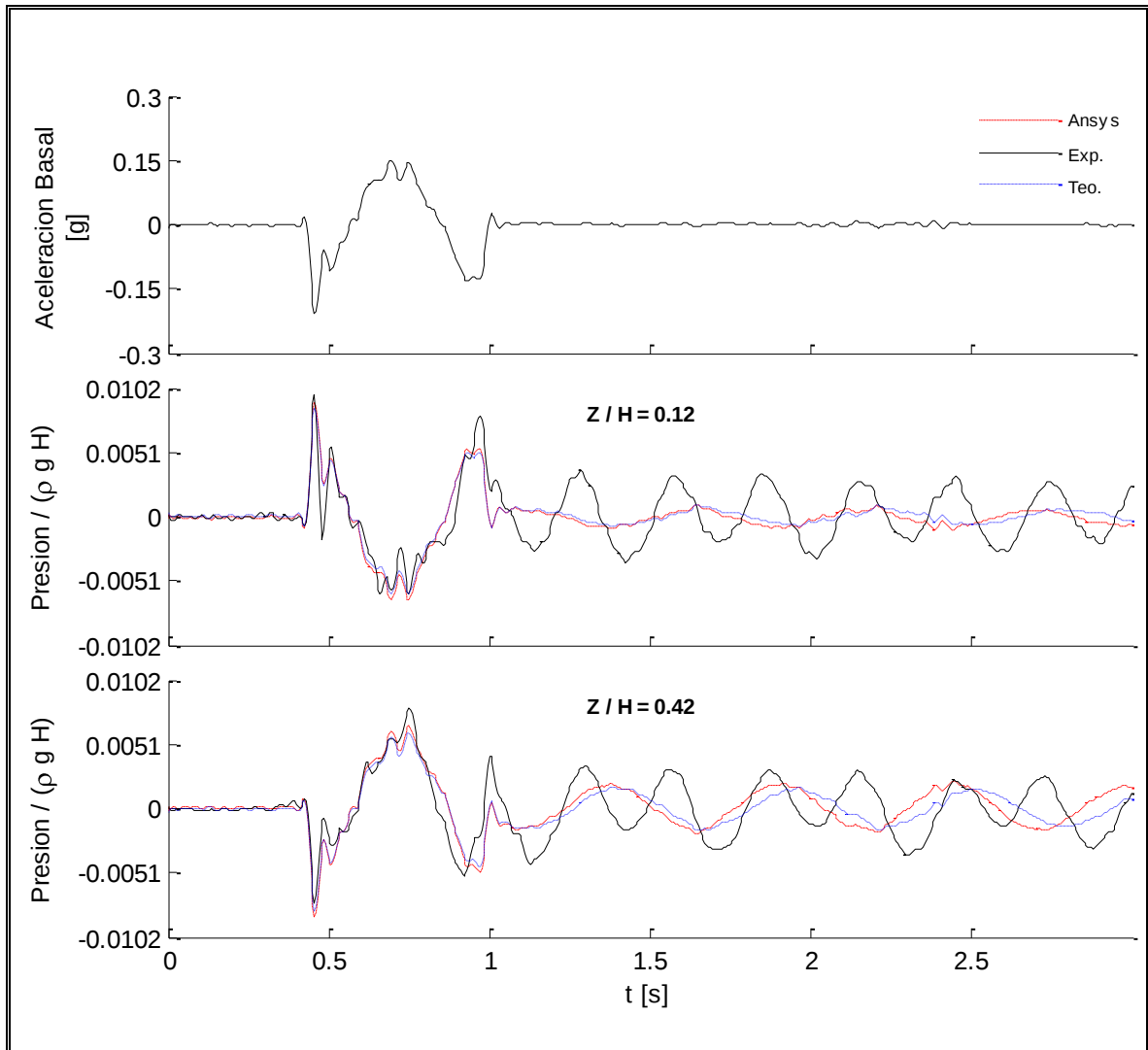


Figura 2.3.3-5: Comparación en el Tiempo de Respuesta en Presiones, señal P3

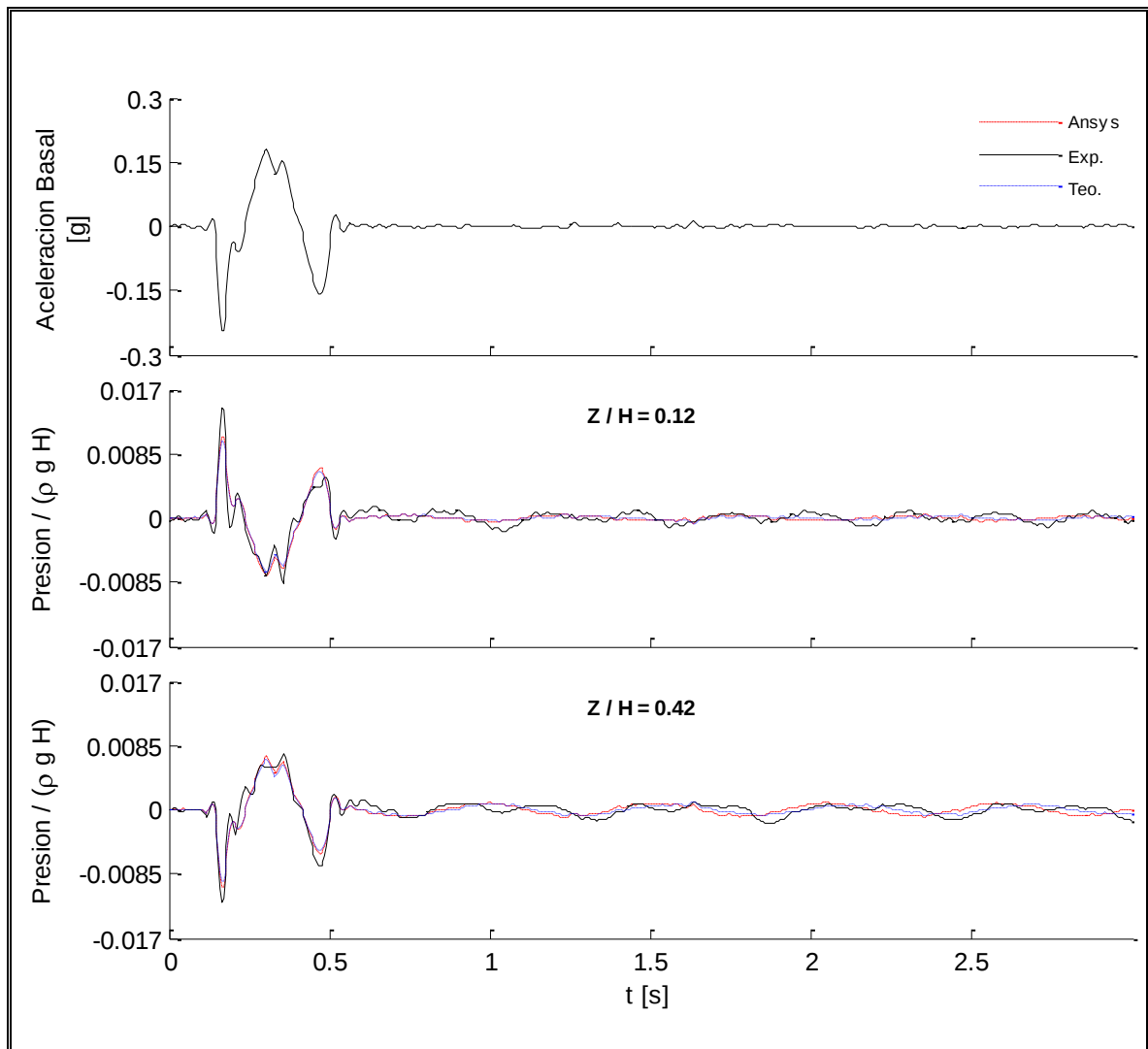


Figura 2.3.3-6: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, señal P4

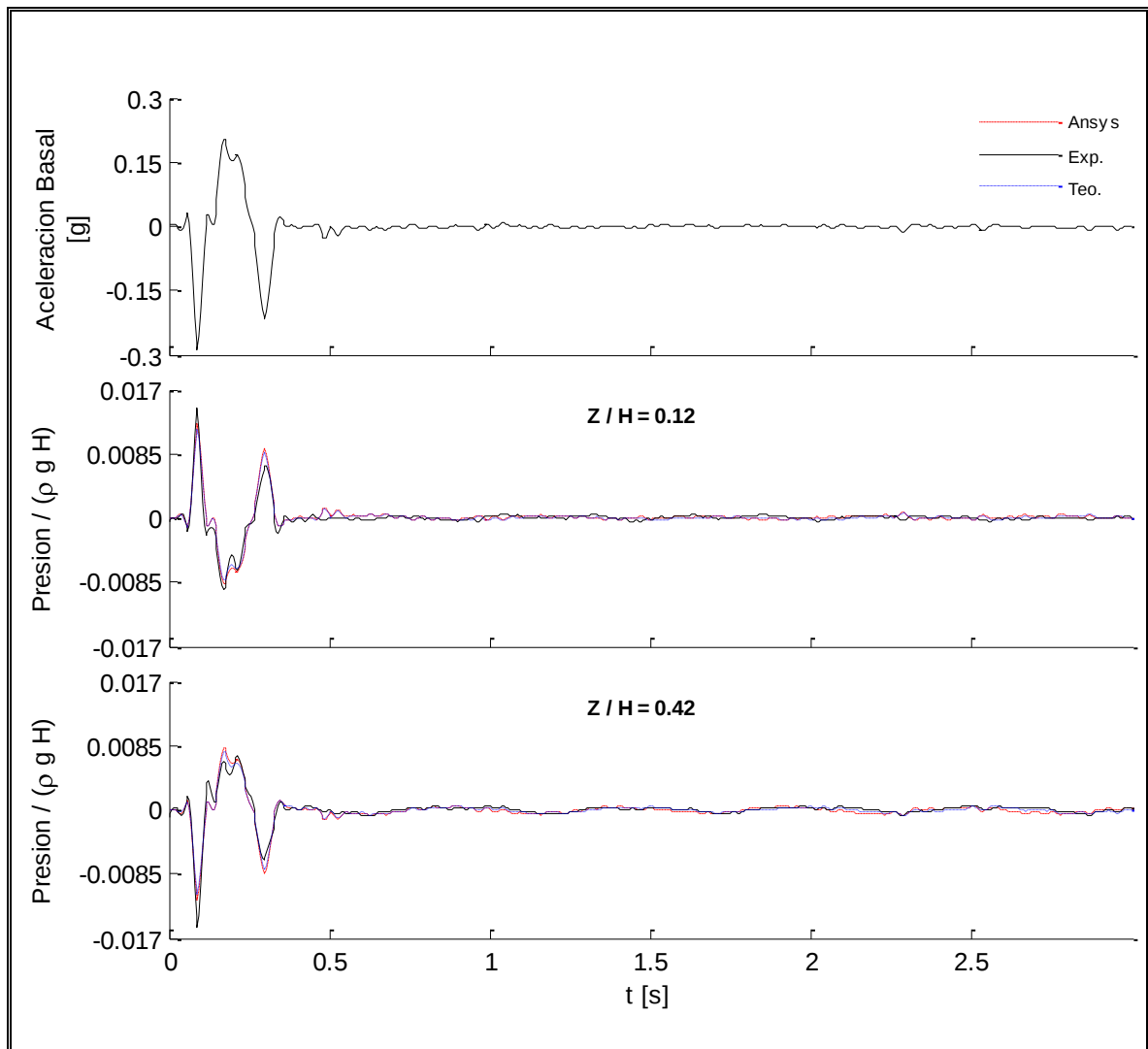


Figura 2.3.3-7: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, señal P5

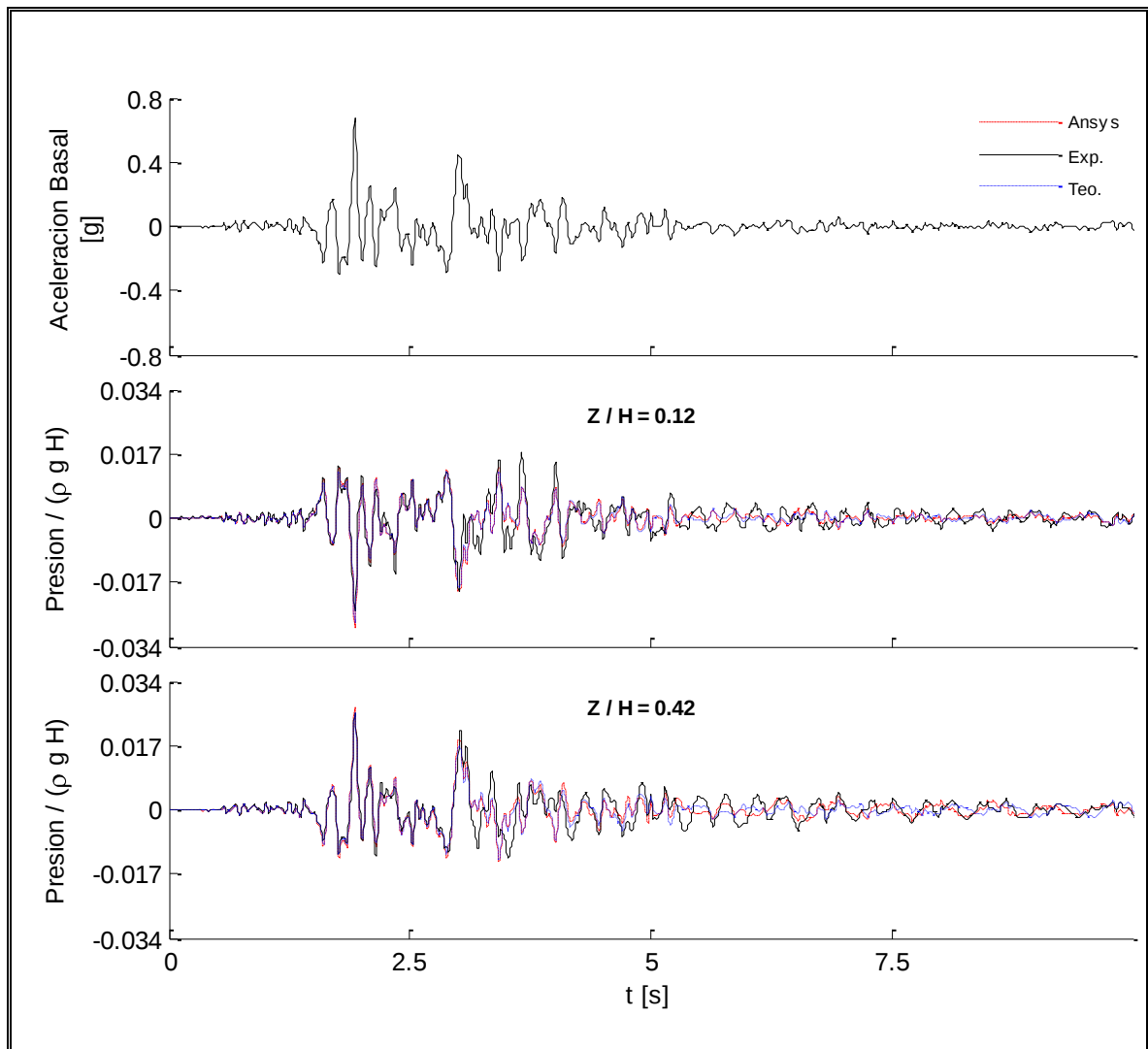


Figura 2.3.3-8: Comparación en el Tiempo de Respuesta en Presiones, Señal
Sísmica de Northridge

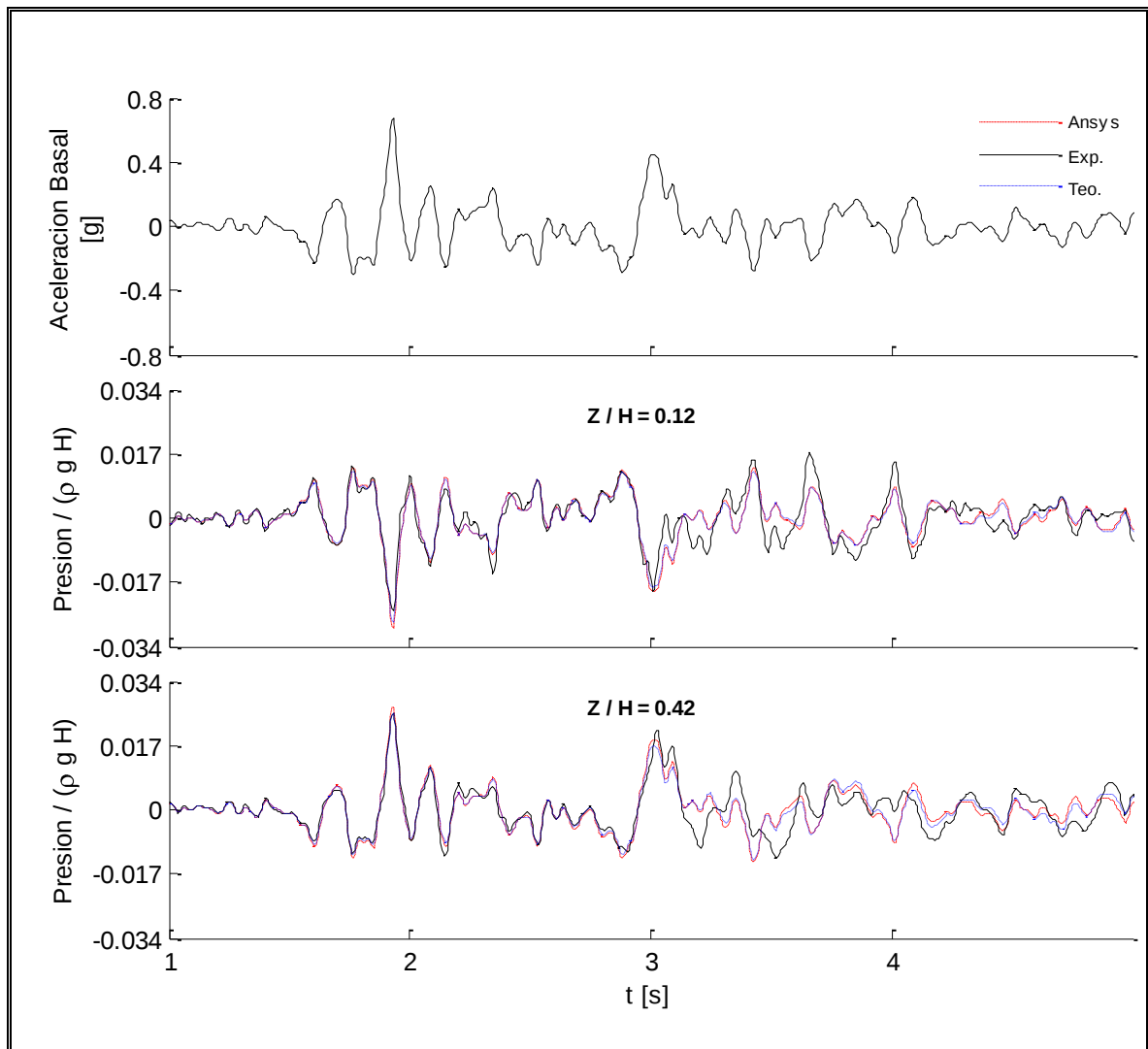


Figura 2.3.3-9: Comparación en el tiempo de respuesta en presiones, detalle
zona movimiento fuerte, señal sísmica de Northridge

Del análisis de las figuras anteriores se puede afirmar que los máximos experimentales quedan bien representados con los dos tipos de cálculos analíticos empleados y que las presiones experimentales del tipo impulsivas también son cercanas a las analíticas.

Por otra parte, es evidente que los modelos analíticos presentan desajustes con los valores medidos para algunas frecuencias de oleaje, lo que queda manifiesto en las Figuras 2.3.3-3 a 2.3..3-5, lo que se puede atribuir a: a) diferencias en los modos experimentales de los analíticos, según lo presentado en las secciones anteriores de este capítulo; b) Alturas de oleaje importantes, que superan al comportamiento lineal supuesto en todos los modelos, lo que induce efectos de segundo orden; c) Flexibilidad de la estructura soportante de la mesa vibradora, lo que no fue incluido en el modelo; y d) Diferencias en geometría y propiedades de los materiales supuestos en el modelo. Una de las diferencias muy influyentes es que el recipiente no era perfectamente cilíndrico, sino que presentaba un diámetro mayor en la parte superior, lo que no fue incluido en ninguno de los modelos analíticos empleados.

3 AISLADOR VERTICAL FRICCIONAL

Con el fin de poder comprobar experimentalmente la efectividad de la aislación vertical rotacional en EAIPD's (Cerde, 2006) y su factibilidad de construcción e implementación, una de las primeras fases de la investigación se centró en diseñar un aislador sísmico vertical, para un estanque de dimensiones reducidas. La creación de este dispositivo tiene como objetivo evaluar el desempeño del sistema en un estanque cilíndrico de dimensiones reducidas, con 4 patas de soporte, 1000 litros de capacidad, 1.9 mts. de altura total y 1 m. de diámetro. Detalles del estanque se presentan en el capítulo 4.

Uno de los principales objetivos fue idear una solución práctica, que pudiese constituir una base para desarrollar un sistema aplicable en la construcción de estanques con patas o bien en la aislación de estanques reales en servicio. Bajo la idea anterior, algunas de las restricciones que se tuvieron presentes para desarrollar este dispositivo fueron: a) limitaciones geométricas, el dispositivo debe colocarse bajo cada pata del estanque; b) necesidad de una alta disipación de energía; c) gran flexibilidad; y d) bajo costo. Dentro de las variables anteriores, la disipación y la flexibilidad controlaron principalmente la solución, ya que al modificarlas es posible controlar que los desplazamientos queden en rangos aceptables tanto para la estructura como para el disipador sin que el sistema pierda eficiencia. Detalles de la solución desarrollada y el comportamiento teórico y experimental del dispositivo se presentan en las siguientes secciones.

3.1 Descripción de la solución implementada

El aislador desarrollado es básicamente un mecanismo con un resorte en espiral en dirección vertical, el que trabaja en paralelo a un sistema de rozamiento. Bajo cada pata

del estanque se coloca un dispositivo, el que por diseño es flexible en dirección vertical, racial y rotacional en torno a ambos ejes horizontales. Por otra parte, el dispositivo es rígido en dirección tangencial (al manto del contenedor) y torsional (en el plano horizontal). El resorte es el responsable de proveer flexibilidad al sistema, mientras que el rozamiento causa la disipación de energía en el sistema, controlando las deformaciones verticales. El mecanismo de disipación está conformado por piezas de acero que rozan entre sí, lo que permite desarrollar grandes fuerzas para bajos niveles de fuerza normal en las superficies de contacto.

Para la construcción del dispositivo se empleó exclusivamente acero y se diseñó para que fuera completamente desarmable con el fin de permitir la inspección, el reemplazo, ajuste o reparación de cualquiera de sus componentes. En la Figura 3.1-1 se muestran planos en elevación del dispositivo, las unidades están en milímetros.

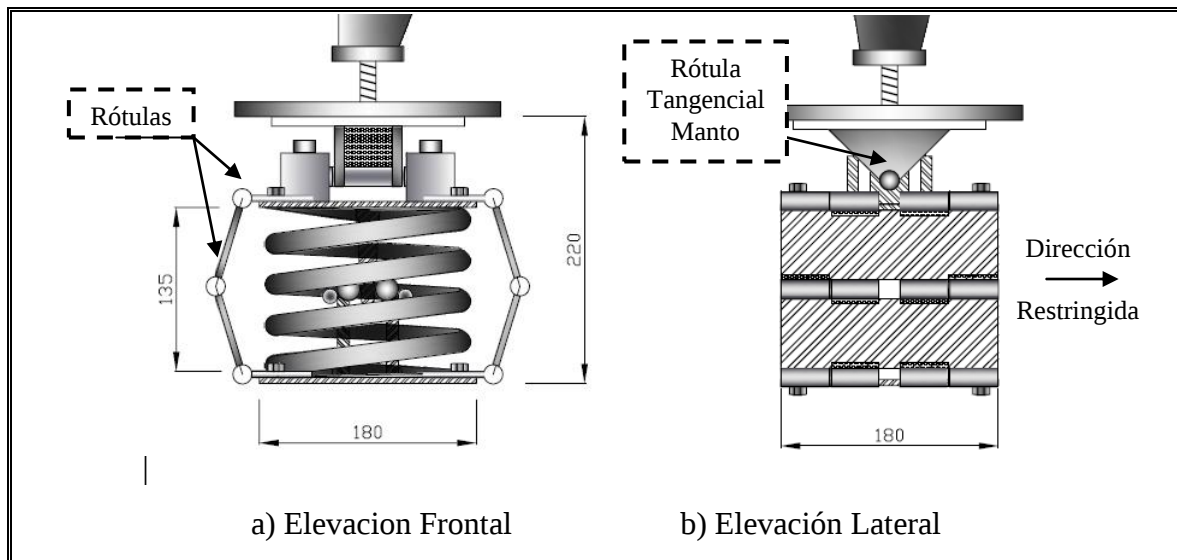


Figura 3.1-1: Vista General del aislador

Como se aprecia en la Figura 3.1-1, además del resorte y del mecanismo de disipación, el dispositivo cuenta con placas laterales articuladas que unen los extremos superior e inferior, las que son responsables de impedir el desplazamiento sólo en la dirección tangencial. Las vistas a) y b) de la Figura 3.1-1 corresponden a la ubicación de los aisladores en sentido radial y tangencial al manto respectivamente; esta configuración permite el giro de la pata en sentido tangencial, pero restringe el desplazamiento en este mismo sentido, permitiendo el aislamiento vertical rotacional. Para que el sistema funcione correctamente, basta que la estructura a aislar tenga 3 o más patas, y que cada dispositivo se emplee con la orientación antes mencionada.

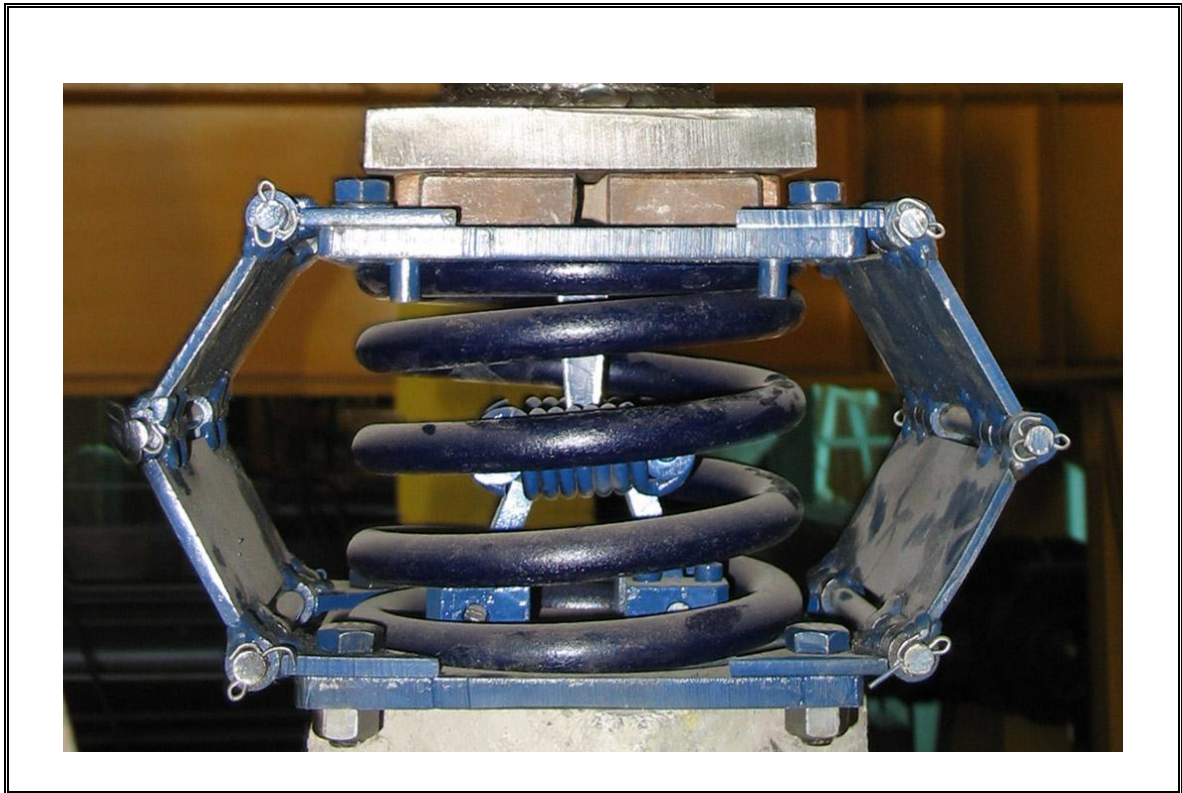


Figura 3.1-2: Vista general del dispositivo

En la Figura 3.1-2 se muestra el dispositivo completo, donde se visualiza el mecanismo de fricción al interior del resorte principal. Este mecanismo consiste de un elemento de acero con forma de cuña fijado a la placa superior, que penetra entre dos barras cilíndricas del mismo material, unidos entre sí por 2 resortes secundarios, los que generan una fuerza variable a medida que estos elementos se separan por el descenso de la cuña. Esquemas de este mecanismo se presentan en la Figura 3.1-3

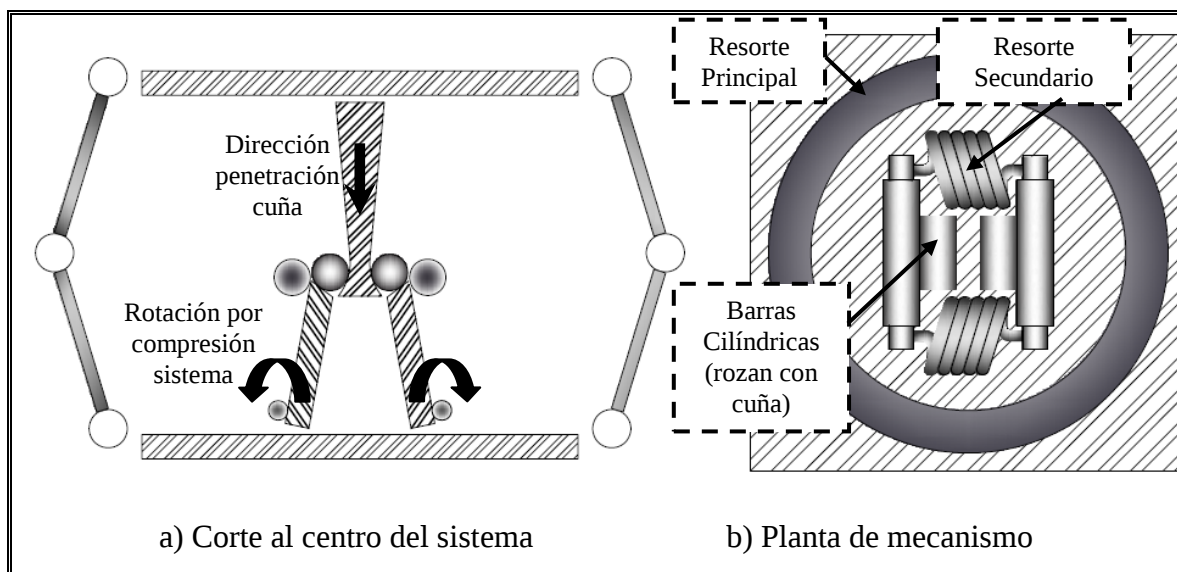


Figura 3.1-3: Detalle Sistema de Disipación

Debido a la pendiente de las superficies de rozamiento de la cuña con respecto a la vertical, α , se producen dos efectos: 1) la fuerza de roce total tiene el mismo ángulo α de la cuña, lo que disminuye la resultante vertical del roce, resultando $F = \mu \cdot N \cdot \cos(\alpha)$, donde N es igual a la fuerza normal entre cilindro y cuña. Por otra parte, la fuerza normal entre cuña y cilindros tiene una componente vertical la que actúa finalmente como una fuerza proporcional a la penetración de la cuña en el sistema, constituyéndose en un pseudo-resorte vertical adicional, de magnitud $N \cdot \sin(\alpha)$. Un esquema de las fuerzas presentes en el sistema de roce en el caso dinámico se presenta en la Figura 3.1-4, en la que se ha exagerado el ángulo de la cuña para ilustrar mejor los efectos antes mencionados.

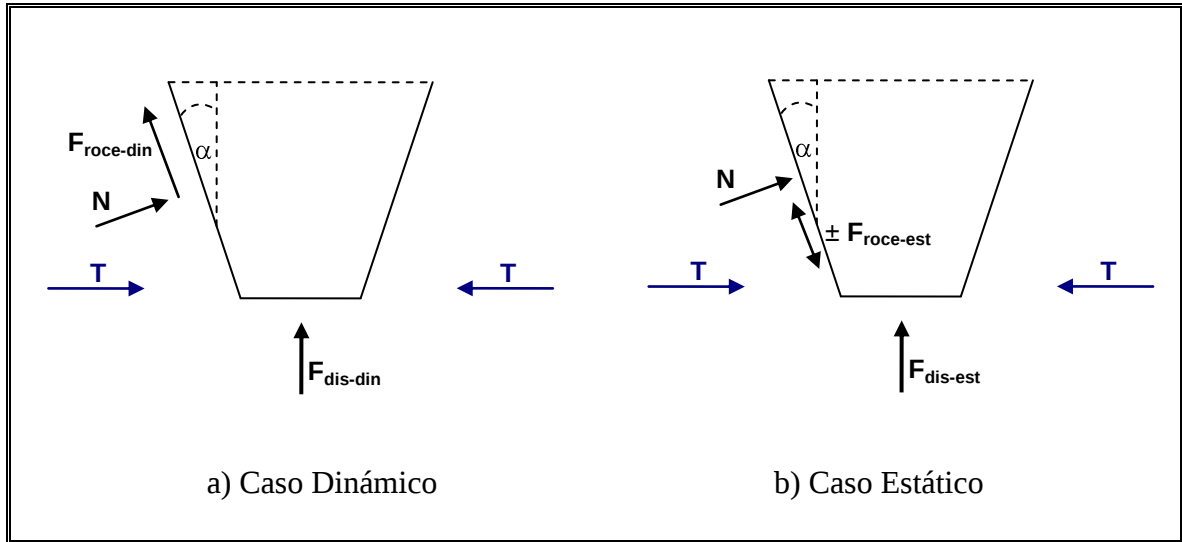


Figura 3.1-4: Fuerzas en Dispositivo de Roce

De la figura 3.1-4, la fuerza normal entre cuña y barras cilíndricas, N , se relaciona con la tensión total ejercida por el par de resortes secundarios, T , de la manera:

$$N = T \cdot \cos(\alpha) \quad (3.1-a)$$

por otra parte, la fuerza de roce, $F_{roce-din}$, debido al coeficiente de roce, μ_d , para el caso dinámico es:

$$F_{roce-din} = \mu_d \cdot N = 2 \cdot \mu_d \cdot T \cdot \cos(\alpha) \quad (3.1-b)$$

y la fuerza de roce para el caso estático, $F_{roce-est}$, debido al coeficiente de roce, μ_s , cumple con:

$$-2 \cdot \mu_s \cdot T \cdot \cos(\alpha) \leq F_{roce-est} \leq 2 \cdot \mu_s \cdot T \cdot \cos(\alpha) \quad (3.1-c)$$

si tomamos en cuenta el efecto de la proyección vertical de la fuerza normal a la cuña, $N \cdot \sin(\alpha)$ y de $F_{roce-din}$, la fuerza total vertical en el dispositivo en el caso dinámico, $F_{dis-din}$ resulta:

$$F_{dis-din} = 2 \cdot [\pm F_{roce-din} \cdot \cos(\alpha) + N \cdot \sin(\alpha)] \quad (3.1-d)$$

reemplazando (3.1-b) en (3.1-d) y desarrollando, se obtiene:

$$F_{\text{dis-din}} = 2 \cdot [\pm \mu_d \cdot T \cdot \cos^2(\alpha) + T \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)] \quad (3.1-e)$$

por otra parte, siguiendo un procedimiento análogo, se puede ver que $F_{\text{dis-est}}$ cumple con:

$$-2 \cdot \mu_s \cdot T \cdot \cos^2(\alpha) \leq F_{\text{dis-est}} - 2 \cdot T \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \leq 2 \cdot \mu_s \cdot T \cdot \cos^2(\alpha) \quad (3.1-f)$$

Importante es destacar la variabilidad de la fuerza en el dispositivo en el caso estático (3.1-f), lo que se traduce en que existen múltiples posiciones de equilibrio para una misma sollicitación. Debido a lo anterior, es que será natural que en el sistema estanque-aisladores se produzcan variaciones de fuerzas en los apoyos aun sin excitaciones, o bien para excitaciones pequeñas, desencadenando desde luego variación en el estado tensional de la estructura, lo que explicaría algunos comportamientos atípicos observados en los ensayos que se describen en los siguientes capítulos. Estos comportamientos implican, por ejemplo, el aumento o reducción en la media de las deformaciones unitarias medidas en un punto, aún para bajas o nulas excitaciones, produciendo deformaciones residuales, lo que podría ser atribuible a acomodos del sistema producto de la multiplicidad de posiciones de equilibrio.

El sistema implementado en el estanque ensayado en este estudio se presenta en la Figura 3.1-6, donde la ubicación de los dispositivos permite el giro en sentido tangencial al manto, la misma dirección en que se encuentra restringido el desplazamiento.



Figura 3.1-6: Aisladores Montados en Estanque

3.2 Modelo Teórico.

Para comprender el comportamiento del dispositivo completo, lo mejor es analizar por separado los dos sistemas presentes en el mismo, el resorte principal y el sistema de roce, los que se compatibilizan por estar sometidos al mismo desplazamiento vertical. El sistema del resorte vertical es lineal, mientras que el sistema de disipación, debido a la forma de cuña del elemento de roce, y a la fuerza normal variable que producen los resortes secundarios que unen los elementos que rozan con la cuña, produce una

constitutiva similar a un triángulo isósceles truncado. Un esquema de las constitutivas se presenta en la Figura 3.2-1, donde es importante destacar que la compresión del dispositivo se considera positiva para ilustrar mejor el comportamiento y que tanto el desplazamiento como la fuerza se presentan normalizadas por el mayor valor posible respectivo en el dispositivo.

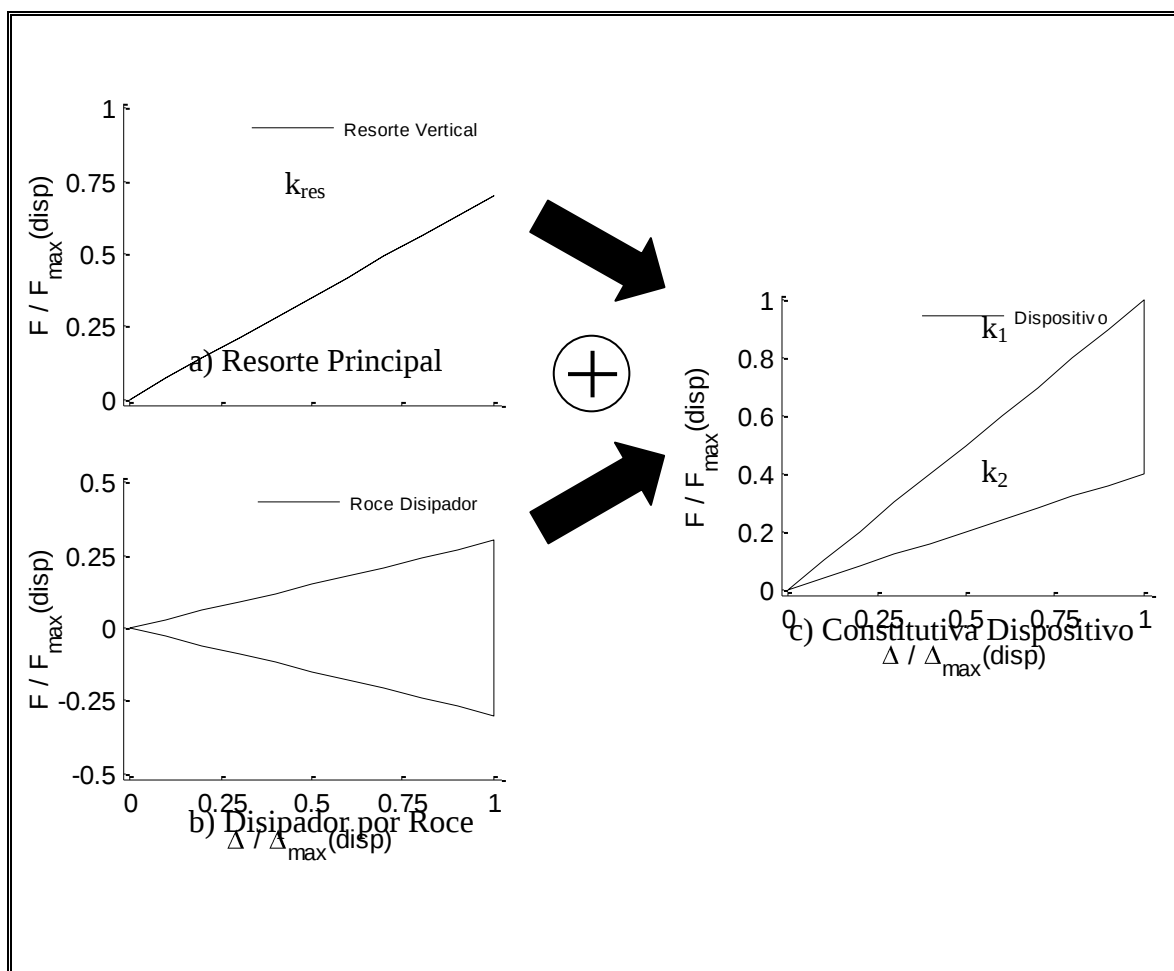


Figura 3.2-1: Esquema de las constitutivas Teóricas del Dispositivo; a) Resorte principal; b) Disipador por Roce; c) Constitutiva Dispositivo Aislador Vertical

Friccional

El funcionamiento del dispositivo es básicamente el siguiente:

- Inicio de la carga, $\Delta=0$:
 - Fuerza de Roce nula o despreciable, al deformarse o comprimirse el aislador la cuña penetra entre los elementos que la reciben, los que se separan y tensan a los resortes secundarios, aumentando la fuerza normal entre estos y la cuña, lo que produce que la fuerza de roce comience a aumentar. Fuerza positiva y en aumento.
 - Resorte toma carga proporcionalmente a la deformación. Fuerza: Positiva y en aumento.
- Cambio entre carga y comienzo descompresión:
 - Fuerza de Roce: Para deformaciones verticales muy pequeñas o nulas en dirección de tracción del dispositivo, el roce cambia de signo. Se produce un salto teóricamente discreto entre el valor máximo de la fuerza de roce, hasta el mismo valor, pero con signo contrario. Fuerza negativa con módulo igual al valor mayor experimentado en compresión o carga.
 - Resorte prácticamente no cambia la fuerza ejercida, pues las deformaciones son muy pequeñas. Fuerza: positiva.
- Descarga o descompresión del aislador:
 - Fuerza de Roce: Sentido opuesto al de la descarga, su módulo se reduce proporcionalmente al desplazamiento de la cuña. Fuerza negativa con reducción de su magnitud.
 - Resorte: En descarga lineal, por la misma rama que tomó carga. Fuerza positiva en disminución.
- Recarga, o recompresión del aislador:
 - Fuerza de Roce: Si no llega al valor nulo debido a una baja amplitud de oscilación del dispositivo, cambia abruptamente de signo para recomenzar su comportamiento en compresión. Fuerza: Positiva, de magnitud igual a la que experimentaba en descarga.

- Resorte: Siempre lineal. Fuerza positiva.

El funcionamiento del sistema completo de aislación para el estanque en estudio fue diseñado para que las cargas por peso propio del estanque y por peso del líquido contenido sitúen a los dispositivos en torno al centro de su recorrido, de esta manera se permite un rango amplio para la compresión y la descompresión del aislador en torno al punto inicial de equilibrio.

La constitutiva del dispositivo es modificable fácilmente y a un bajo costo, ya que mediante el cambio de geometría o de los materiales de componentes como la cuña o los resortes secundarios se puede cambiar la magnitud y/o la forma de la disipación de energía del mecanismo de roce, pudiendo generar, por ejemplo, una pretensión inicial. Estas modificaciones no fueron desarrolladas en este estudio, por escapar del alcance propuesto en esta investigación.

3.3 Resultados Experimentales.

Antes de fabricar los 4 aisladores para emplearlos en los ensayos dinámicos del estanque, se fabricó un prototipo, con el fin de comprobar la correspondencia entre el comportamiento teórico y el comportamiento experimental. Las principales diferencias entre el primer dispositivo y los 4 posteriores son la flexibilidad del resorte principal y la magnitud de la fuerza disipativa de roce. El prototipo fue diseñado para tener un desplazamiento máximo posible de 10 cm, lo que permitía generar un sistema de estanque completamente aislado, sin embargo las dimensiones del dispositivo resultaron mucho mayores comparado con el tamaño del estanque, lo que motivó modificar el diseño, dejando a los dispositivos finales con la mitad de la flexibilidad del prototipo, compensando este cambio con un aumento de la disipación. Una imagen del modelo de prueba se presenta en la Figura 3.3-1, donde se aprecia claramente el sistema de roce.

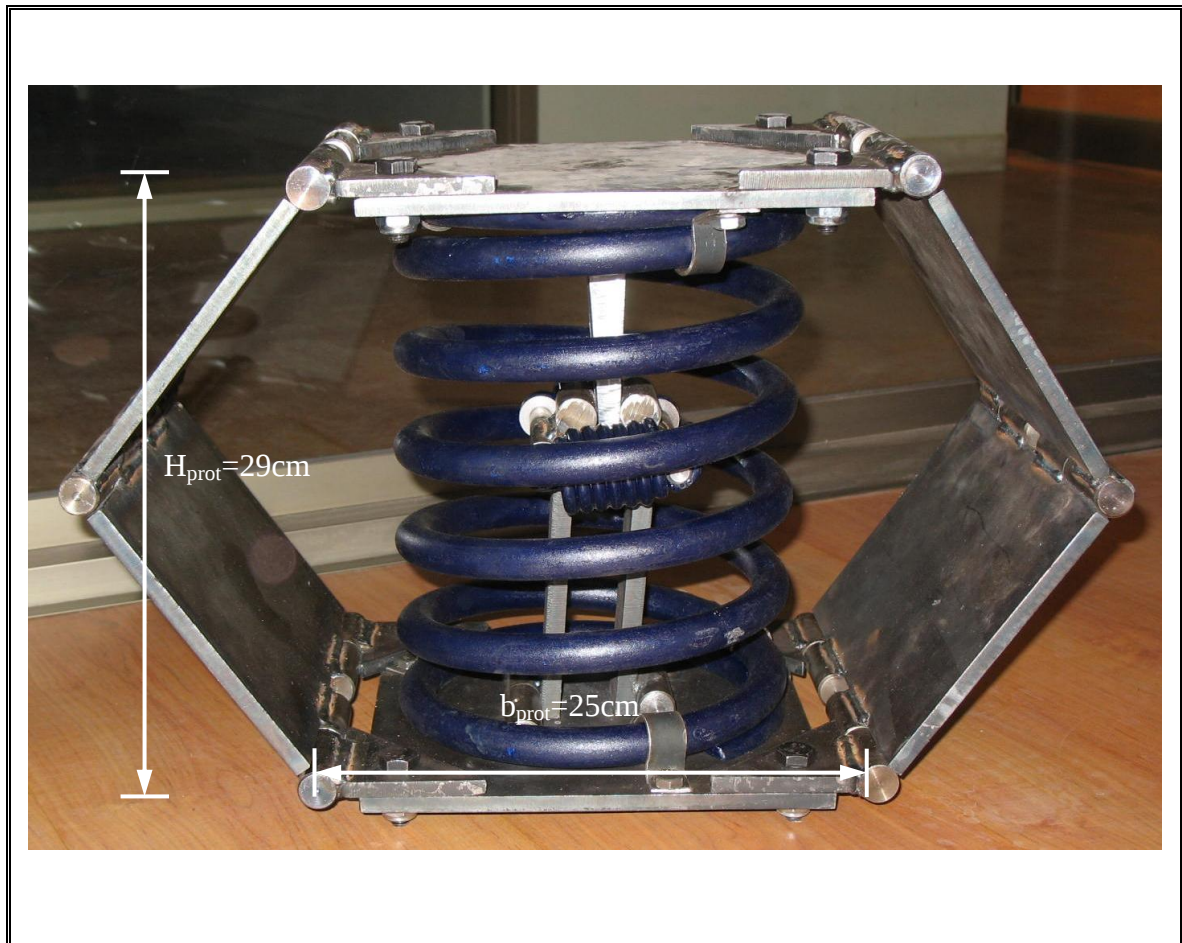


Figura 3.3-1: Prototipo Aislador Vertical Friccional

Los ensayos de los dispositivos, tanto el del prototipo como los 4 definitivos, fueron realizados en el actuador dinámico de 25 Tons del laboratorio de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la PUC, aplicando ciclos de deformación sinusoidales en torno al centro del recorrido del aislador con un ciclo por segundo. Una imagen del ensayo se muestra en la Figura 3.3.-2.



Figura 3.3-2: Ensayo Dinámico del Aislador Vertical Friccional.

La curva experimental del prototipo se presenta en la Figura 3.3-3.

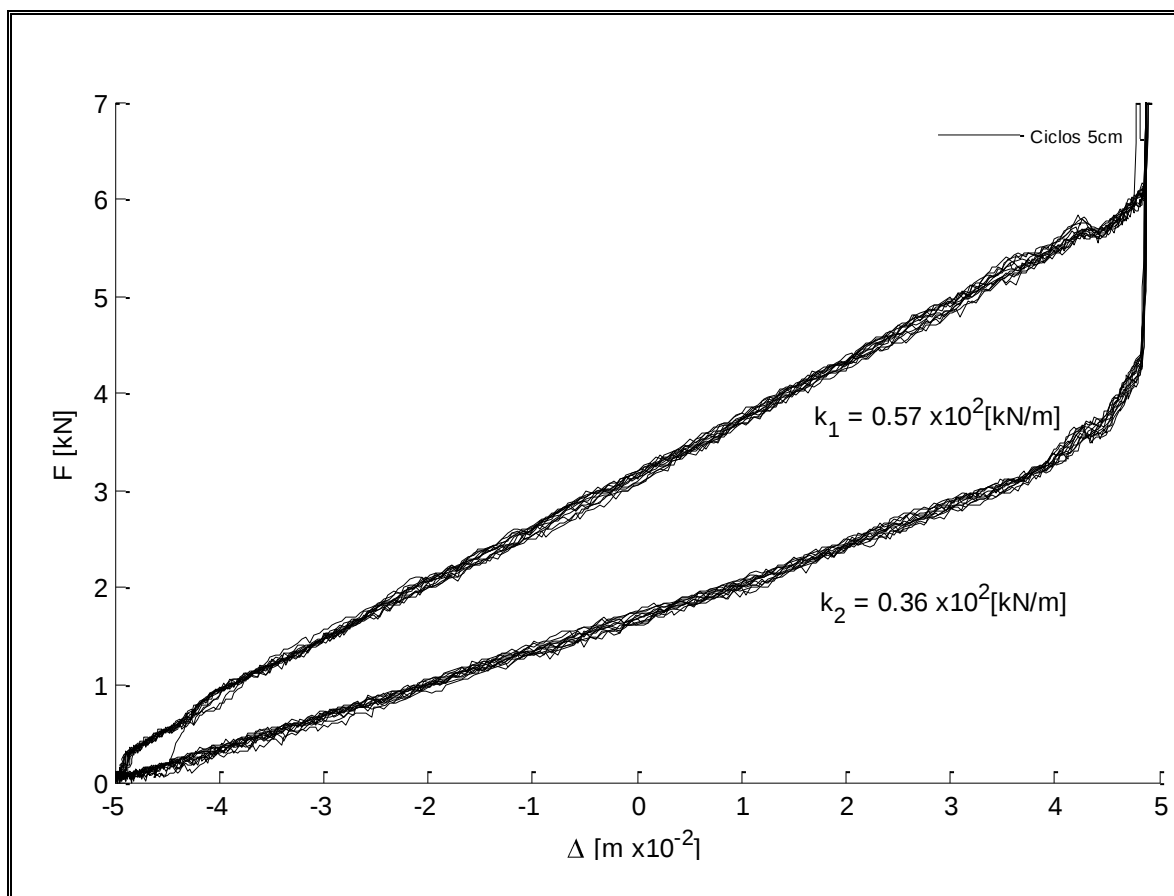


Figura 3.3-3: Ensayo Dinámico del prototipo.

En el extremo superior derecho de la figura 3.3.-3 se aprecia un brusco incremento en la fuerza, lo que es producto del impacto entre la cuña y uno de los soportes del sistema de roce, sin embargo, esto no afectó el comportamiento del dispositivo para desplazamientos menores y el problema fue reparado posteriormente. Salvo el problema de impacto, el prototipo se comportó de la manera esperada, produciendo ciclos de histéresis con forma y magnitud similares a las supuestas, lo que confirmó que el comportamiento era muy similar al teórico. El efecto del roce resultó uniforme y cercano al calculado, lo que permitió diseñar y fabricar los 4 aisladores definitivos.

Los dispositivos finales se ensayaron en la misma máquina de ensayos que el prototipo, sometiéndolos a una deformación inicial de 2.5 cm, igual a la mitad del recorrido total y aplicándoles deformaciones cíclicas para amplitudes de 1 y 2 cm. Se realizaron 32 ciclos sinusoidales para cada amplitud de desplazamiento, obteniendo de cada ensayo valores de fuerza y desplazamiento, los que se presentan y analizan en esta sección. Además de ensayar los dispositivos completos, se ensayó el resorte principal vertical, responsable de la flexibilidad del sistema, al que también se le aplicaron ciclos de deformación similares a los anteriormente detallados.

Desde la Figura 3.3-4 en adelante se presentan las curvas experimentales del comportamiento de 2 de los 4 dispositivos fabricados, donde se diferencian los ciclos según su amplitud. Para cada amplitud se analiza el comportamiento en 4 grupos diferentes de ciclos, con el fin de verificar si existe alguna tendencia de variación del comportamiento por el efecto de los ciclos previos.

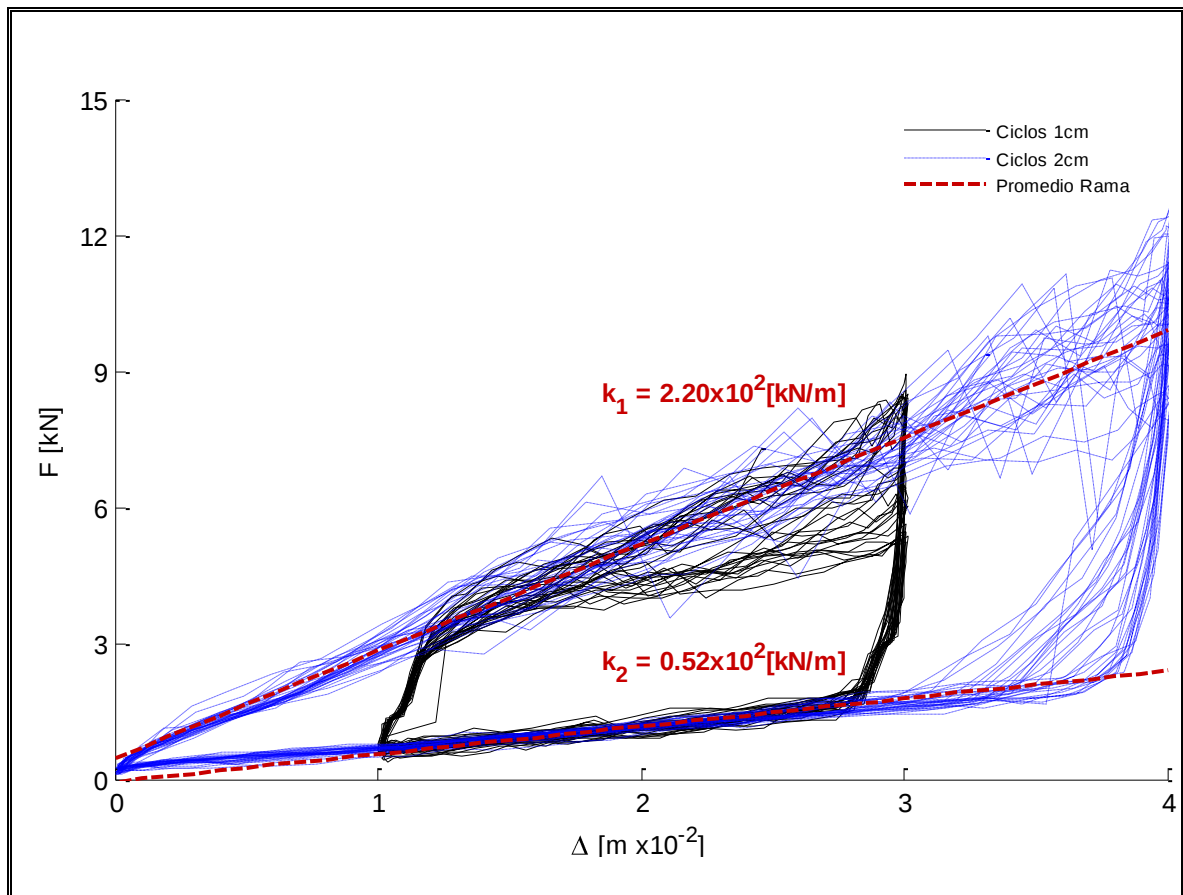


Figura 3.3-4: Constitutiva Experimental Dispositivo 1.

En la Figura 3.3-4 se presenta el comportamiento del dispositivo 1 para las dos amplitudes ensayadas.

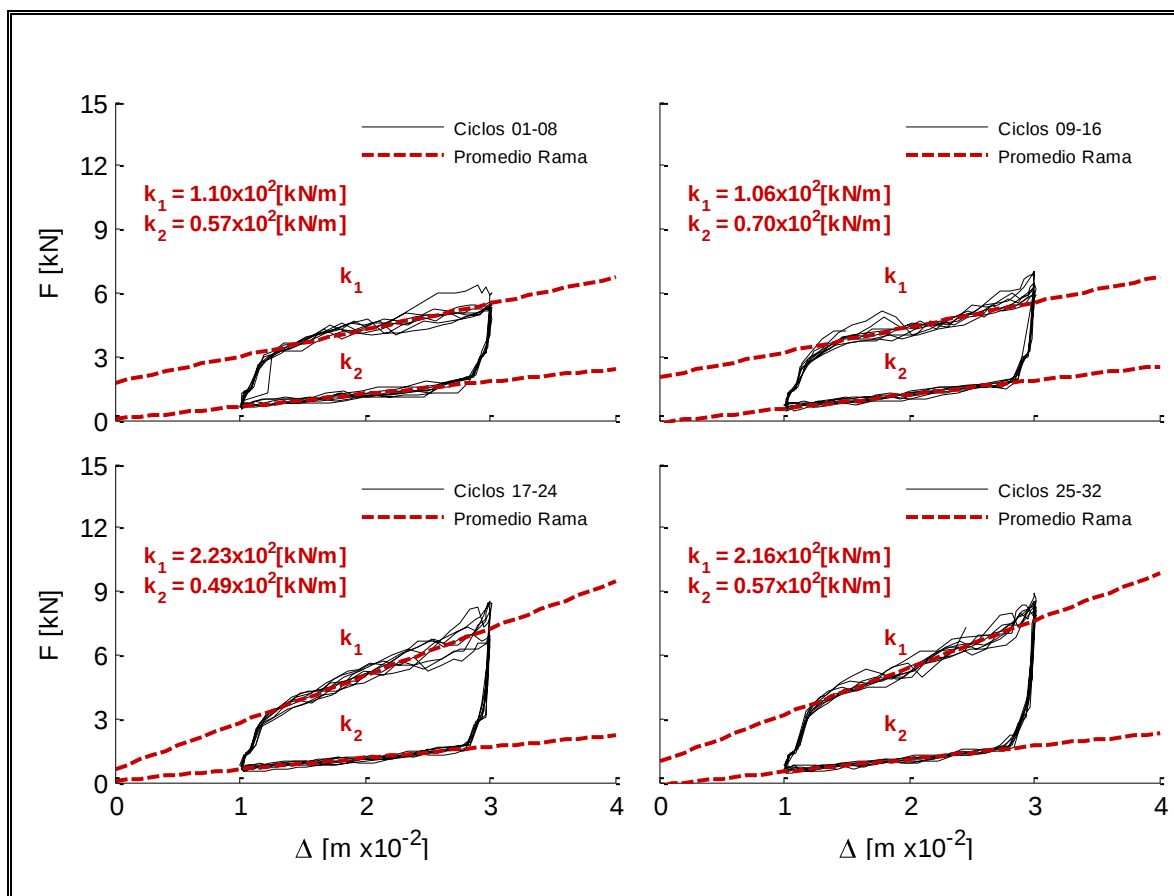


Figura 3.3-5: Constitutivas Experimentales Dispositivo 1, amplitud 1cm

Del análisis de las formas de las constitutivas y las pendientes promedio que se ilustran en la Figura 3.3-5 en cada conjunto, es claro que existe un aumento de la fuerza de roce a medida que se aplican más ciclos de deformación, lo que se puede explicar por el desgaste que sufren las piezas de roce durante la deformación cíclica, lo que cambia la superficie, ya que al examinar después de los ensayos los dispositivos y el mecanismo de roce, quedó en evidencia el desgaste tanto en la superficie de la cuña como en las barras cilíndricas, donde se encontraron ralladuras profundas e incluso una cara plana en las barras cilíndricas, lo que sin duda modifica el comportamiento del dispositivo. Las pendientes de las rectas promedio en carga y descarga se detallan más adelante, en la Tabla 3.3-1.

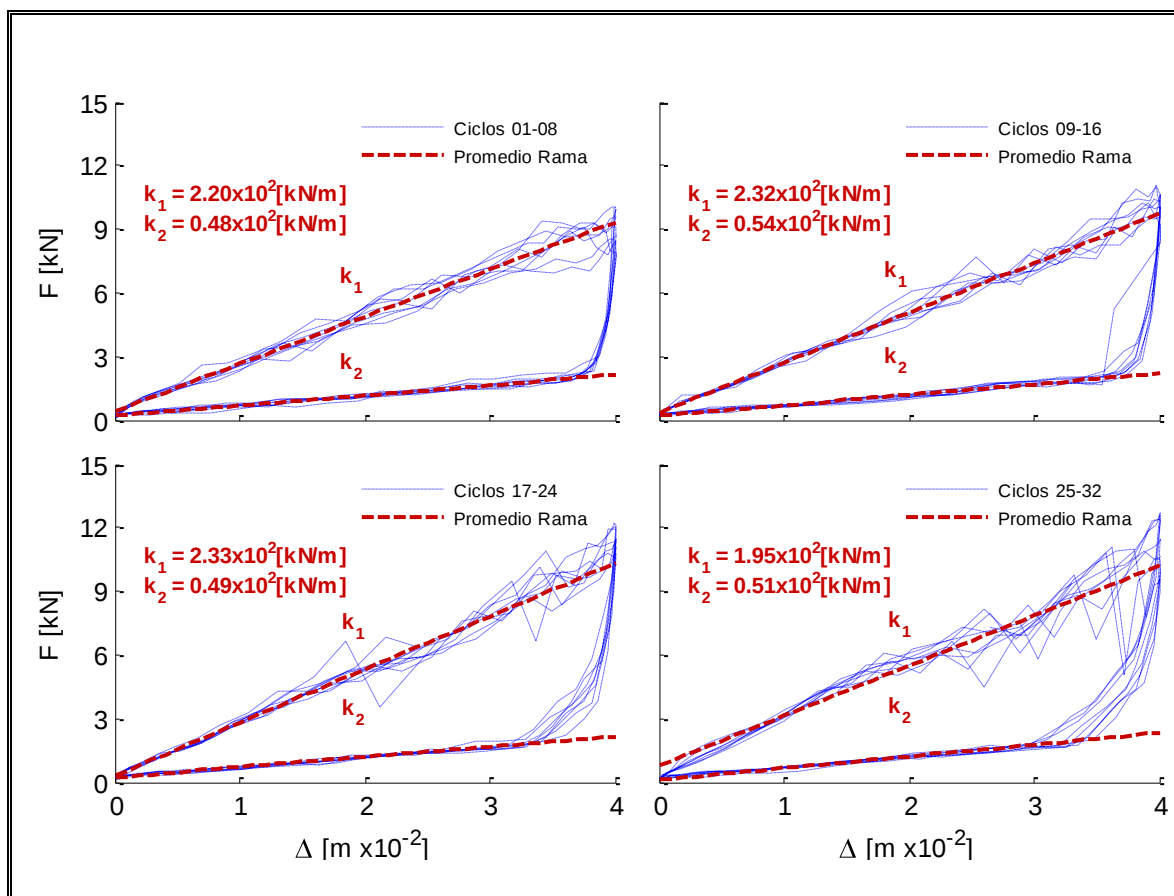


Figura 3.3-6: Constitutivas Experimentales Dispositivo 1, amplitud 2cm

De manera similar a los ciclos de 1 cm presentados anteriormente, es claro que existe variación entre los primeros ciclos (01-08), comparado con los finales, sin embargo en este caso la modificación de la curva se manifiesta en un incremento de la variabilidad de la rama de carga para los mayores desplazamientos, los que van de la mano de una mayor fuerza normal, que a su vez produce más desgaste.

Interesante es también hacer notar la suavización experimentada por la rama de transición entre la rama de carga y la de descarga, la que tiende a curvarse más disminuyendo el área encerrada en cada ciclo de histéresis, lo que no se observó para los ciclos de menor amplitud.

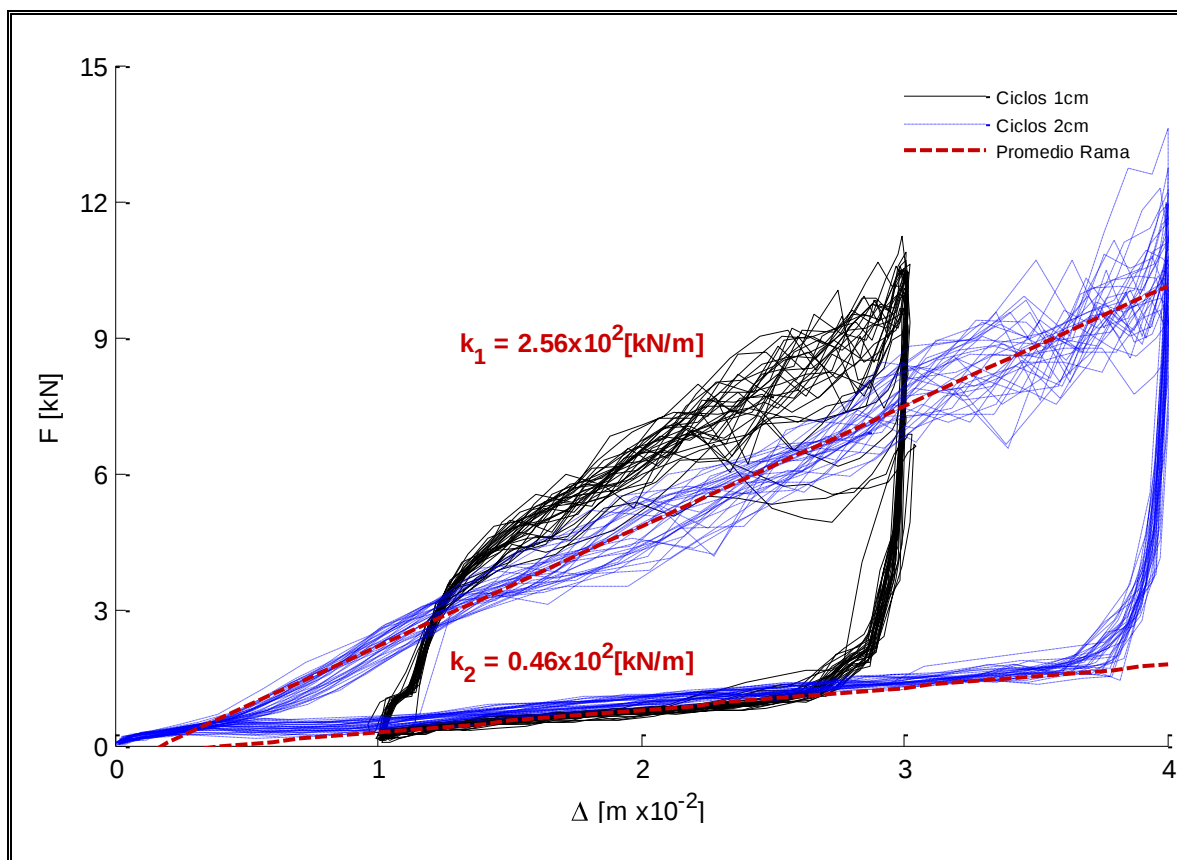


Figura 3.3-7: Constitutiva Experimental Dispositivo 2

En la constitutiva del dispositivo 2, se presentan efectos diferentes a los observados en el dispositivo 1, los ciclos de menor amplitud presentan una fuerza de roce mayor a la medida para los ciclos de mayor amplitud. La razón de esta diferencia no es clara y puede ser atribuible en primera instancia a desgastes o acomodamientos del sistema de rozamiento, atribuibles a la deformación o acomodo de alguna de las piezas del sistema de articulación de los brazos que soportan a las barras cilíndricas, el que fue encontrado con deformaciones residuales posterior al testeo de los dispositivos, lo que constituiría en una falla en el diseño, debiendo mejorarse esta zona para descartar la alteración del comportamiento del dispositivo por deficiencias en este mecanismo de soporte y rotación.

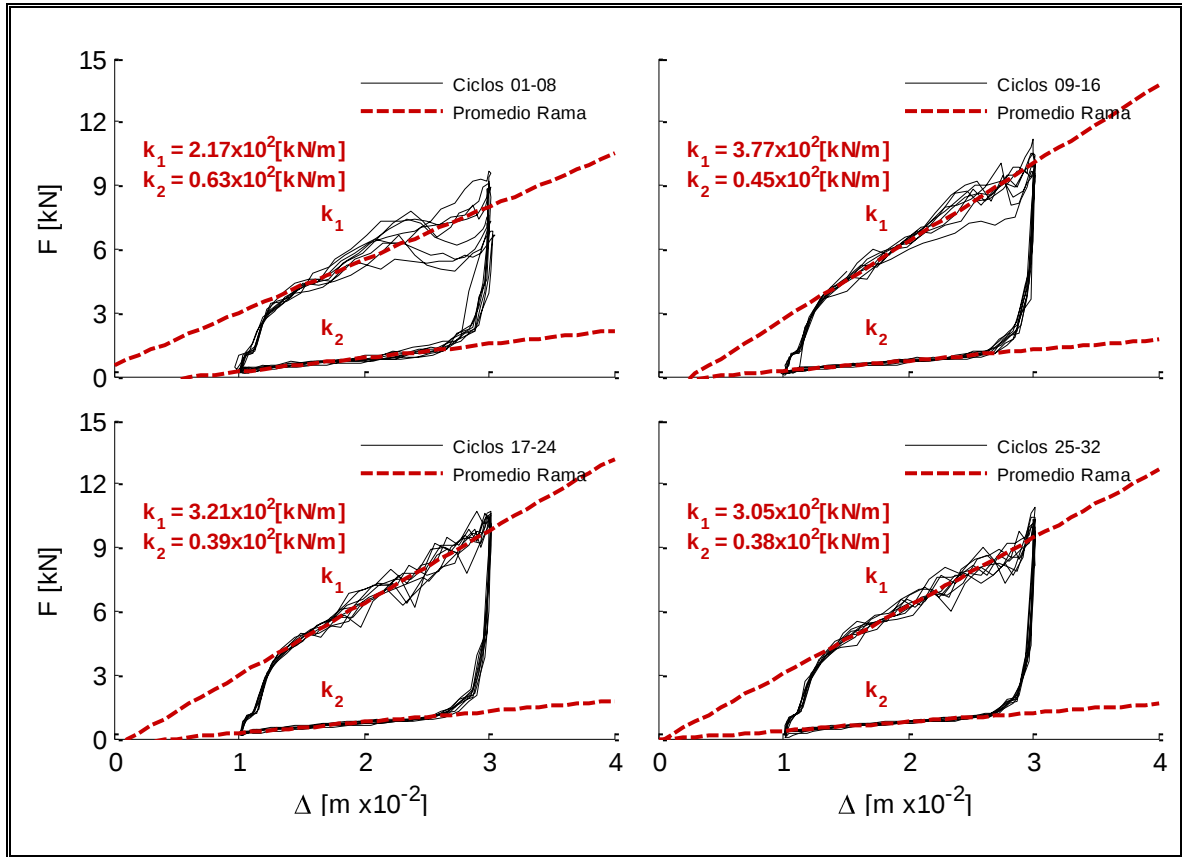


Figura 3.3-8: Constitutivas Experimentales Dispositivo 2, amplitud 1cm

Al igual que para el dispositivo 1, el cambio en las curvas de acuerdo al avance de los ciclos de deformación muestra un aumento en la rigidez de la rama de carga, pero no así en las ramas de descarga, las que permanecen prácticamente iguales. Esto deja de manifiesto una direccionalidad en la fuerza de roce entre cuña y barras, la que será discutida más adelante.

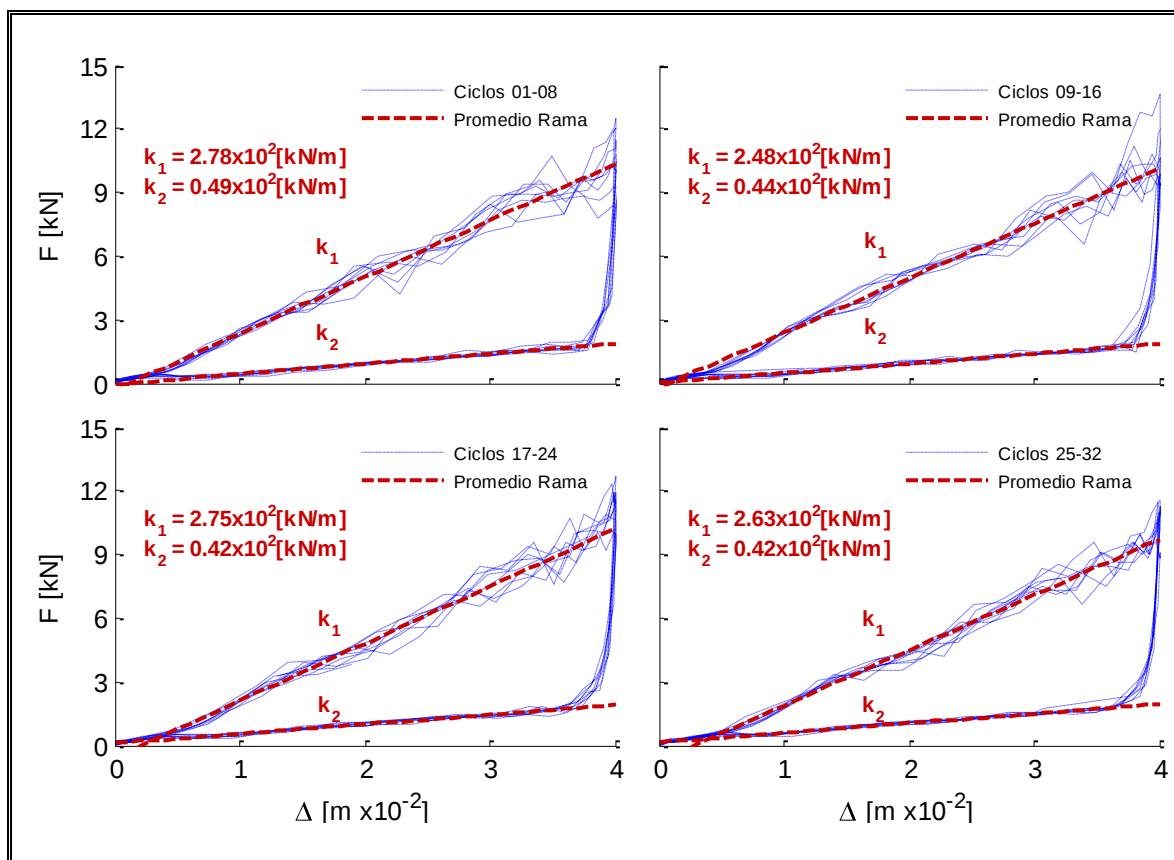


Figura 3.3-9: Constitutivas Experimentales Dispositivo 2, amplitud 2cm

Los valores de las rigideces promedio de las ramas para los dos dispositivos ensayados y para el resorte se presentan en la Tabla 3.3-1.

Tabla 3.3-1: Resumen Rigideces Dispositivo 1 y 2

	Rigidez [kN/m] x 10 ²	Dispositivo 1		Dispositivo 2	
		Carga	Descarga	Carga	Descarga
1 cm Amplitud	Ciclos 01-08	1.11	0.57	2.17	0.63
	Ciclos 09-16	1.06	0.70	3.77	0.45
	Ciclos 17-24	2.23	0.49	3.21	0.39
	Ciclos 25-32	2.16	0.57	3.05	0.38
	Promedio	1.65	0.55	2.99	0.5
2 cm Amplitud	Ciclos 01-08	2.20	0.48	2.78	0.49
	Ciclos 09-16	2.32	0.54	2.48	0.44
	Ciclos 17-24	2.33	0.49	2.75	0.42
	Ciclos 25-32	1.95	0.51	2.63	0.42
	Promedio	2.20	0.52	2.56	0.46

Para completar el set de datos, se ensayó el resorte principal, para comprobar su linealidad y conocer su rigidez, su comportamiento se presenta en la Figura 3.3-10.

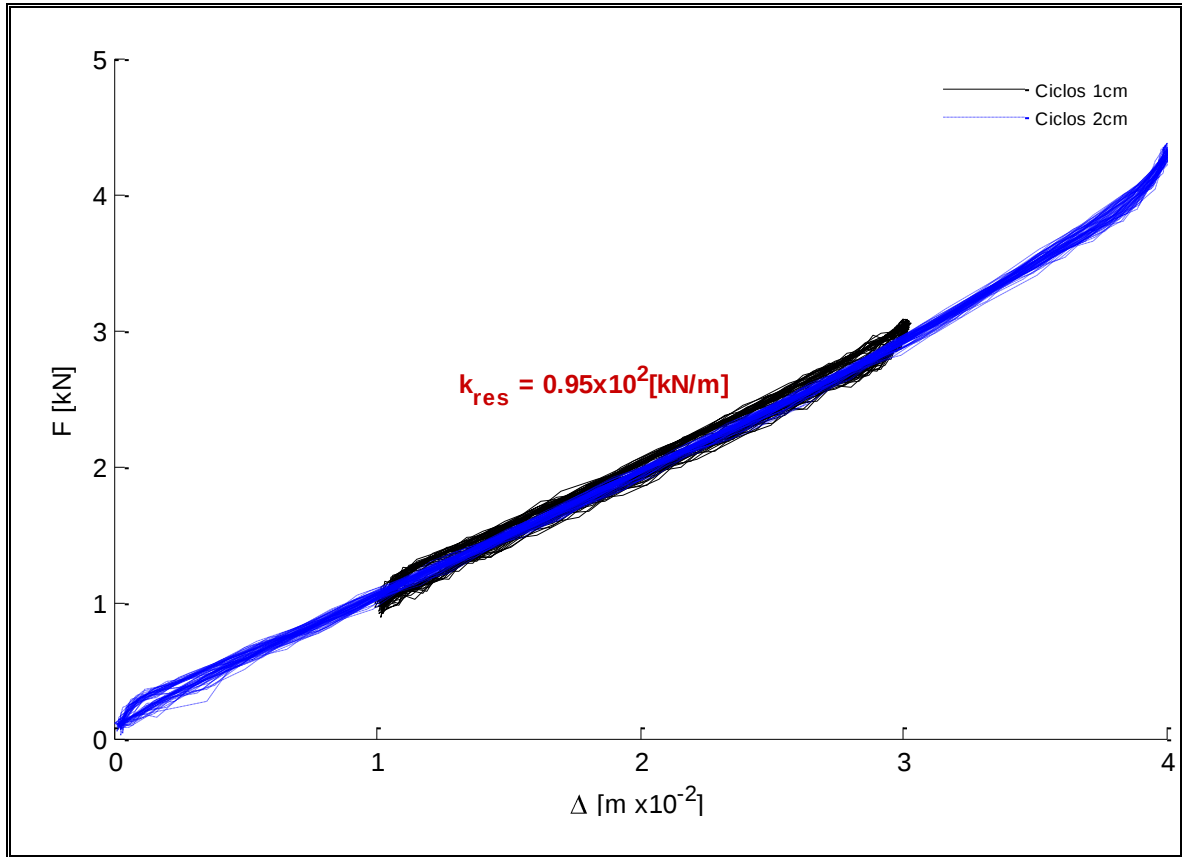


Figura 3.3-10: Constitutiva Experimental Resorte Principal.

Dado que ahora se conoce el comportamiento experimental de los dispositivos, resulta interesante compararlo con el valor teórico calculado según las ecuaciones detalladas en la sección 3.1, más particularmente, evaluaremos el comportamiento dinámico según la ecuación 3.1-e, para calcular las fuerzas dinámicas aportadas por el dispositivo de disipación:

$$F_{dis-din} = 2 * [\pm \mu_d \cdot T \cdot \cos^2(\alpha) + T \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)] \quad (3.1-e)$$

Por otra parte, la fuerza total en el dispositivo es la suma de la respuesta del resorte principal vertical (3.3-a), más la fuerza en el dispositivo (3.1-e).

$$F_{res} = K_{res} * \Delta \quad (3.3-a)$$

La fuerza total en el dispositivo se puede expresar como:

$$F_{\text{Tot-din}} = F_{\text{res}} + F_{\text{dis-din}} \quad (3.3-b)$$

Reemplazando en las ecuaciones anteriores los valores:

$$\mu_d = 0.75 \quad (3.3-c)$$

$$\alpha = 11.3^\circ \quad (3.3-d)$$

$$T = 1.80 \text{ [kN]} \quad (3.3-e)$$

$$K_{\text{res}} = 0.95e2 \text{ [kN/m]} \quad (3.3-f)$$

$$= 0.045 \text{ [m]} \quad (3.3-g)$$

Resulta:

$$F_{\text{res}} = 4.275 \text{ [kN]} \quad (3.3-h)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{dis-din}} &= 2 * (\pm 1.32 \text{ [kN]} + 0.34 \text{ [kN]}) \\ &= 3.32 \text{ [kN]} \end{aligned} \quad (3.3-i)$$

j.1)

$$= -1.96 \text{ [kN]} \quad (3.3-j)$$

j.2)

$$F_{\text{tot-din}} = 7.60 \text{ [kN]} \quad (3.3-k)$$

k.1)

$$= 2.32 \text{ [kN]} \quad (3.3-l)$$

k.2)

Donde si comparamos el valor obtenido en (3.3-k.1) para la máxima fuerza teórica a compresión con el máximo experimental (9.50 [kN]) tenemos una subestimación de la fuerza máxima a compresión de un 20%. Por otra parte, comparando el valor mínimo del

dispositivo en descarga (3.3-k.2), se aprecia que la diferencia es mínima y no supera el 5% según lo observado experimentalmente, lo que confirma la direccionalidad evidenciada en el dispositivo, y el aumento de la fuerza de roce para la compresión del sistema.

3.4 Cálculo de Parámetros equivalentes del Dispositivo

Con el objetivo de comprender mejor el comportamiento del dispositivo y poder incluirlo tanto en modelos lineales como no lineales, es que se hace necesario calcular los parámetros equivalentes de los dispositivos mediante la linearización armónica.

La linearización armónica consiste en encontrar los parámetros de rigidez y amortiguamiento equivalente que representen de la mejor manera cualquier constitutiva no lineal, calculando los parámetros de la ecuación para la fuerza equivalente, f_e :

$$f_e(t) = k_e \cdot u(t) + c_e \cdot \dot{u}(t) \quad (3.4-a)$$

donde k_e y c_e corresponden a la rigidez y el amortiguamiento equivalente respectivamente y $u(t)$ y $\dot{u}(t)$ son el desplazamiento y la velocidad del dispositivo en el instante t .

Si llamamos $f_r = f(u, \dot{u}, t)$ a la fuerza real en el dispositivo en el tiempo t y se buscan los parámetros k_e y c_e que minimizan la integral del error cuadrático entre f_r y f_e durante un ciclo sinusoidal de deformación $u(t) = u_0 \sin(\omega t)$, se puede expresar:

$$k_e = \frac{\int_0^{2\pi} f(u, \dot{u}, t) u_0 \sin(\omega t) d(\omega t)}{\pi \cdot u_0^2} \quad (3.4-b)$$

y

$$c_e = \frac{\int_0^{2\pi} f(u, \dot{u}, t) u_0 \cos(\omega t) d(\omega t)}{\pi \cdot u_0^2 \cdot \omega} = \frac{W_d}{\pi \cdot u_0^2 \cdot \omega} \quad (3.4-c)$$

En la ecuación 3.4-c W_d representa el trabajo realizado durante un ciclo completo, el que corresponde al área encerrada por las curvas de histéresis.

Para el caso de nuestro dispositivo, calcularemos las propiedades considerando que el origen de los ciclos de deformación se sitúa a una distancia u_1 del origen, valor que corresponde a la deformación inicial en servicio de los aisladores debido al peso propio y/o deformaciones residuales causadas por el sistema de roce. Esto es importante porque influye notablemente en el cálculo del amortiguamiento del sistema, ya que a pesar de tener el dispositivo una constitutiva triangular para ciclos de amplitud igual a la deformación máxima posible, la deformación inicial produce que el comportamiento del aislador sea similar a lo mostrado en las Figuras 3.3-4 y 3.3-8 para los ciclos experimentales de 1 cm de amplitud.

El desplazamiento sinusoidal impuesto será:

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t) + u_1 \quad (3.4-d)$$

en tanto que la fuerza en el dispositivo queda definida por:

$$f(t) = k_1 \cdot u(t), \text{ si } \dot{u}(t) > 0 \quad (3.4-e)$$

$$f(t) = k_2 \cdot u(t), \text{ si } \dot{u}(t) < 0 \quad (3.4-f)$$

reemplazando las tres ecuaciones anteriores en la ecuación 3.4-b, la rigidez equivalente resulta:

$$k_e = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (3.4-g)$$

resultado que coincide con lo esperado, ya que la rigidez equivalente corresponde al promedio de las rigideces de las ramas de carga (k_1) y de descarga (k_2) y es la misma que tiene un dispositivo con constitutiva triangular cuyos ciclos comienzan y terminan en el punto de carga nula.

Para calcular el amortiguamiento equivalente utilizando la ecuación 3.4-c, sólo se debe calcular el trabajo disipado durante un ciclo de amplitud u_0 en torno al desplazamiento inicial u_1 , resultando:

$$W_d = u_0 \cdot u_1 \cdot (k_1 - k_2) \quad (3.4-h)$$

resultando el amortiguamiento equivalente igual a:

$$c_e = \frac{W_d}{\pi \cdot u_0^2 \cdot \omega} = \frac{u_1 \cdot (k_1 - k_2)}{\pi \cdot u_0 \cdot \omega} \quad (3.4-i)$$

Ahora con los valores experimentales calculados en la sección anterior, se pueden calcular los parámetros equivalentes para el dispositivo. Cabe destacar que en los ensayos, la deformación inicial del sistema de aislación debido al peso propio, fue aproximadamente 2 cm, por lo que se usará este valor para el parámetro u_1 .

De la tabla 3.3-1 podemos obtener que $\bar{k}_1 = 2.38 \text{ kN} / \text{m} \cdot 10^2$ y $\bar{k}_2 = 0.49 \text{ kN} / \text{m} \cdot 10^2$, tomando los valores obtenidos para las curvas de amplitud 2 cm, ya que presentan menor dispersión. Usando estos parámetros y considerando $u_1 = 0.02$ mt. (igual a la deformación inicial observada por peso propio) y reemplazándolos en 3.4-g y 3.4-i, obtenemos $k_e = 1.44 \text{ kN} / \text{m} \cdot 10^2$ y $c_e = \frac{1.20}{u_0 \cdot \omega} \text{ kN}$, con u_0 en mt. y ω en rad/s.

A diferencia de la constitutiva triangular pura, el amortiguamiento equivalente resulta dependiente de la amplitud de la deformación.

3.5 Mejoras posibles al dispositivo

Del análisis de los resultados experimentales y tomando en cuenta el proceso de construcción de los aisladores, el principal problema detectado fue la variabilidad en la fuerza de roce y el desgaste en las piezas involucradas en el rozamiento.

En primer lugar, se deben aumentar las superficies de contacto de roce, de manera de disminuir la presión entre ellas, directa responsable del desgaste del sistema, ya que en los dispositivos fabricados el roce se produce entre una superficie cilíndrica (barras) y una cuña. Si bien es cierto, el mismo desgaste produce un aumento del área de roce, este aumento lleva consigo ralladuras y otras alteraciones en la superficie, lo que sin duda modifica la respuesta del aislador. En lugar de las barras cilíndricas, se deberían emplear patines en los que el área de contacto sea la mayor posible. La mejora en el comportamiento para menores presiones queda manifiesto en las curvas experimentales del prototipo. El dispositivo de prueba, además de tener mayor superficie de contacto (todas las piezas eran más grandes que en los 4 dispositivos finales), tenía una fuerza normal de menor magnitud, lo que se manifiesta en una fuerza de roce más uniforme y con mayor linealidad en la rama de carga.

Otra mejora posible es cambiar los materiales en fricción. Como se necesitaba un material fácilmente trabajable y con un alto coeficiente de fricción para fabricar los dispositivos, se optó por hacer rozar acero con acero ($\mu=0.5-0.8$), teniendo en cuenta las falencias en cuanto a desgaste se refiere, pero esto se aceptó ya que sólo se necesitaba emplearlos para un número limitado de ensayos. Un sistema que debe tener un mejor comportamiento sería alguno similar a los frenos ocupados en la industria automotriz, donde el rozamiento se realiza entre acero y un material más blando, que se desgasta en mayor medida que el acero, como el que compone las balatas o las pastillas de frenos, las que son hechas con metales blandos, o bien aleaciones con fibras como el kevlar. Si bien es probable que el coeficiente de roce sea menor al que se usó en los dispositivos, el comportamiento y la durabilidad debiera mejorar de manera notable.

Otro elemento del sistema de disipación a modificar, es la cuña de roce y su geometría. Este elemento es una de las piezas más costosas y laboriosas de fabricar y por su forma produce direccionalidad en el comportamiento final del dispositivo, ya que la rama de carga tiene una variabilidad enorme comparada con la observada en la de descarga. Las utilidades de usar la barra con forma de cuña, son: (1) Se genera un mecanismo auto-tensante; (2) se produce un dispositivo que trabaja aislando la estructura en múltiples condiciones de carga de manera adecuada, ya que la magnitud de la fuerza disipativa de roce varía según el desplazamiento inicial, el que a su vez depende de la carga. Es por lo anterior que se sugiere modificar la forma de la cuña, ya que se puede prescindir de ellas, o bien inventar otros mecanismos que reemplacen esas funciones anteriores, en especial la de auto-tensión. La modificación de la geometría de la pieza en cuestión, pretende optar por una geometría más sencilla, por ejemplo, plana y con la punta biselada para que ingrese de manera fácil al sistema de rozamiento y genere la tensión necesaria. Algunas de estas modificaciones serán investigadas y desarrolladas en el siguiente estudio experimental de este proyecto.

4 ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AISLADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Una vez determinadas experimentalmente las propiedades del dispositivo de aislación vertical rotacional creado, se hace necesario estudiar el comportamiento del estanque analíticamente con dispositivos de aislación y compararlo con el del sistema de base fija tradicionalmente usado.

Para realizar lo anterior se desarrolló un modelo computacional en el software comercial de elementos finitos ANSYS, programa que permite representar el comportamiento del fluido mediante una modificación de un elemento sólido estructural, tal como ya fue detallado en la sección 2.2.

En las siguientes secciones se presenta una descripción detallada del estanque empleado en este estudio y del modelo computacional desarrollado, posteriormente se desarrollan análisis estáticos, modales y de superposición espectral para el estanque, teniendo siempre como objetivo conocer las diferencias en la respuesta sísmica tanto en magnitud como en forma para el estanque con la dos condiciones de apoyo estudiadas.

4.1 Modelo real y simplificaciones consideradas

El modelo de estanque sobre el cual se realizó todo el presente estudio es un contenedor de 1 m^3 de capacidad nominal, fabricado con planchas de acero inoxidable del tipo AISI 316L de 1.5 mm de espesor. Básicamente es un cilindro de eje vertical y pared delgada, de 1 mt de diámetro y 1.25 mt de alto en el cual el extremo superior está cerrado. La cara inferior del cilindro presenta una pendiente de 2% para facilitar labores de vaciado y limpieza, en tanto que la cara superior, con forma de un cono truncado, presenta una inclinación de 22% hacia el centro del estanque. En la parte superior, sobre

la cara superior cónica, se encuentra un cilindro de 40 cm. de diámetro y 34 cm. de alto sobre el cual se encuentra la única tapa que posee el estanque. En la parte inferior, posee 4 patas fabricadas con el mismo material, las que tienen una altura de 32 cm. En la Figura 4.1-1, se presenta una fotografía del estanque.



Figura 4.1-1: Estanque empleado en Análisis y Ensayos.

El estanque no corresponde a un estanque comúnmente empleado en el mercado, sino que fue fabricado especialmente para la investigación, atendiendo a la capacidad y restricciones geométricas especificadas, sin embargo no constituye un modelo a escala, ya que fue fabricado con las planchas de menor espesor disponible. Un modelo a escala

tendría un espesor igual a un tercio a un quinto del espesor que tiene el estanque estudiado. Lo anterior dificultó bastante el trabajo, ya que debido al espesor mayor y al consecuente aumento de la rigidez producto de la estructuración y al sobredimensionamiento, las frecuencias propias del sistema se incrementaron notablemente, las que escapan de un problema típico y más aún de un análisis experimental dinámico tradicional.

Para no complejizar excesivamente el modelo computacional se adoptaron algunas simplificaciones geométricas menores que no afectan el comportamiento de la estructura completa, las que se detallan a continuación:

- a) Modelación de la tapa como un diafragma rígido con una masa concentrada.
- b) El fondo del estanque se modeló sin pendiente.
- c) Las uniones entre el fondo y el manto, entre la cara superior y el manto, y entre el cilindro superior y la cara superior se modelaron como rectas, a pesar de que en la realidad son curvas. Esta simplificación sólo afecta el estado tensional en torno a la zona, pero no es del interés de este estudio analizar esas zonas en detalle, sino más bien el comportamiento del conjunto.

4.2 Modelo de Elementos Finitos

Para estudiar el comportamiento del estanque con y sin aislación, se creó un modelo numérico tridimensional de elementos finitos en el programa comercial ANSYS. Para crear el modelo se emplearon elementos SHELL181, de tipo shell, para las diferentes secciones del manto y las patas, en tanto para las vigas de refuerzo bajo el fondo se emplearon elementos BEAM24, de tipo frame. Tal como ya se mencionó, para modelar el fluido contenido al interior del estanque, se utilizó el elemento FLUID80. A continuación en la Figura 4.2-1 se presentan dos vistas del modelo del estanque.

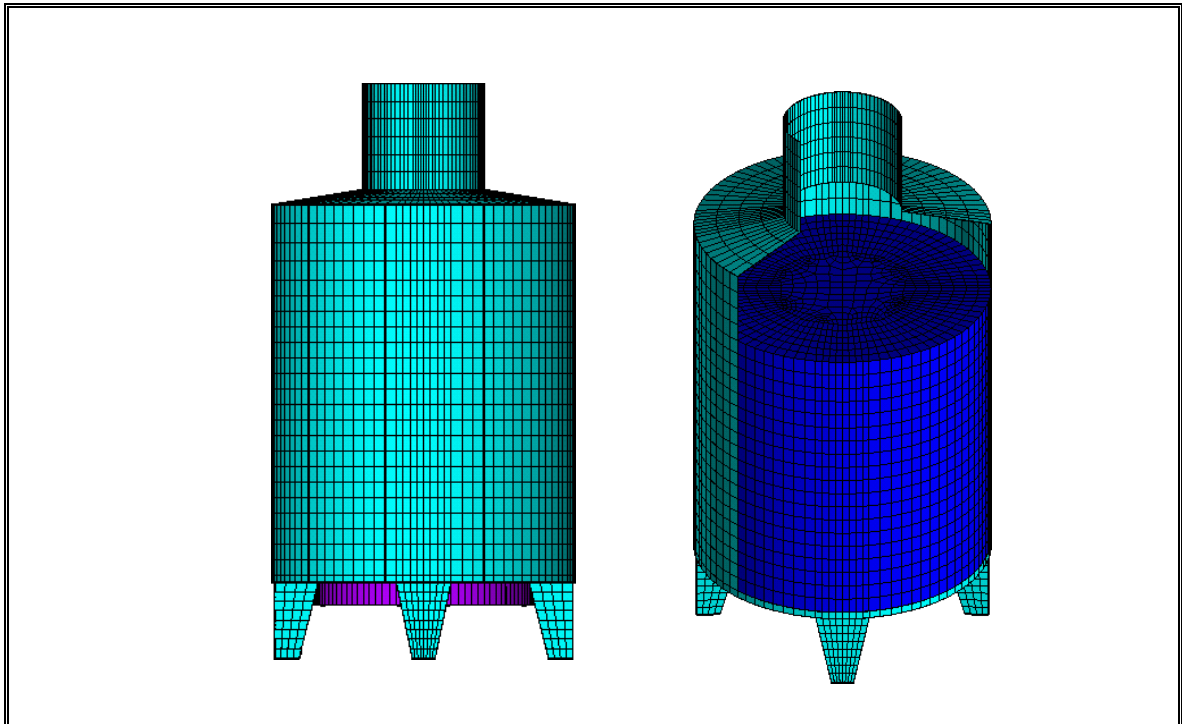


Figura 4.2-1: Modelo de Elementos Finitos, Vista Lateral y Panorámica

La estructura soportante del estanque se presenta en la Figura 4.2-2, la que consiste en una viga-anillo y 4 vigas que unen los extremos de los soportes, las que fueron modeladas como elementos tipo frame y se unieron mediante ecuaciones cinemáticas a las patas para simular la condición de unión soldada en la altura de la viga, presente en el modelo real.

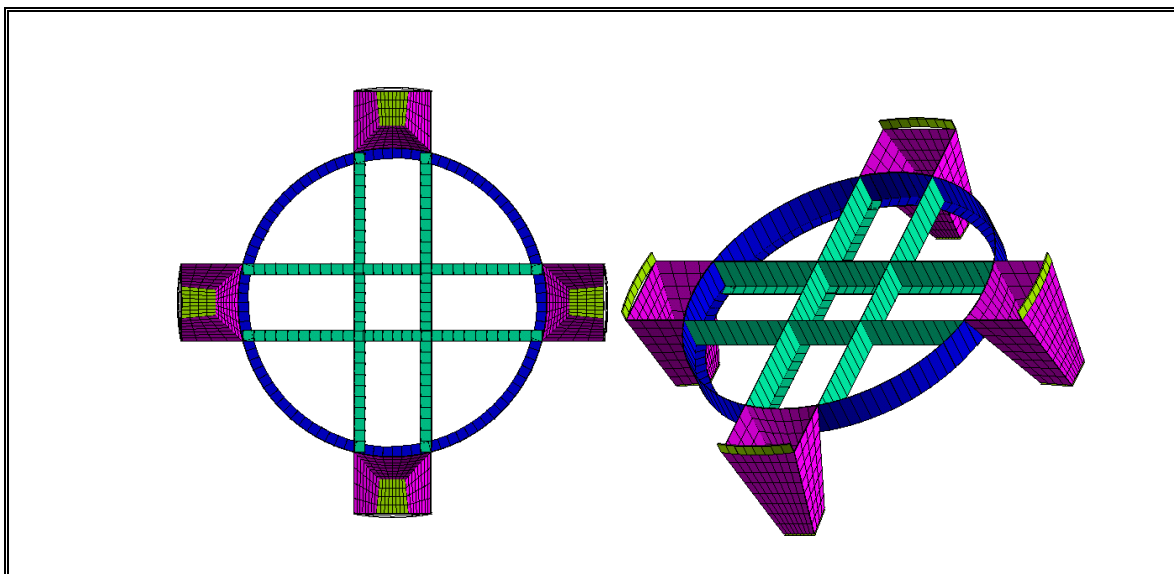


Figura 4.2-2: Detalle Estructura soportante y de refuerzo de fondo

Los grados de libertad restringidos en cada pata en el modelo de base fija son los tres desplazamientos, dejando libre las rotaciones, en cambio, para el modelo aislado, en la base de cada pata se restringieron sólo los grados de libertad tangenciales al manto, dejando libre todos los restantes, mediante lo cual se logra reproducir en el modelo el comportamiento de aislación vertical rotacional deseado y posteriormente observado experimentalmente, lo que se detalla en el siguiente capítulo.

Para incluir el efecto de la flexibilización del sistema de aislación vertical desarrollado en este estudio se modificaron las condiciones de borde en los apoyos como se detalla en el párrafo anterior y se incluyeron elementos COMBIN14, consistentes en un resorte y amortiguador en paralelo, siendo ésta la única diferencia entre el modelo aislado y el de base fija, ya que tanto el mallado como las propiedades de ambos modelos son idénticas. Para la rigidez vertical de los dispositivos de aislación se utilizó la rigidez promedio de las equivalentes calculadas en el capítulo anterior para los dos dispositivos ensayados, la que resultó ser 230 kgf/cm ó 225.4 kN/m.

Cabe hacer notar que todos los análisis desarrollados a continuación en los modelos numéricos son lineales, por lo que sus resultados constituyen valiosos datos

cualitativos del comportamiento del sistema, más que información numérica precisa, ya que la formulación empleada es lineal tanto para los materiales, los elementos, las deformaciones, como para el comportamiento de los dispositivos de disipación. El motivo principal que obligó a esta simplificación es que el elemento FLUID80 no admite comportamiento no lineal ni en su comportamiento ni en el resto del modelo, impidiendo incluir gran parte de los efectos presentes en el sistema estructural real considerado en el estudio, como no linealidades geométricas y sobre todo de comportamiento histerético de los dispositivos.

Considerando lo anterior, se realizaron análisis modales, para obtener los modos propios de vibración de la estructura estudiada y posteriormente realizar un análisis por superposición modal espectral, cuyos resultados se presentan a continuación.

4.3 Análisis Modal

En los dos modelos, base fija y aislada, se procedió a extraer los modos propios de vibración. Respecto al procedimiento de análisis modal en ANSYS, cabe destacar que para obtener los modos de vibrar de una estructura que incluye elementos FLUID80, el único método válido de extracción es el de análisis modal reducido, lo que implica que el usuario debe definir los grados de libertad que tendrá el problema, los que se denominan maestros y corresponden a los que permanecen activos posterior a la condensación estática que realiza internamente el programa antes de resolver el sistema de ecuaciones. Cabe destacar que los únicos grados de libertad que pueden ser definidos como maestros en los elementos de fluido son los perpendiculares a la superficie libre, en nuestro caso, los verticales que corresponden a la dirección Z.

Con el fin de reducir el tamaño de las matrices en el problema de obtención de valores y vectores propios y permitir que el tiempo de resolución del modelo fuera razonable, fue necesario incluir sólo los grados de libertad en la dirección X y Z como

maestros, no incluyendo ningún grado de libertad en Y. Para ambos modelos se extrajeron 1000 modos. En la Figura 4.3-1 se presentan las curvas de porcentaje de masa acumulada en las direcciones X y Z, para las cuales se consideraron sólo los modos con porcentaje de masa mayor o igual a 0.1% del total de la masa del modelo.

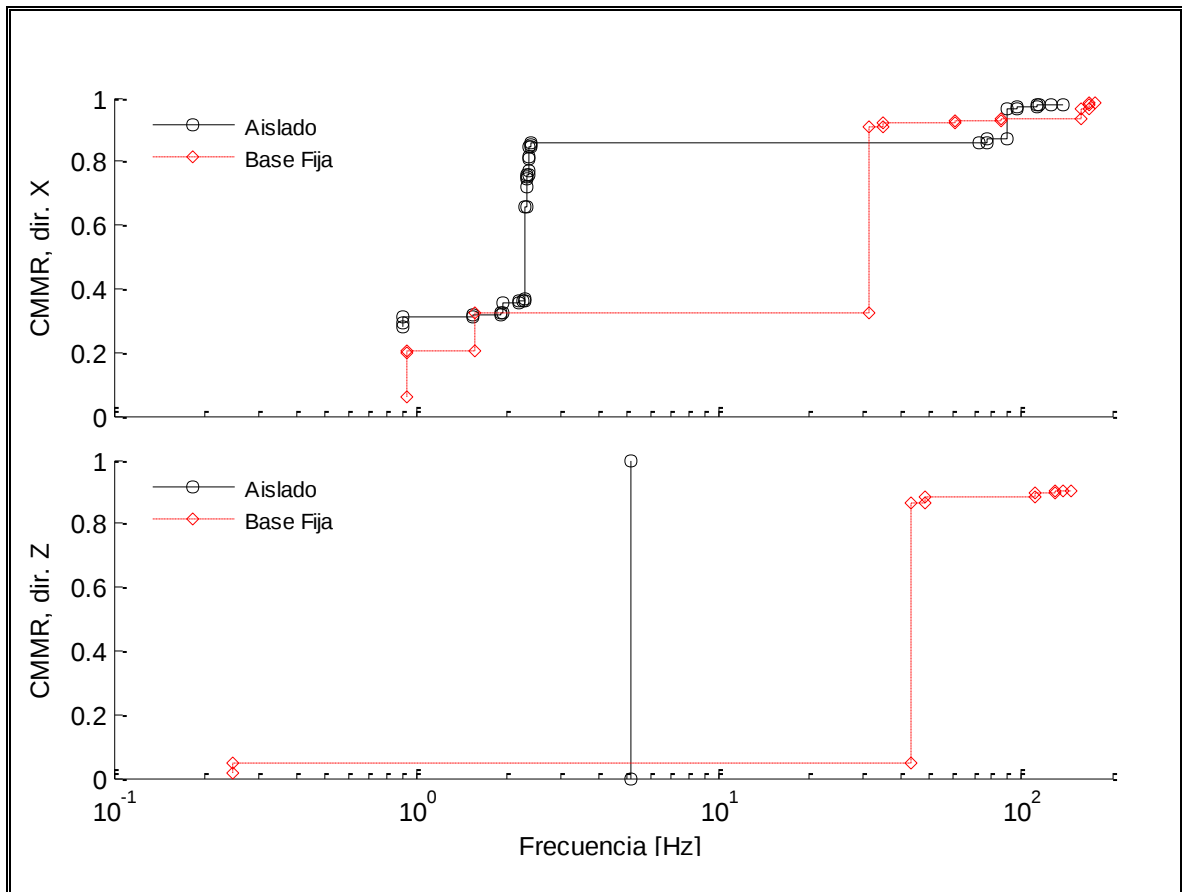


Figura 4.3-1: Comparación de Masa modal acumulada normalizada

(Cumulative Modal Mass Ratio, CMMR) en dirección X (superior) y Z (inferior),
caso base fija y aislada.

Del análisis de la Figura 4.3-1 se aprecia claramente el efecto en los modos de vibrar de la flexibilización vertical en los apoyos para ambas direcciones. Si analizamos el modelo de base aislada, el sistema tiene aproximadamente un 90% de la masa total bajo los 2.5Hz, mucho menor que los 12Hz del sistema sin flexibilización. Para el caso

vertical, el efecto es aún más dramático: además de la reducción de las frecuencias propias, la estructura pasa de ser un sistema de varios modos, a uno que tiene un solo modo de vibrar, el cual naturalmente corresponde a la oscilación rígida de la masa sobre los dispositivos.

En la Tabla 4.3-1 se detallan las propiedades dinámicas de los dos modelos desarrollados donde sólo se presentan los valores para los modos con razón de masa mayores a 2%.

Las razones de amortiguamiento detalladas en la Tabla 4.3-1 para la estructura de base fija fueron asignadas como un 2% constante para todos los modos aún reconociendo que generalmente tienen un ξ menor (0.5% generalmente), por razones de simplicidad y también porque los análisis de superposición modal espectral presentados en la siguiente sección sólo pretenden entregar una estimación cualitativa del comportamiento de la estructura aislada comparada con la de base fija. Para la estructura aislada los únicos modos que se les asignó una razón de amortiguamiento mayor al 2% corresponden a los modos laterales o verticales donde la deformación predominante es la de los dispositivos de aislación, a los que se les asignó un 10%, tomando en cuenta una proporción con respecto al ξ del modo vertical, como se explica a continuación.

Tabla 4.3-1: Propiedades Dinámicas de los modelos

Modelo	Modo #	Periodo (s)	Frecuencia (1/s)	ξ %	Masa modo / Masa Total %	
					X	Z
Base Fija	2	1.060	0.94	2.0	5.70	0.0
	3	1.060	0.94	2.0	14.07	0.0
	907	0.031	31.63	2.0	12.4	0.0
	911	0.028	35.20	2.0	58.5	0.0
	916	0.023	43.15	2.0	0.0	2.72
	917	0.020	48.23	2.0	0.0	81.94
	950	0.009	110.96	2.0	0.0	1.74
Base Aislada	2	1.10	0.90	2.0	28.2	0.0
	3	1.10	0.90	2.0	1.2	0.0
	42	0.52	2.18	2.0	3.2	0.0
	59	0.43	2.32	10.0	29.4	0.0
	60	0.43	2.32	10.0	6.0	0.0
	61	0.43	2.32	10.0	2.8	0.0
	68	0.42	2.36	10.0	4.2	0.0
	70	0.42	2.37	10.0	3.0	0.0
	945	0.01	96.32	2.0	9.2	0.0
	907	0.20	5.11	20.0	0.0	100.0

Conocido el modo vertical principal del sistema aislado, resulta simple calcular la razón de amortiguamiento equivalente ξ_e para el sistema aislado, el que se obtiene mediante la expresión para sistemas de un grado de libertad:

$$\xi_e = \frac{c_e(\omega)}{2m\omega} \quad (4.2-a)$$

reemplazando los valores de $c_e(\omega) = \frac{1.20}{u_o \cdot \omega} kN$ (calculado en la sección 3.4), $\omega = 32.04$ rad/s (correspondiente al modo vertical principal aislado con $f=5.1$ Hz), $m=217.25$ Kg (un cuarto de la masa total del estanque), para desplazamientos verticales u_o de 1 y 2 cm, resultan razones para ξ_e de 0.135 y 0.269 respectivamente, adoptando un valor promedio de 20% vertical.

El valor del amortiguamiento de 10% a los modos laterales aislados es un valor aproximado y conservador, el cual fue establecido tomando en cuenta el amortiguamiento del modo vertical aislado, basándose en los valores calculados en un estudio anterior (Cerda, 2006), donde se presentan valores de amortiguamiento vertical del orden de 2 a 5 veces el lateral, para modelos tridimensionales con aislación vertical completa y parcial, lo que justifica los valores de ξ detallados en la Tabla 4.3-1.

En la Figura 4.3-2 se presentan los modos principales para el sistema con base fija, y en la Figura 4.3-3 los modos principales para el sistema aislado, en los cuales se distingue la modificación en las formas modales debido al efecto de la flexibilización.

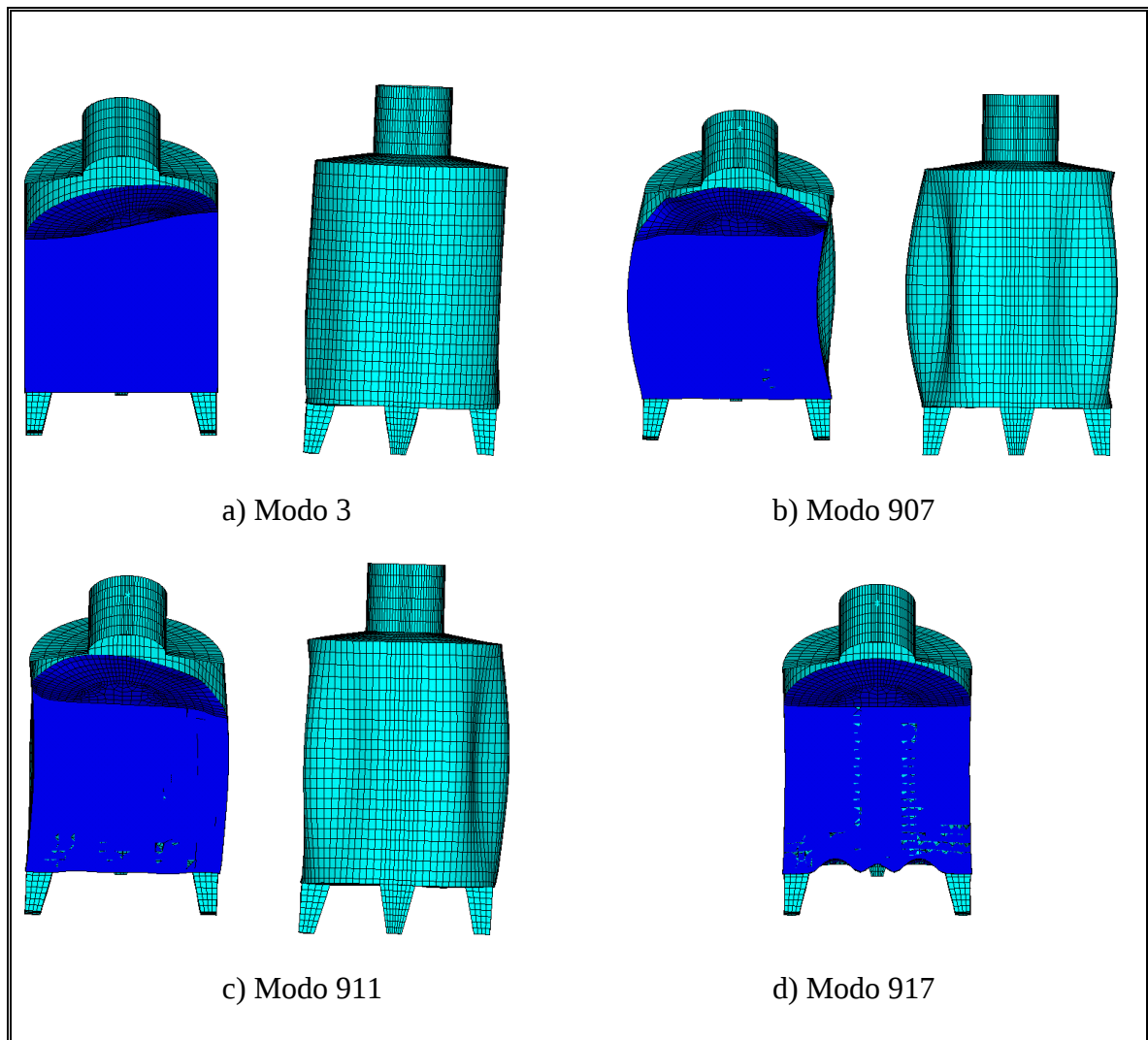


Figura 4.3-2: Formas modales Modelo Base Fija

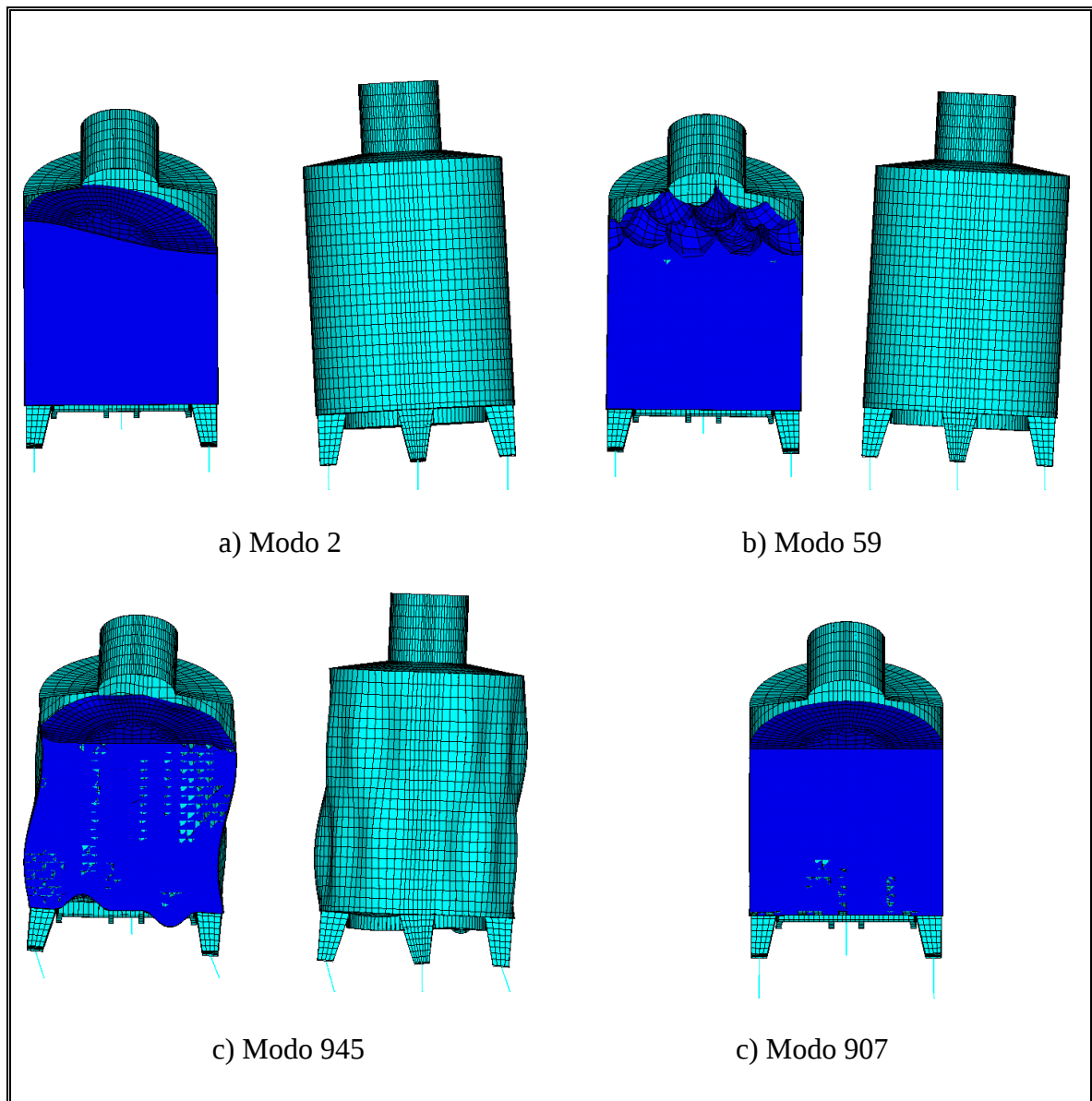


Figura 4.3-3: Formas modales Modelo Base Aislada

4.4 Análisis de Superposición Modal Espectral

Atendiendo al hecho de que el sistema de aislación vertical rotacional implantado en el estanque en estudio modifica la rigidez vertical conjuntamente con las condiciones de apoyo del mismo, el sistema aislado es un sistema resistente completamente diferente al de base fija, el cual consecuentemente modificará la magnitud, la orientación de las sollicitaciones principales y las zonas de mayor demanda de deformación.

Con el fin de conocer el comportamiento del sistema de base aislada y compararlo con el de base fija, se realizaron análisis de superposición modal espectral, obteniendo resultados que permiten conocer la modificación en la respuesta estructural del sistema aislado.

El espectro sísmico impuesto al modelo fue el definido por NCh2745 (INN, 2003), ya que dada la ausencia de normativa específica en el tema de estanques aislados fue el que se consideró más razonable y aplicable en este caso. Para ambos modelos se asignaron razones de amortiguamiento de 2% para modos no aislados y 10% para los modos donde predomina la deformación de los dispositivos, como se explicó en la sección anterior. Los espectros fueron calculados para zona sísmica 3, tipo de suelo II y $R=1$. Dado que los ensayos sísmicos realizados en el estanque se realizaron con registros escalados 4 veces en longitud ($EL=1:4$) y manteniendo la escala de aceleración constante; para ser consistente con el análisis experimental los espectros de aceleraciones se escalaron reduciendo los periodos en razón 1:2. En la Figura 4.4-1 se presentan los espectros definidos por NCh2745 con y sin escalar.

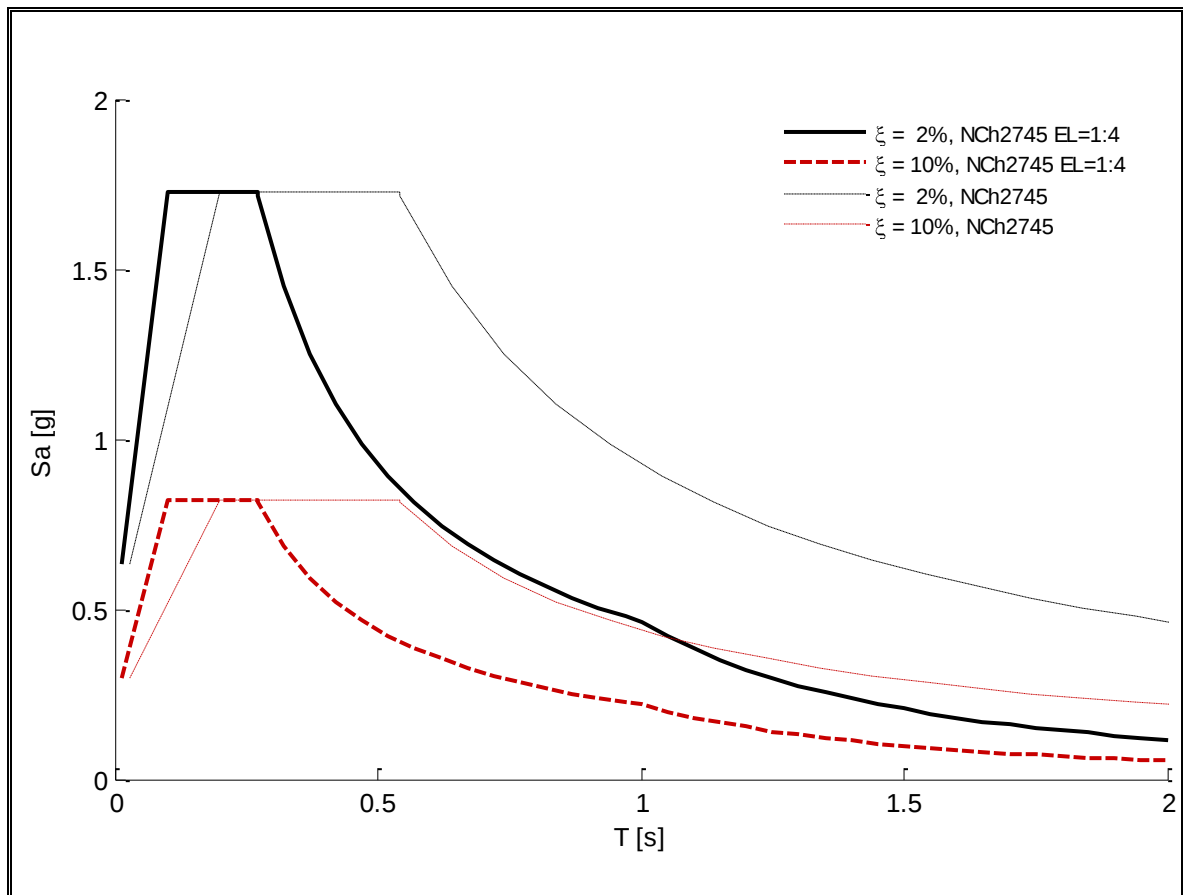


Figura 4.4-1: Espectros de Aceleraciones NCh2745

El análisis de superposición modal espectral sólo se realizó en la dirección lateral X y la combinación de la respuesta de cada modo fue mediante el método de Combinación Cuadrática Completa, conocido como CQC por su sigla en inglés. A continuación en la Tabla 4.4-1 se presentan los resultados globales de reacciones y desplazamientos para los modelos de base fija y de base aislada.

Tabla 4.4-1: Reacciones y Desplazamientos Análisis Superposición Modal Espectral

		Base Fija	Base Aislada	$\frac{\text{Base Aislada}}{\text{Base Fija}} \%$
Reacciones	V_x / W	0.55	0.31	56.4
	$M_{yy} / W \cdot R$	1.39	0.56	40.30
Desp.	$\delta_{x\text{-TECHO}} / H$	1.4 e-04	0.026	-
	$\delta_{z\text{-PATA}} / R_{\text{PATA}}$	0	0.026	-

Del análisis de la Tabla 4.4-1, se logra concluir en primer lugar que la reducción de las solicitaciones y los esfuerzos internos del estanque debería estar en el orden del 50% para el caso aislado versus el caso de base fija y en segundo lugar, que tanto los desplazamientos laterales de techo ($\delta_{x\text{-TECHO}}$) dependen directamente del desplazamiento vertical sobre los aisladores ($\delta_{z\text{-PATA}}$) ya que los valores normalizados por la altura total del estanque sin dispositivos (H) y el radio a las patas de apoyo R_{PATA} son idénticos.

Además de los valores obtenidos de desplazamiento y reacciones, resulta sumamente interesante analizar la distribución de deformaciones que experimenta el sistema de base aislada y compararlo con el de base fija. Para apreciar esto, a continuación se muestran imágenes del modelo donde se aprecian las deformaciones equivalentes de Von Mises y la deformación cortante y vertical en los elementos shells

para los dos casos estudiados, lo que en conjunto entrega un claro panorama del efecto de la flexibilización.

En primer lugar, se analizaron las deformaciones verticales promedio al centro de cada elemento shell en el manto y las patas, lo que se presenta en la Figura 4.4-2.

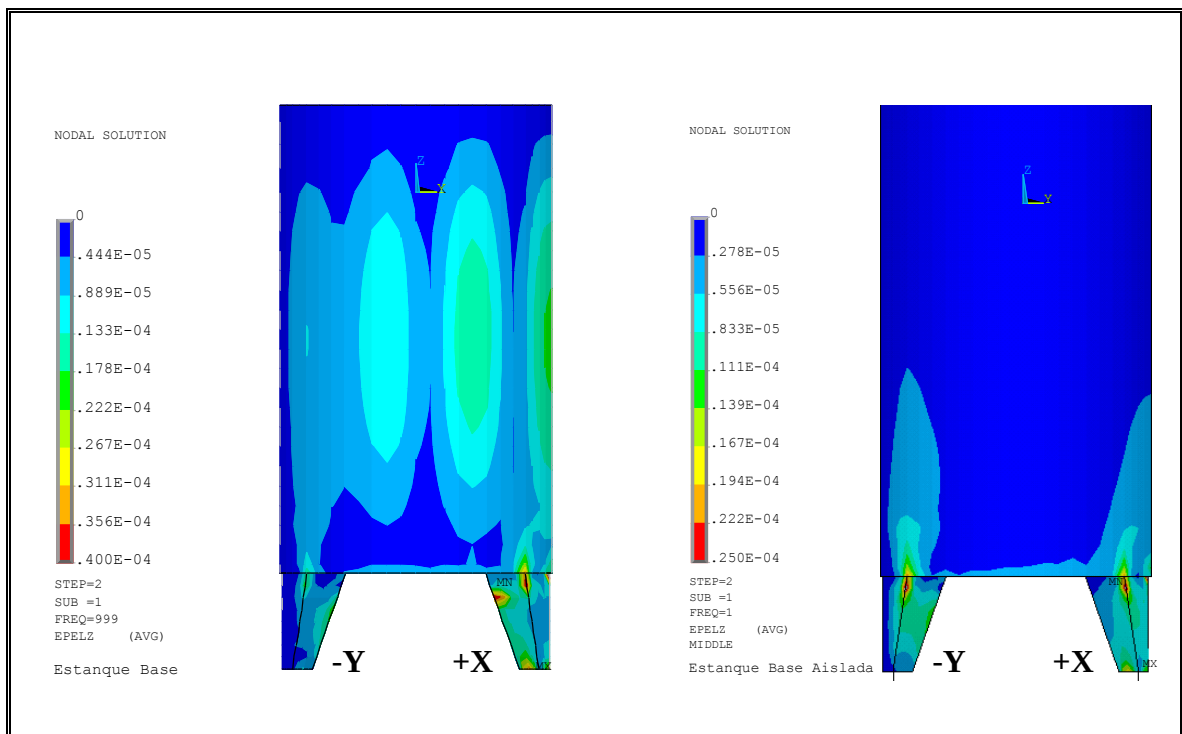


Figura 4.4-2: Deformaciones Verticales Base Fija y Aislada

Del análisis de las deformaciones verticales, se aprecia claramente la modificación en su distribución, reduciéndose notablemente las tensiones en el manto producto de la menor influencia de los modos de frecuencias superiores, los que deforman principalmente el manto. Por otra parte, la flexibilización vertical produce una distribución más uniforme de las solicitaciones verticales en el sistema, aumentando las solicitaciones de la pata perpendicular al movimiento (-Y) y disminuyendo en la de la dirección del movimiento (+X). Con respecto a las deformaciones verticales, la

reducción estimada en los valores máximos está en el orden de un 40% para la estructura aislada, con respecto a la de base fija.

Otro efecto necesario de analizar es la de la deformación de corte en el plano de los shells, la que se presenta en la Figura 4.4-3.

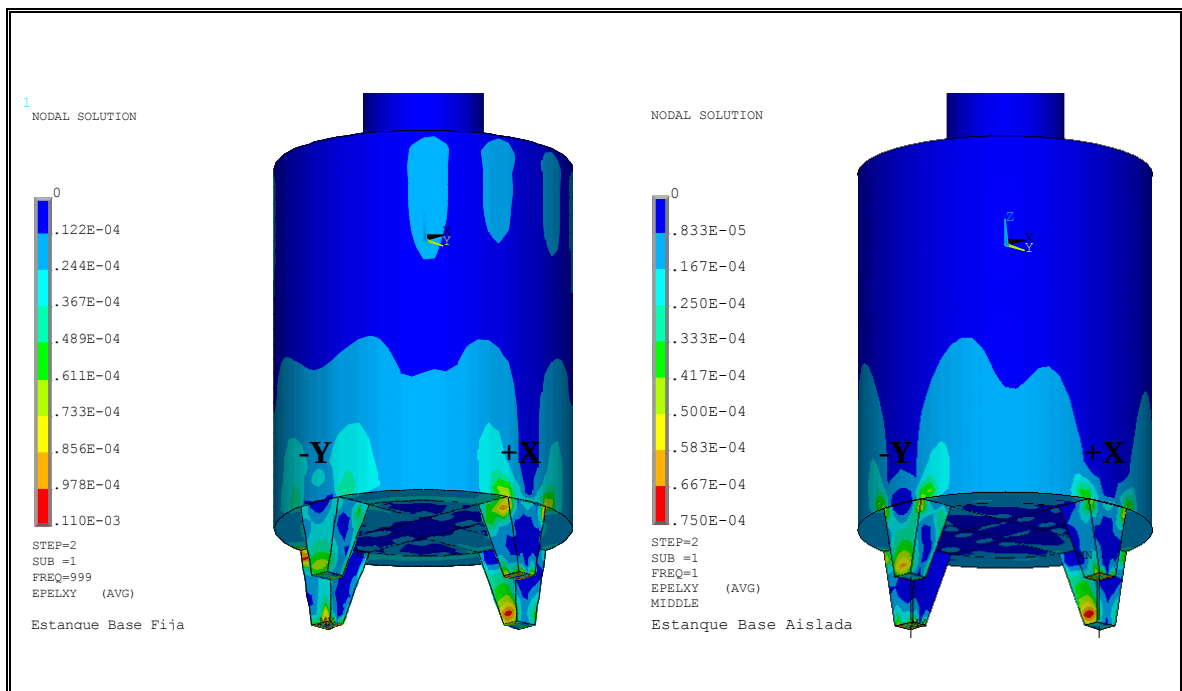


Figura 4.4-3: Deformación de Corte en Shells

Como era supuesto, el sistema de aislación concentra la demanda de deformación cortante en la pata que provee la sujeción lateral (-Y), la que tiene restringido el desplazamiento en dirección tangencial, sin embargo, el valor máximo para el estanque aislado es también menor que el demandado en el de base fija, reduciéndose en un 30% para el caso aislado versus el de base fija.

Para completar el análisis comparativo, analizaremos las deformaciones de Von Mises, las que se presentan en las Figuras 4.4-4 y 4.4-5, para base fija y aislada respectivamente, donde se presentan las deformaciones en la cara interna, externa y la

deformación media en los shells. Finalmente en la Figura 4.4-6 se presentan las deformaciones de Von Mises en el fondo del estanque.

Las deformaciones de Von Mises presentan diferencias en ambos modelos según la cara del shell donde se evalúan, sin embargo esta diferencia es mucho mayor en el caso de base fija, lo que permite afirmar que existe una sollicitación a flexión en el manto importante comparativamente con el sistema de base aislada. Con respecto a la magnitud de las sollicitaciones, la reducción de las deformaciones máximas para el sistema aislado es aproximadamente de 30% con respecto al sistema de base fija.

En el caso del fondo, las deformaciones de Von Mises muestran una concentración en torno a la pata que provee la sujeción lateral (región inferior en el gráfico), y cuyo valor máximo es menor que el máximo para el caso base fija, presentando una reducción en torno al 40% en el modelo aislado con respecto al caso base fija.

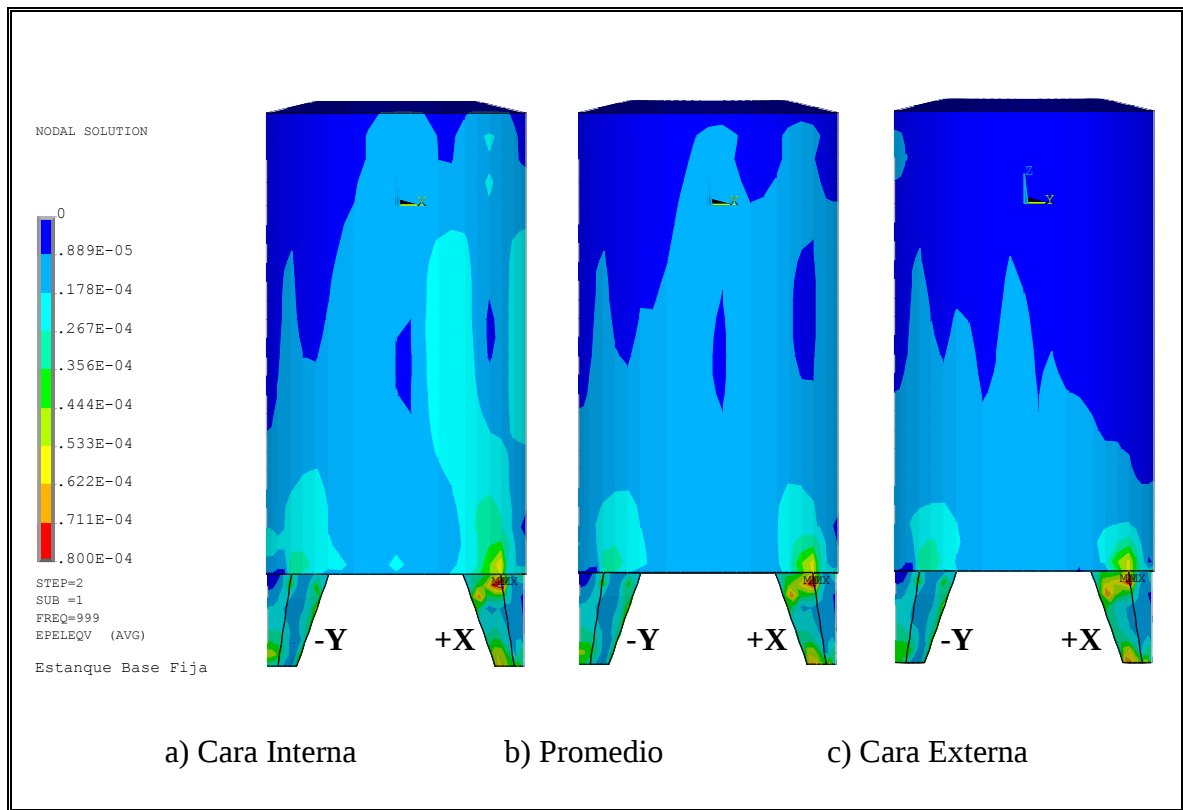


Figura 4.4-4: Deformaciones Equivalentes (Von Misses) Modelo Estanque

Base Fija

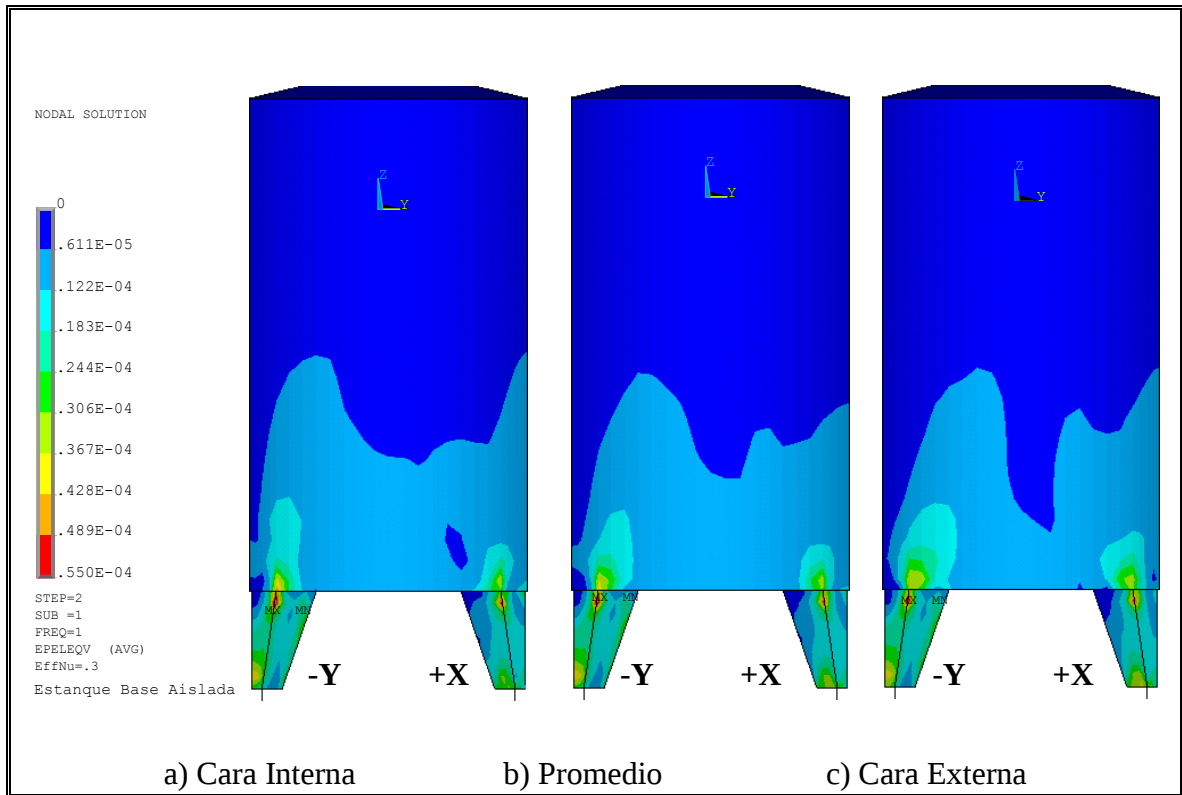


Figura 4.4-5: Deformaciones equivalentes (Von Misses) Modelo Estanque

Base Aislada

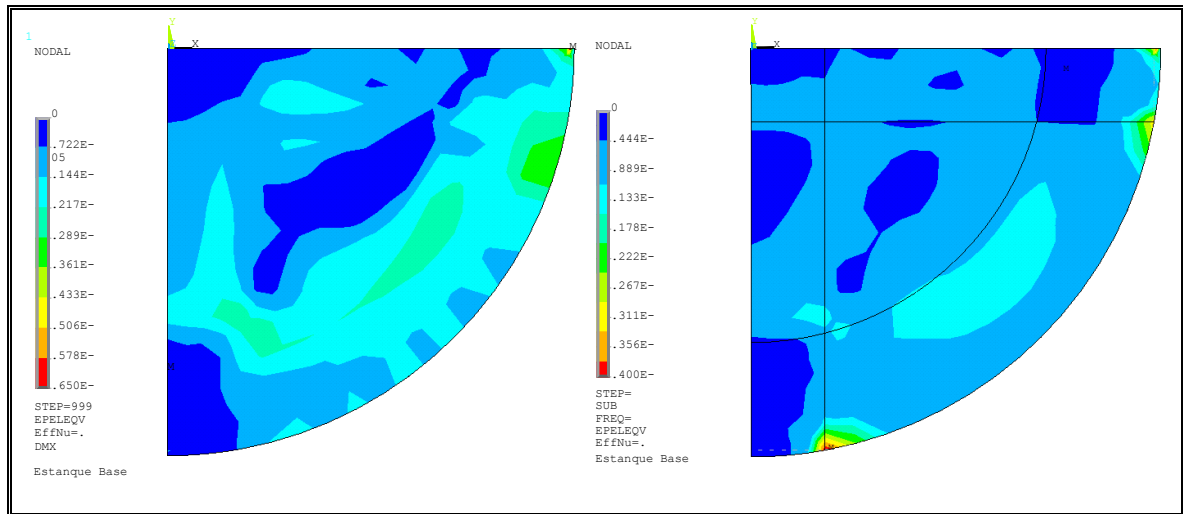


Figura 4.4-6: Deformaciones Equivalentes (Von Misses) Fondo Estanque,
Caso Base Fija y Aislada.

5 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AISLADO

Para conocer el verdadero comportamiento del sistema aislado y sus mejoras frente al sistema de base fija, se realizaron ensayos dinámicos del estanque con y sin dispositivos de aislación. Los ensayos realizados comprendieron ensayos de ruido blanco, sinusoidales y de registros sísmicos.

La fase experimental comprendió dos etapas, ensayos 3D y ensayos 1D, ambas fueron realizadas en diferentes mesas vibradoras existentes en el laboratorio del departamento de Ingeniería Estructural de la PUC. En todos los experimentos se adquirieron señales de aceleración, deformaciones unitarias en el estanque y presiones en el fluido. Cada una de las señales anteriores era adquirida y procesada por un sistema de adquisición de datos diferente, por lo que para cada ensayo fue necesaria la manipulación de tres computadores simultáneamente, además del computador que enviaba la señal al sistema de actuadores.

La descripción y los resultados de ambas etapas se presentan en las siguientes secciones.

5.1 Ensayos en Mesa 3D

Los ensayos 3D fueron realizados en una mesa MOOG 6DOF2000, con capacidad de levante vertical de 1000Kg. En esta mesa se realizaron ensayos del estanque con y sin dispositivos de aislación, para señales sinusoidales verticales, de ruido blanco en el plano y para registros sísmicos escalados 1:4 en desplazamientos con diferentes niveles de aceleración para controlar la intensidad del movimiento.

5.1.1 Montaje e Instrumentación Ensayos en Mesa 3D

Para los ensayos se montó el estanque vacío sobre la mesa MOOG, con o sin aisladores dependiendo del ensayo y se agregó el fluido en su interior (agua). En los ensayos se adquirieron aceleraciones, desplazamientos verticales en los aisladores, deformaciones del material mediante strain gauges y sensores de presión de agua. Una imagen del montaje del ensayo de base aislada se presenta en la Figura 5.1-1, donde además se indican los datos adquiridos y la zona donde se registraron.

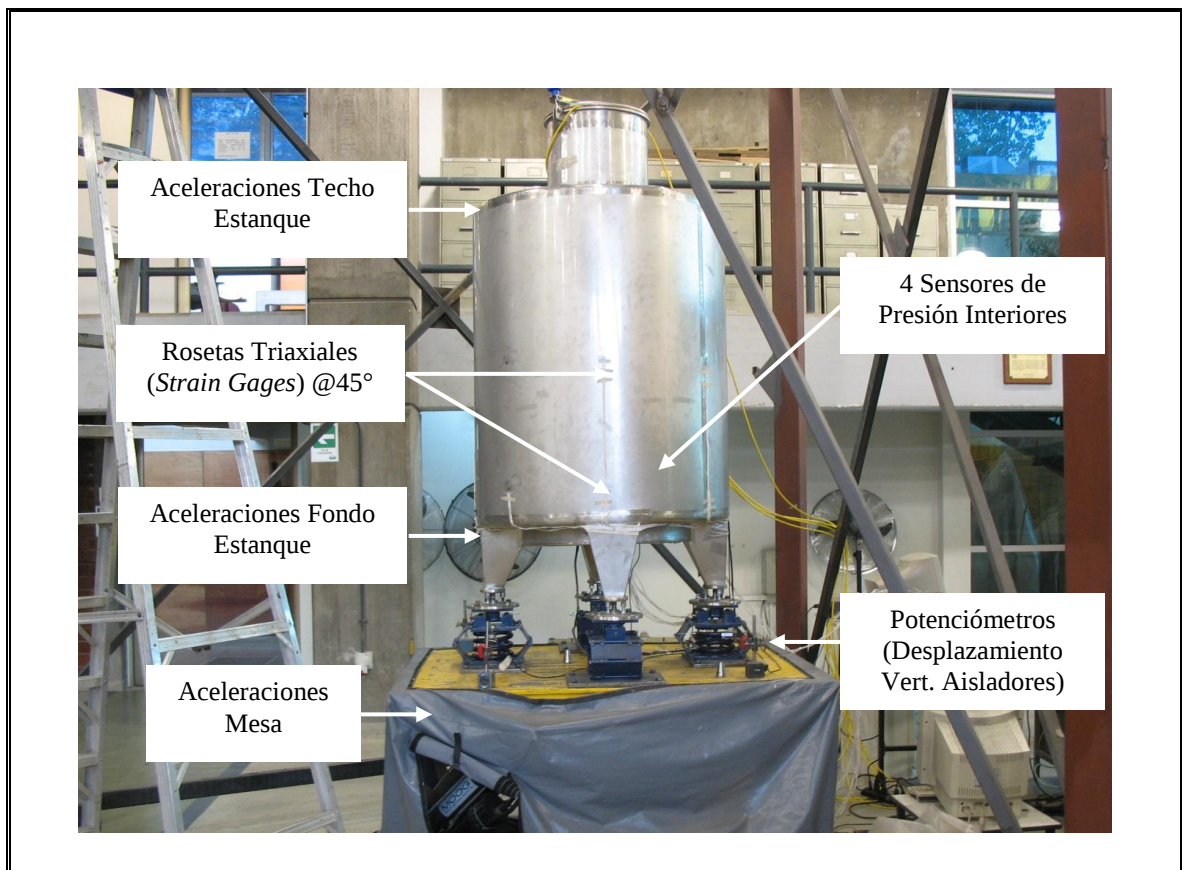


Figura 5.1-1: Montaje Ensayo Estanque Base Aislada mesa MOOG.

Los sensores utilizados en los ensayos fueron:

- Acelerómetros: 8 para registrar las aceleraciones de la mesa, 5 para las aceleraciones en el fondo del estanque y 3 para las aceleraciones en el techo del estanque.
- Potenciómetros de cable: 4 en total, uno para cada aislador, miden desplazamiento vertical relativo entre zona inferior y superior de los aisladores.
- Sensores de presión de agua: 4 en total, cada uno ubicado sobre una pata diferente, a 12 cm sobre el fondo del estanque.
- *Strain gages*: 16 rosetas triaxiales en 45°, ubicadas cada 45° en dos niveles, sobre el manto, a 10 cm del fondo y a 60 cm sobre el fondo.

Imágenes de la instrumentación para los ensayos aislados 3D se presentan en la Figura 5.1-2.

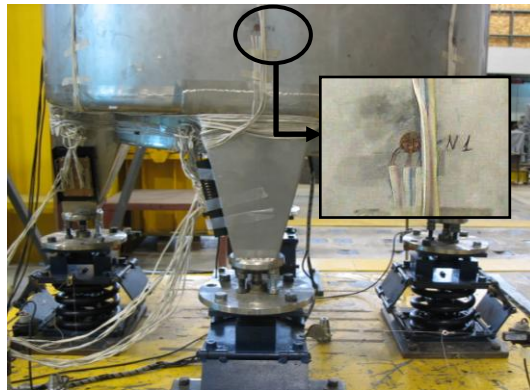
Para la adquisición de las señales, las aceleraciones y los desplazamientos ocupan el mismo sistema de adquisición (SAD), las presiones son procesadas en otro SAD exclusivo para las presiones y los *strain gages* ocupan un SAD dinámico de *strain gages*, el cual se fabricó especialmente para el proyecto del cual este estudio es parte. El SAD para *strain gages* se compone de 64 canales de adquisición, cada uno de los cuales es un puente de Wheatstone con posibilidad de instalar entre 1 y 4 *strain gages* por canal según sea la configuración deseada. El SAD permite una frecuencia de muestreo de hasta 7000 Hz. en el caso en que se muestrea un solo canal. El sistema para *strain gages* se presenta en la Figura 5.1-3, junto con los SAD's de presiones y aceleraciones.



a) Potenciómetros de Desplazamiento



b) Acelerómetros en Fondo Estanque

c) *Strain Gages* en manto

d) Sensores Presión Estanque

Figura 5.1-3 : Sistemas de Adquisición de Datos (SAD)

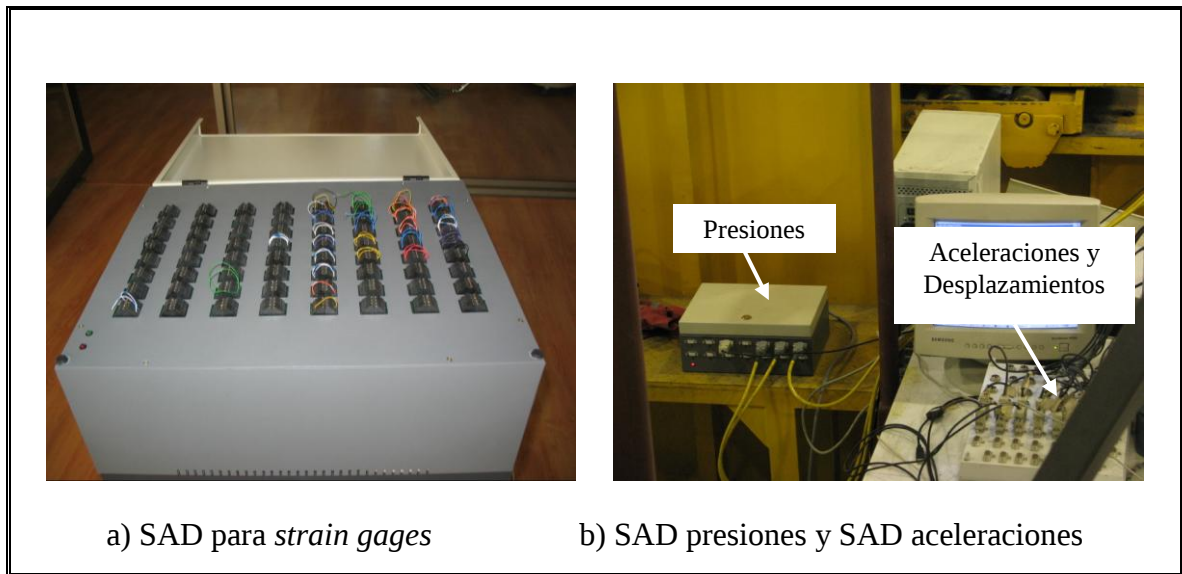


Figura 5.1-2: Sistemas de Adquisición de Datos (SAD)

5.1.2 Resultados Ensayos en Mesa 3D

El objetivo principal de estos ensayos era comparar la respuesta del sistema aislado con la respuesta del sistema sin aislar para la misma excitación basal y obtener factores de reducción para las respuestas medidas. Como objetivos secundarios también se contemplaban obtener la identificación del sistema para la estructura de base fija y de base aislada y desde luego estudiar cualitativamente el comportamiento del mecanismo de aislación ante solicitudes con componentes en las tres direcciones de movimiento.

Por problemas de capacidad de la mesa por la masa del estanque y por acople de frecuencias propias de los sistemas de base fija y de base aislada similares a las de la mesa, la serie de ensayos 3D realizada sólo permitió el estudio cualitativo del comportamiento del sistema de aislación ya que la mesa no fue capaz de reproducir la

misma señal para el modelo de base aislada y para el de base fija, generando excitaciones basales diferentes tanto en la magnitud como en el contenido de frecuencias para ambos casos.

5.1.2.1 Ensayos Verticales Sinusoidales

Con el fin de conocer el modo de vibrar de la estructura aislada en dirección vertical, se impusieron desplazamientos sinusoidales verticales con frecuencias cercanas a la teórica de 3.4 Hz para el sistema despreciando el efecto del roce en los dispositivos de aislación. Se realizaron múltiples ensayos, cada uno con 3 series de senos de diferentes frecuencias, en el caso que se presenta, las frecuencias de las excitaciones fueron de 2.5 3.15 y 3.7 Hz. Las señales de la mesa (excitación) y la respuesta en el fondo del estanque en el tiempo y el dominio de la frecuencia se presentan en la Figura 5.1.2.1-1.

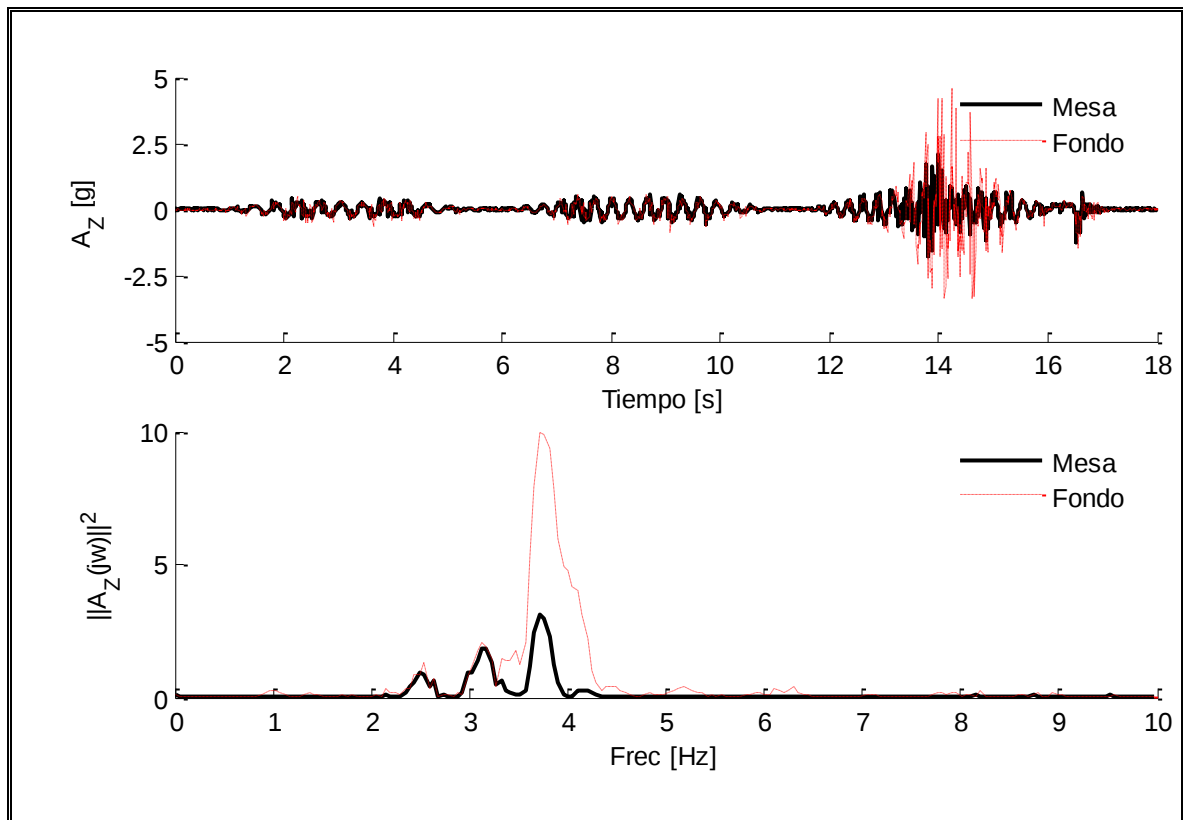


Figura 5.1.2.1-1: Ensayos Verticales Sinusoidales

Para la excitación de frecuencia 3.7 Hz se produjo resonancia, lo que se constató en el momento del ensayo y verificándose también en la Figura 5.1.2.1-1, lo que produjo una excesiva deformación vertical, produciendo un bloqueo en uno de los aisladores por exceder el desplazamiento máximo a tracción admisible. Una imagen de esta falla se muestra en la Figura 5.1.2.1-2. La frecuencia de 3.7 Hz es bastante cercana a la frecuencia propia calculada con la masa del sistema y la rigidez de los resortes helicoidales principales de los aisladores (3.4 Hz), sin embargo, en el cap. 4 el valor calculado con la rigidez equivalente de los aisladores obtenido de los ensayos a los dispositivos es de 5.1 Hz. Una posible justificación para esta diferencia puede ser el desgaste que experimentaron los aisladores, ya que los ensayos a los dispositivos fueron

realizados después de todas las series de ensayos 3D, en cambio el ensayo descrito en esta sección se realizó con los dispositivos con muy poco uso, lo que refuerza la idea de la fuerte influencia del roce en el comportamiento del dispositivo y de que éste cambia a medida que aumenta el desgaste.

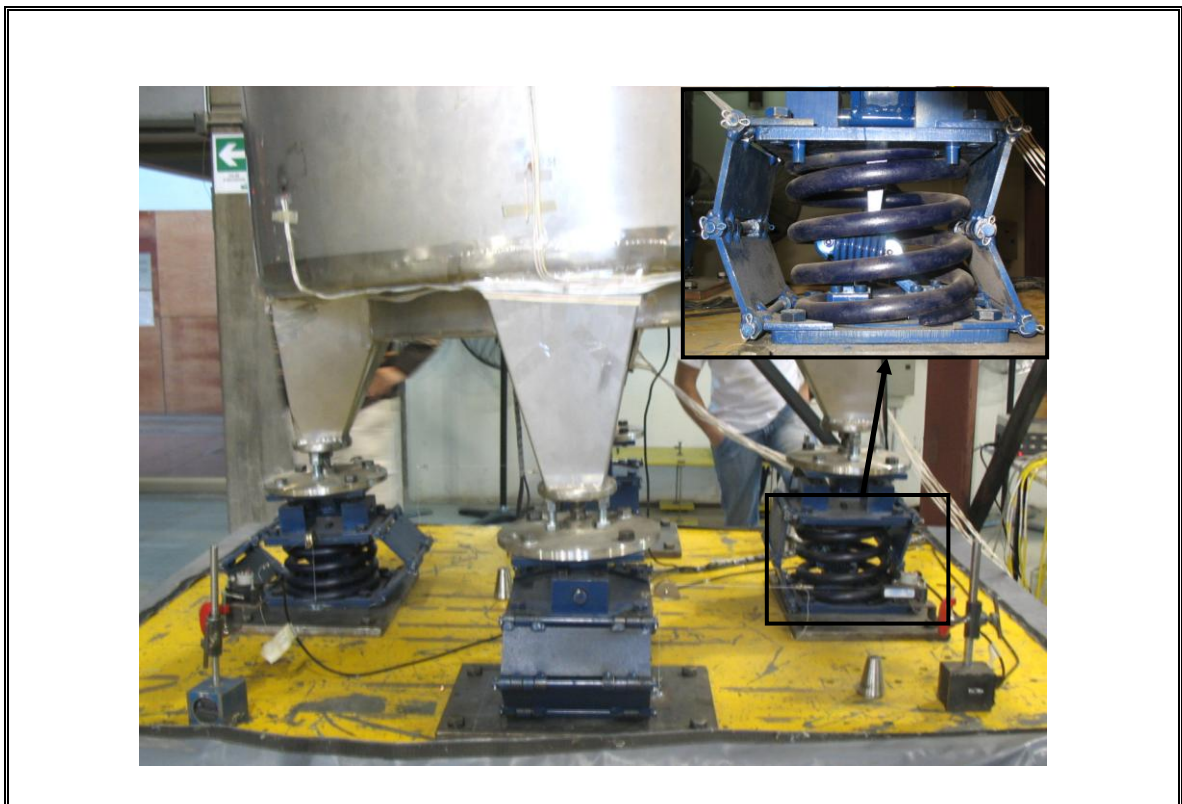


Figura 5.1.2.1-2: Bloqueo Aislador en Tracción por Resonancia

5.1.2.2 Ensayos Ruido Blanco

Dentro de los ensayos 3D, se realizaron ensayos de excitaciones del tipo Ruido Blanco, con el objeto de conocer los modos de vibrar de la estructura. La idea original era excitar con la misma señal al modelo de base fija y al de base aislada, pero tal como

fue enunciado antes, la mesa tuvo problemas de capacidad para el modelo de base fija. A continuación se muestran las señales de aceleración en el dominio de la frecuencia, para dos señales de ruido blanco con diferente intensidad.

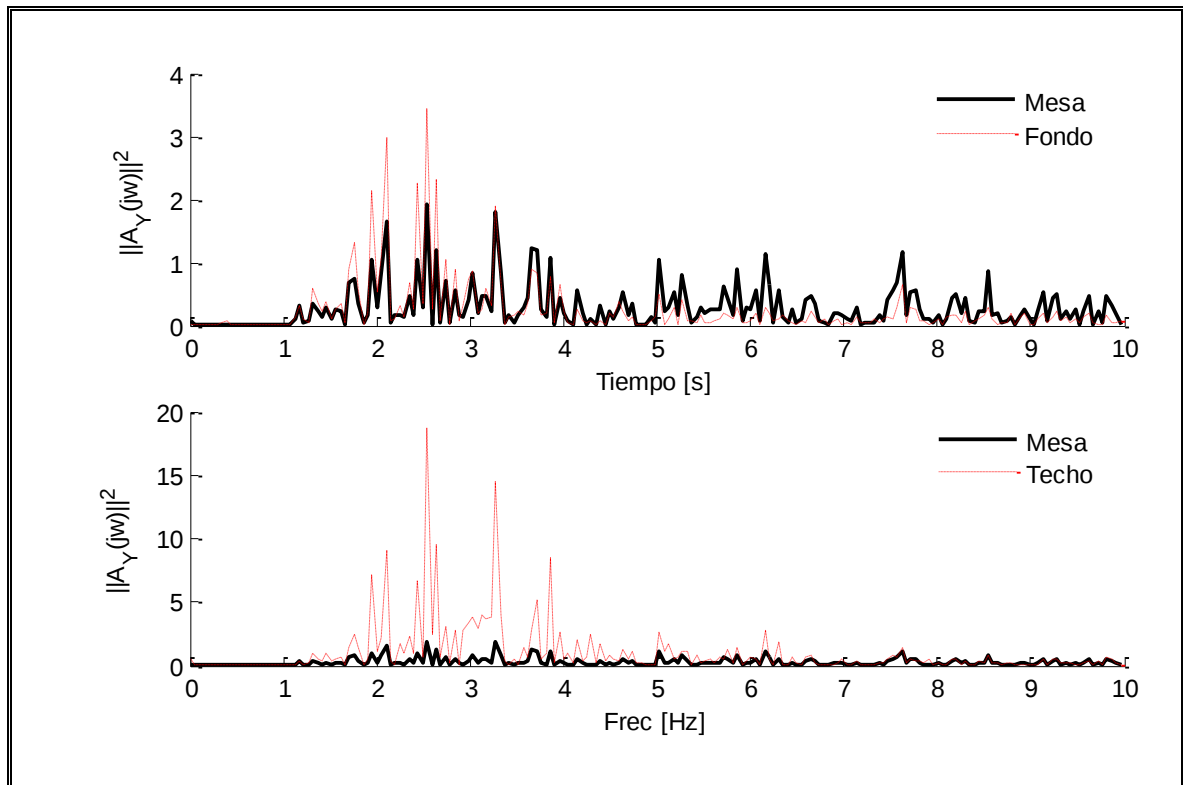


Figura 5.1.2.2-1: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.4g.

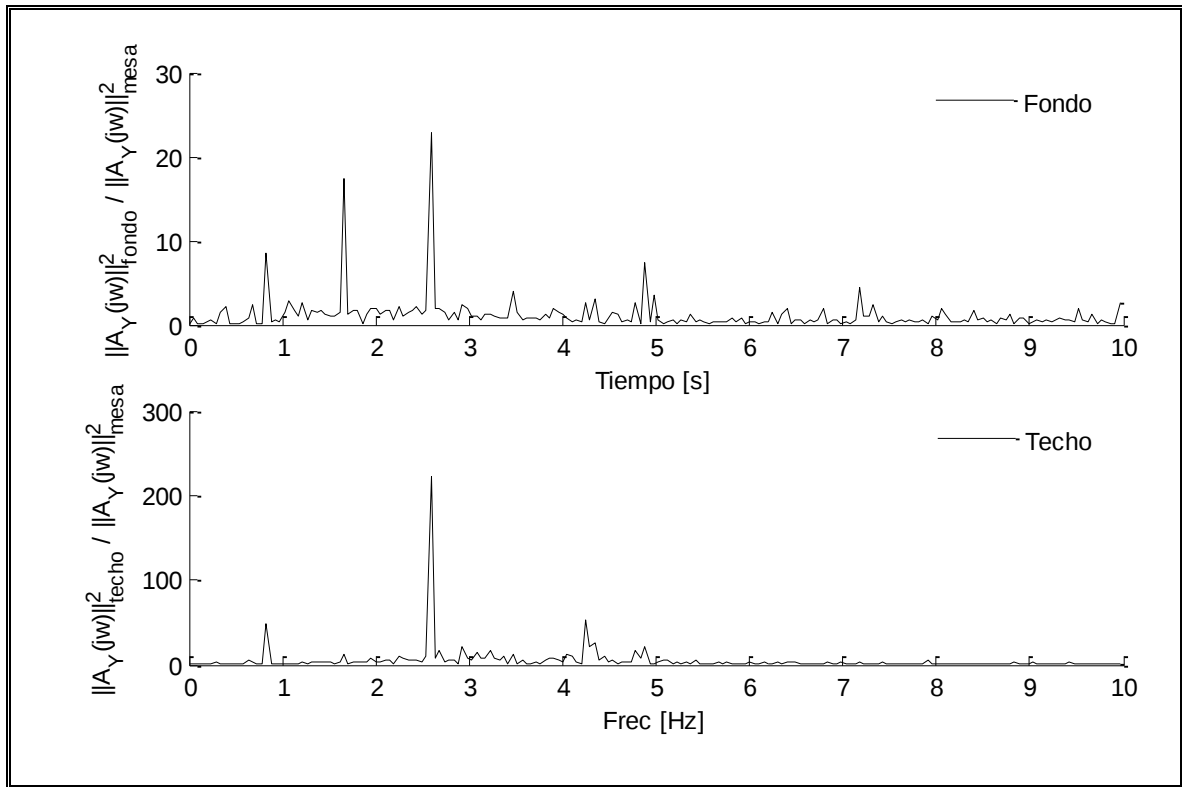


Figura 5.1.2.2-2: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.4g Racionalizados por

Input

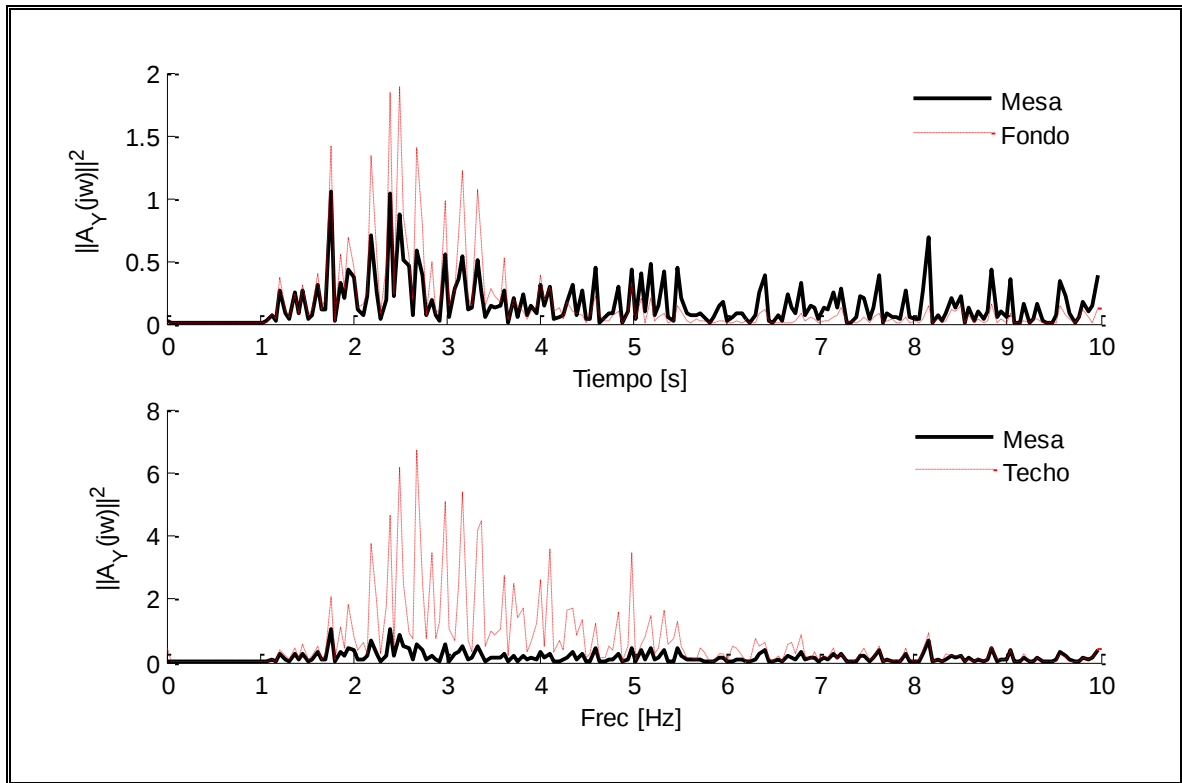


Figura 5.1.2.2-3: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.3g.

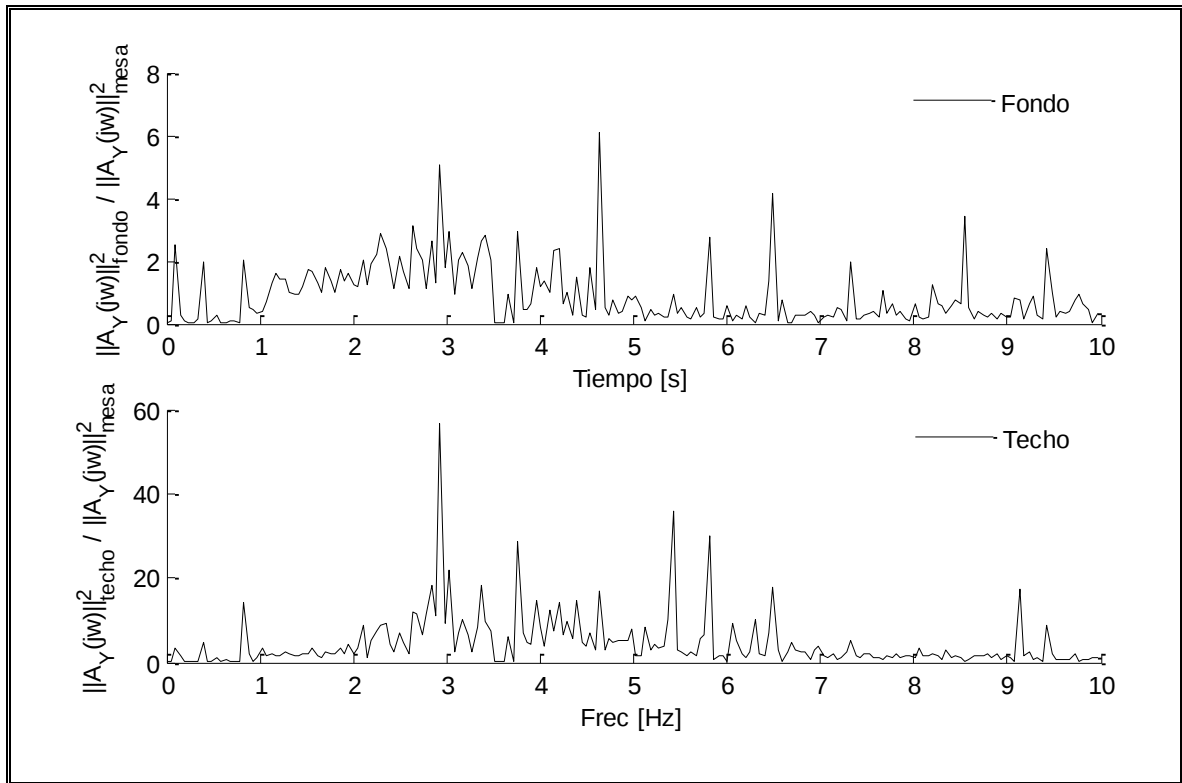


Figura 5.1.2.2-4: Espectros Potencia Ruido Blanco 0.3g, Racionalizados por
Input

Al observar los gráficos se aprecian rangos de frecuencias donde la señal de entrada es amplificada mayormente tanto para el fondo como para el techo del estanque, las que permiten inferir un rango para las frecuencias propias, notándose un claro peak para 2.6 Hz en la Figura 5.1.2.2-1 para la señal de mayor intensidad, muy cercana a las frecuencias propias del estanque calculadas analíticamente en el cap. 4. Al graficar la razón entre los valores de las señales en frecuencia del estanque (*output*) versus la de la mesa (*input*) se manifiestan más notoriamente los peaks, apareciendo además otra frecuencia de amplificación, en torno a los 0.9 Hz, la que corresponde a la primera frecuencia de *sloshing* analítica.

Al repetir el proceso para la señal de menor intensidad (0.3g), las frecuencias de amplificación ya no se manifiestan tan claramente, lo que se podría atribuir a que la menor intensidad de la excitación no logra que los modos aislados se presenten claramente. Finalmente cabe destacar que en estos ensayos se observó una influencia del estanque sobre el movimiento de la mesa, provocando pequeñas rotaciones en la mesa, aún cuando se imponían sólo movimientos traslacionales. La influencia del estanque sobre el movimiento de la mesa implica que la independencia entre la señal de salida y la de entrada no existiría completamente, lo que sin duda altera los resultados, por lo que las conclusiones que podemos obtener de estos ensayos de ruido blanco tienen un bajo nivel de confiabilidad.

5.1.2.3 Ensayos Sísmicos 3D

Dentro de los ensayos 3D, los principales realizados fueron los de registros sísmicos escalados 1:4 en desplazamientos. Los registros ensayados corresponden a 2 sismos no impulsivos, El Centro y Melipilla, y 2 impulsivos, Corralitos y Newhall. La excitación sísmica contenía las 2 componentes horizontales y la componente vertical. El nivel de aceleración de los registros escalados fue controlado al generar las señales, con el fin de manejar la intensidad del movimiento y desde luego la fuerza que se producía en la mesa. El detalle de los registros usados se presenta en la Tabla 5.1.2.3-1.

Tabla 5.1.2.3-1: Ensayos sísmicos 3D realizados

Registro	Intensidad de Aceleración c.r. al registro original	Condición de apoyo BF= Base Fija IS = Aislado
El Centro	70%	BF
	150%	IS
Melipilla	70%	BF
	150%	IS
Corralitos	50%	BF
	90%	IS
Newhall	50%	BF
	70%	IS

Como ya se enunció, el problema que impidió la comparación de las respuestas de los casos de base fija y base aislada fue que el movimiento impuesto por la mesa en el caso fue diferente para cada una de las condiciones de apoyo, tanto en magnitud como en contenido de frecuencia. Para poder comparar y analizar las señales medidas en la mesa para ambos casos, se procedió a amplificar las señales de aceleración de los ensayos de base fija para escalar las aceleraciones al valor teórico del ensayo de base aislada respectivo, por ejemplo, para el caso de Melipilla el registro de aceleraciones base fija (BF) tenía aceleraciones al 70%, por lo que se amplificó por 15/7, para alcanzar la intensidad del ensayo de base aislada (IS) que correspondía a un 150%. Los espectros de potencia para las intensidades de aceleración reguladas al valor teórico del ensayo de base aislada se presentan en la Figura 5.1.2.3-1, para ambas condiciones de apoyo.

Del análisis de la Figura 5.1.2.3-1 se aprecia la diferencia en magnitud de los registros para las diferentes frecuencias, pudiendo afirmar en general que para frecuencias menores a 3 Hz la mesa puede reproducir las señales aceptablemente en ambas condiciones de apoyo, sin embargo entre 3 y 7 Hz las diferencias entre los registros para ambas condiciones de apoyo se hacen notorias. Otra zona donde se presentan diferencias entre los registros BF e IS se presenta en la zona de frecuencias altas, entre 30 y 35 Hz, región donde se debería encontrar la frecuencia propia del modo impulsivo del estanque según lo presentado en el capítulo 4 (31-35 Hz), lo que claramente deja en evidencia la influencia del estanque sobre el movimiento de la mesa, tal como se había enunciado anteriormente. Un detalle de la zona de frecuencias altas se presenta en la Figura 5.1.2.3-2.

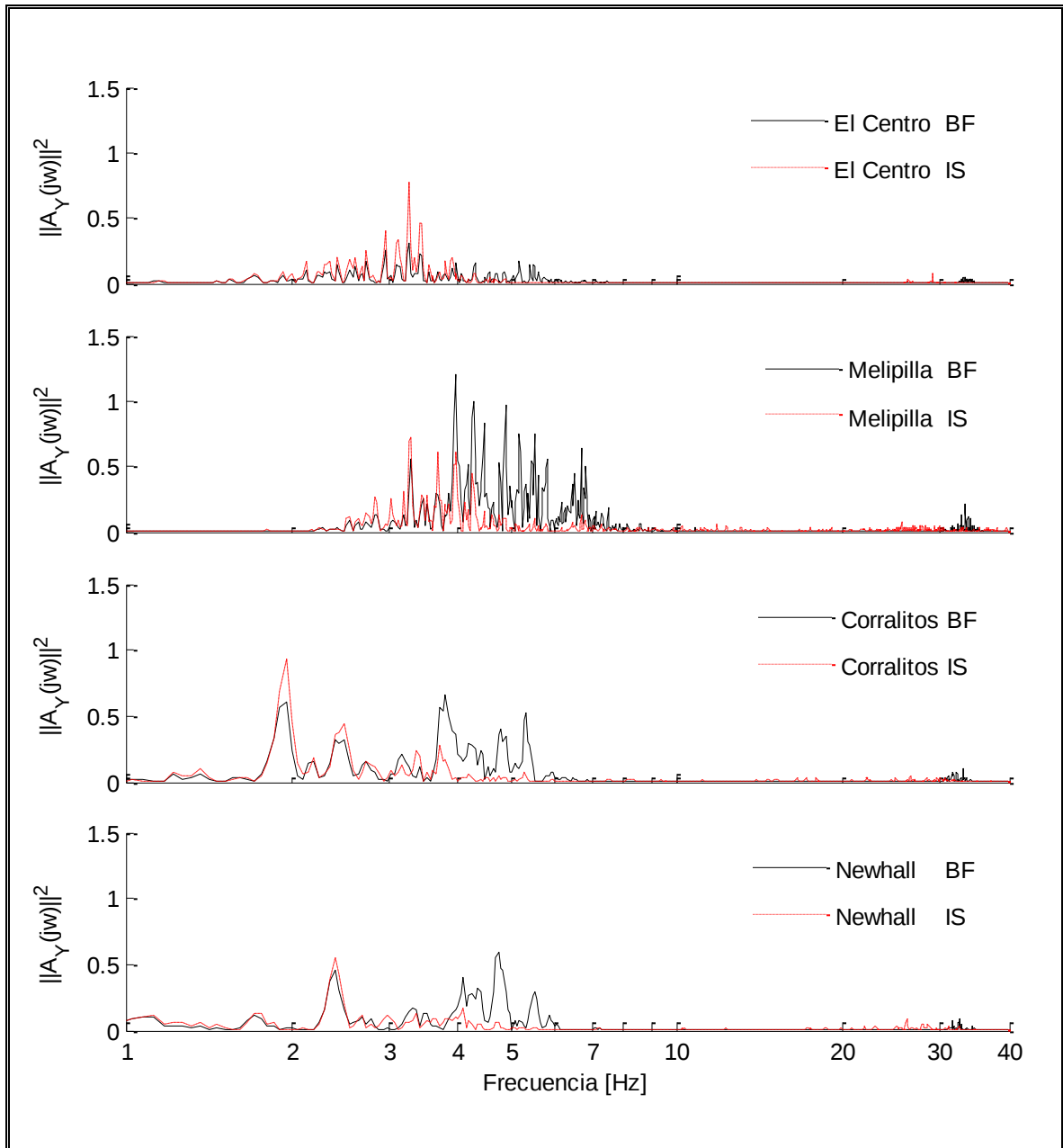


Figura 5.1.2.3-1: Espectros de Potencia Señales Sísmicas Ensayos 3D.

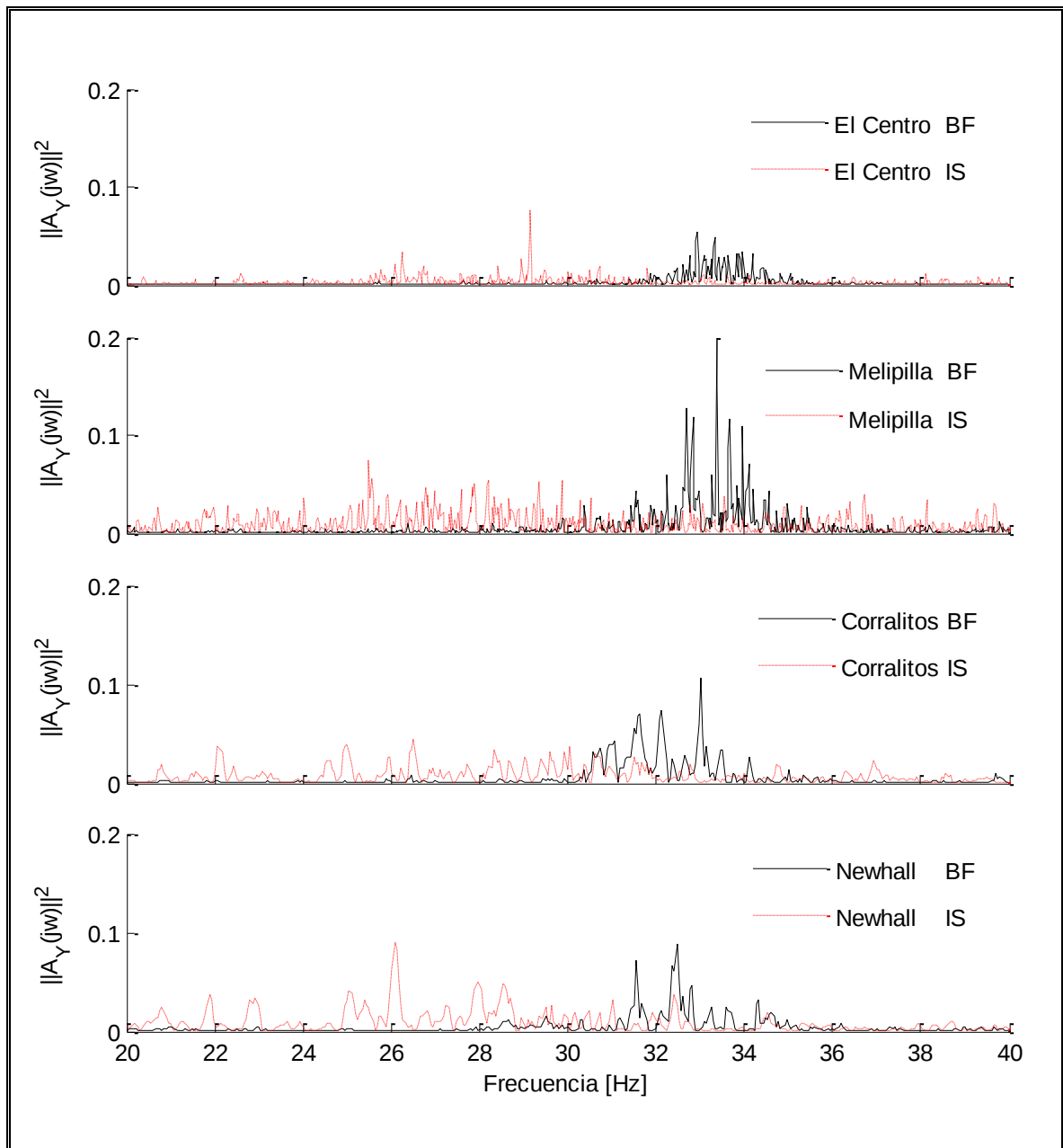


Figura 5.1.2.3-2: Espectros de Potencia Señales Sísmicas Ensayos 3D, Detalle

Zona Frecuencias Altas.

Dada la diferencia en las excitaciones para ambos sistemas de apoyo, la comparación de la respuesta del estanque para los ensayos 3D no tiene validez, por lo

que esta serie de ensayos constituyeron una prueba cualitativa al comportamiento del estanque, ya que estos ensayos permitieron constatar el buen funcionamiento del sistema de aislación para excitaciones en cualquier dirección y que involucran desplazamientos en el plano horizontal y en dirección vertical simultáneamente, no observándose nunca una trabazón o un mal funcionamiento del sistema.

Considerando la imposibilidad de comparar las respuestas a las señales para ambos casos de apoyo, a continuación se presenta la respuesta medida durante el ensayo de Melipilla IS (aislado) en aceleraciones, deformaciones, presiones en el fluido y desplazamientos en los aisladores para el caso de base aislada sólo con un fin ilustrativo del comportamiento del sistema aislado y de las señales obtenidas.

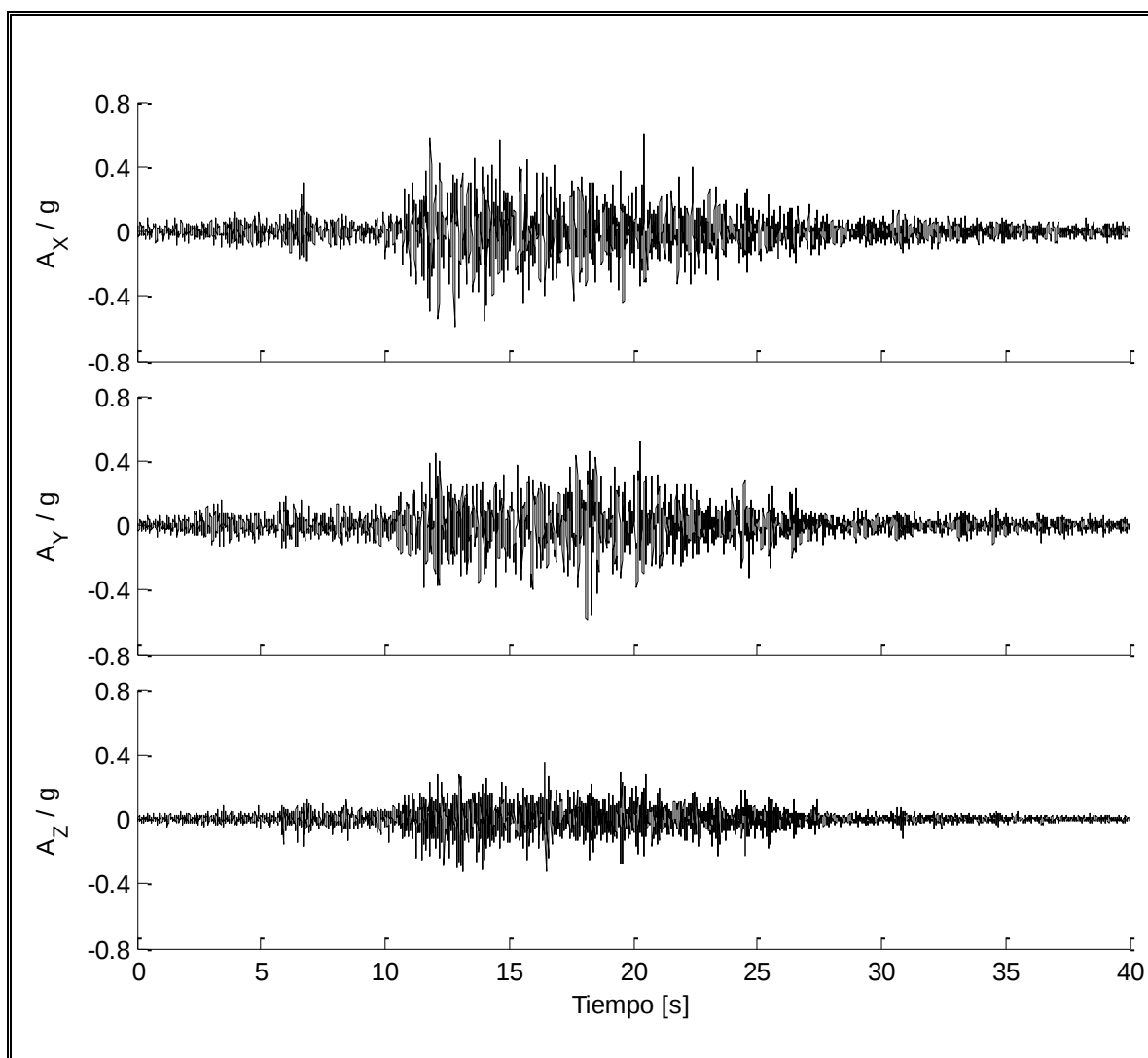


Figura 5.1.2.3-3: Aceleraciones en Mesa MOOG señal Melipilla IS

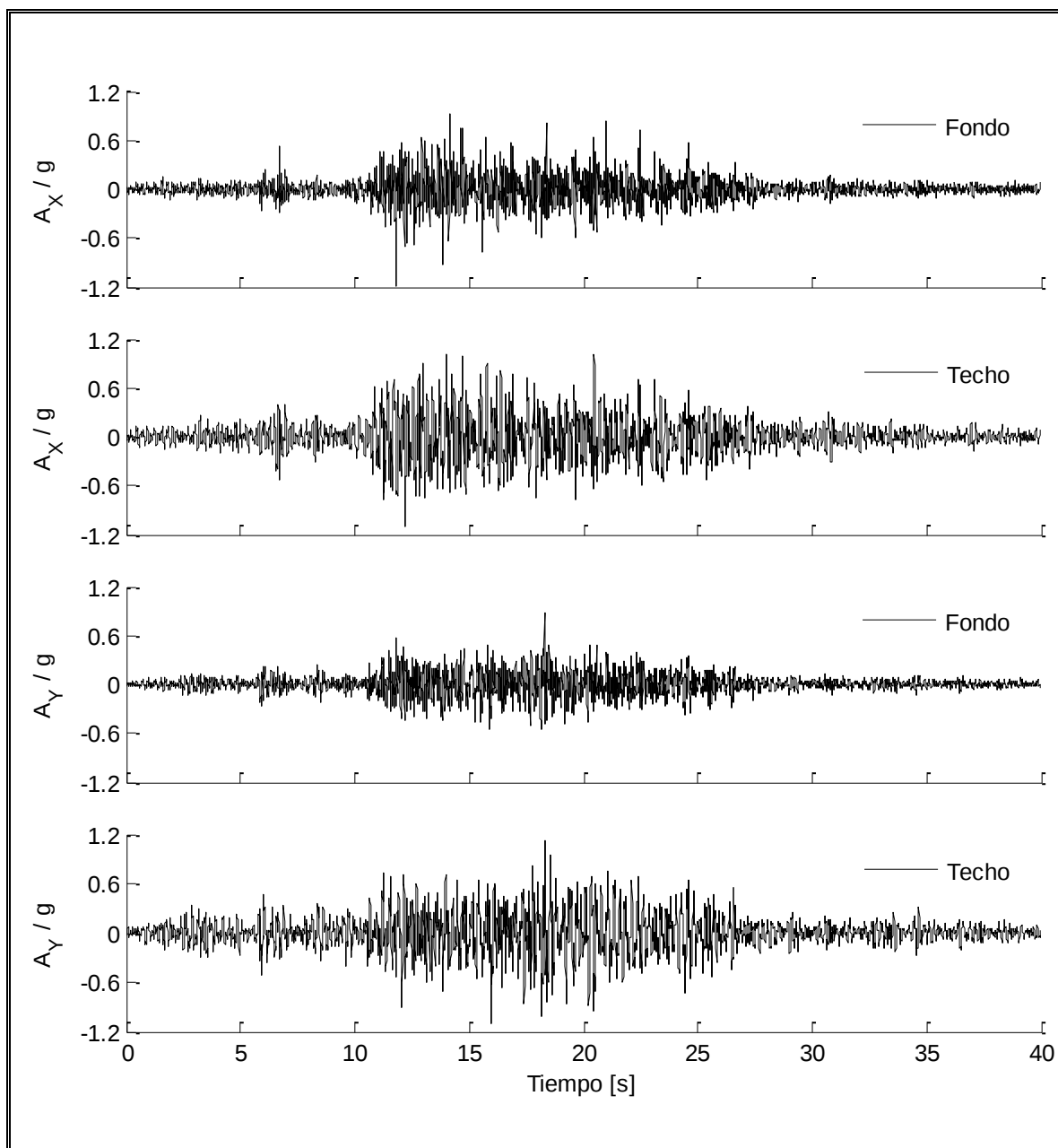


Figura 5.1.2.3-4: Aceleraciones en Estanque señal Melipilla IS

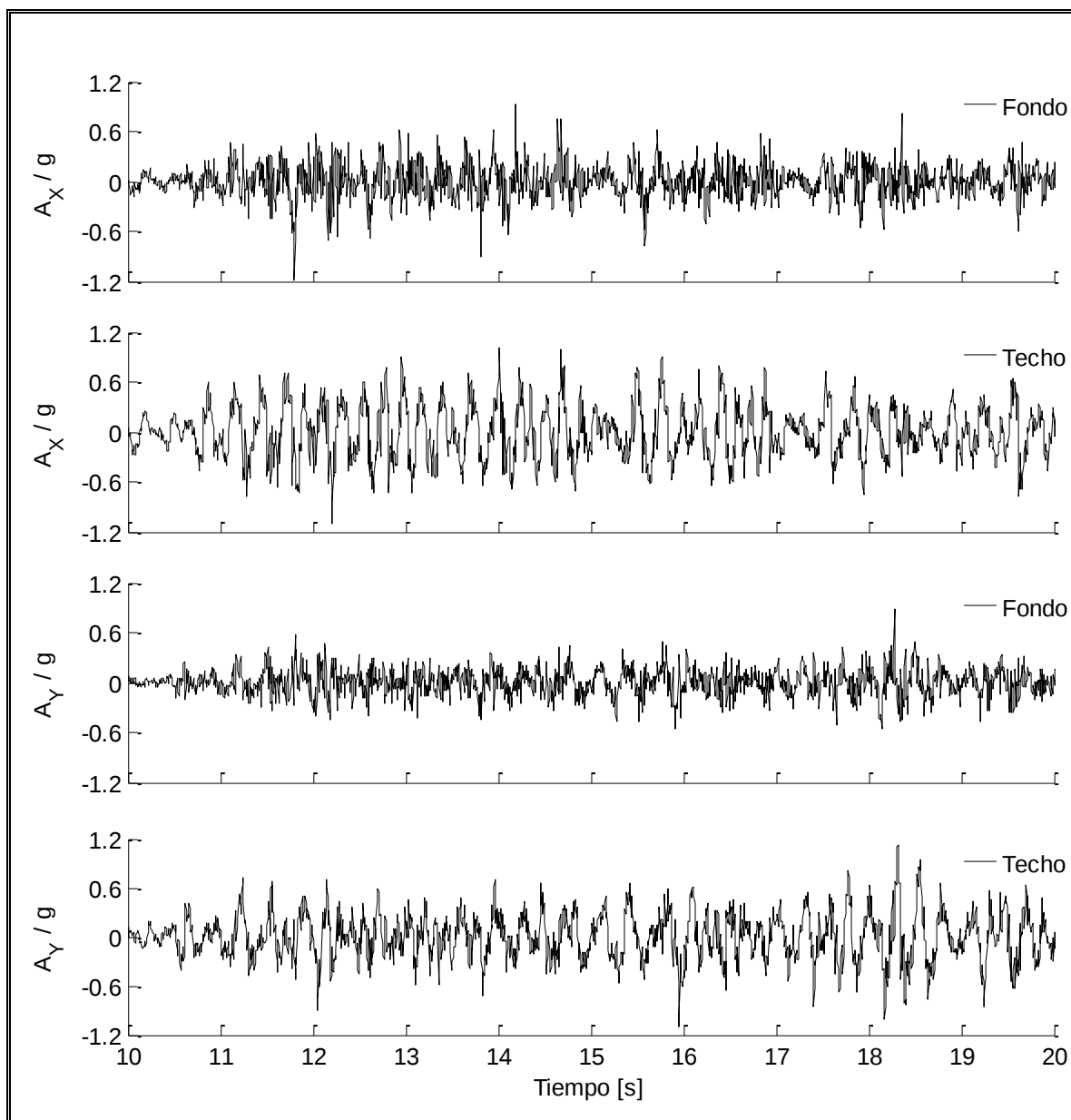


Figura 5.1.2.3-5: Aceleraciones en Estanque señal Melipilla IS, Detalle Zona

Movimiento Fuerte.

Del análisis de las respuestas de aceleraciones se puede afirmar que la amplificación de la aceleración del techo con respecto a la base es alrededor de 2 veces en las dos direcciones mostradas.

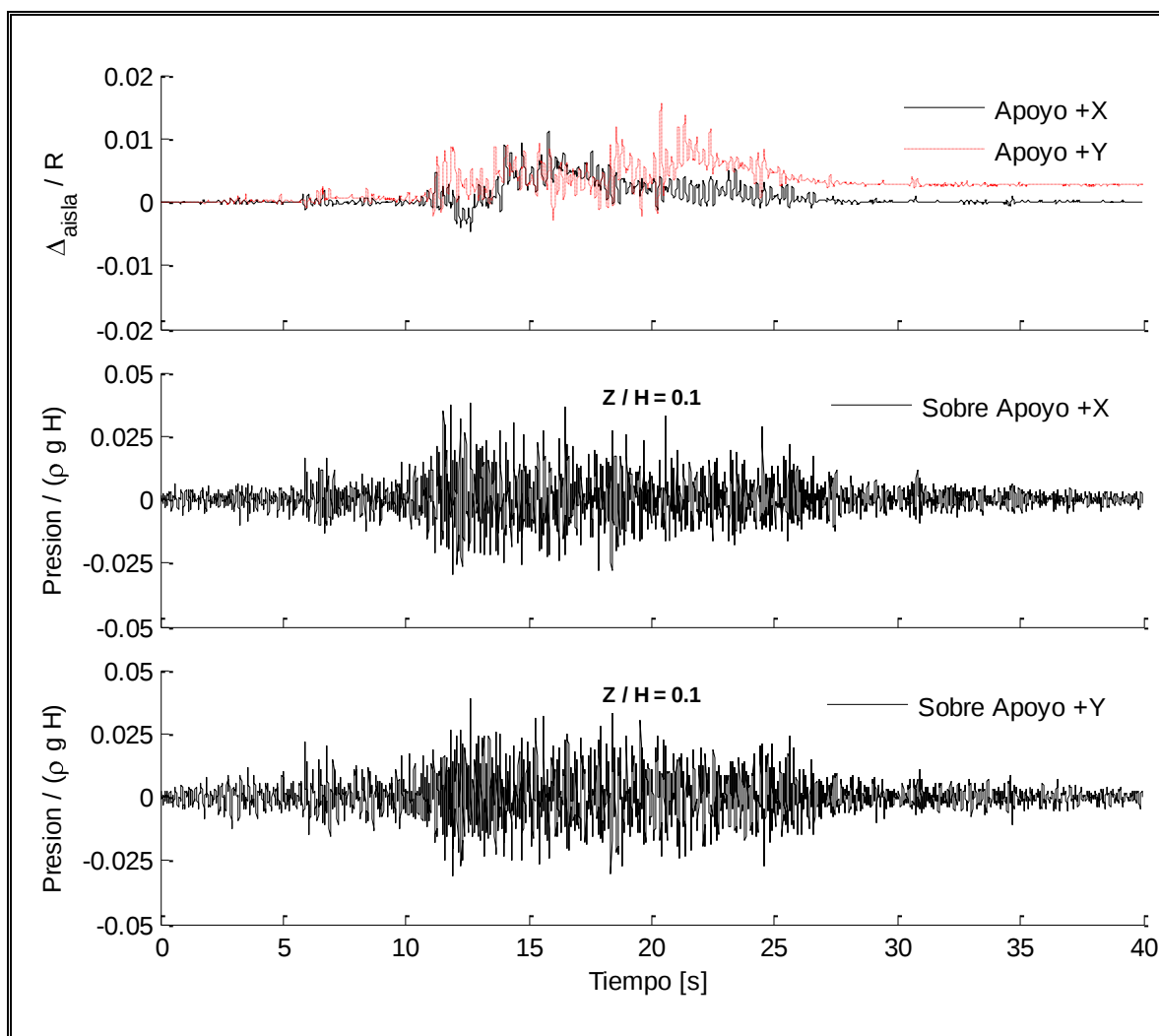


Figura 5.1.2.3-6: Deformaciones en Aisladores y Presiones Fluido señal

Melipilla IS

Del análisis de las deformaciones de los aisladores en la Figura 5.1.2.3-6 es importante destacar la deformación residual a la que queda sometida uno de los

aisladores, la que obviamente es producto de otra posición de equilibrio para el peso propio, la que es producto del roce que se desarrolla en el sistema de disipación, provocando además esfuerzos residuales en el estanque, lo que se constata con las deformaciones.

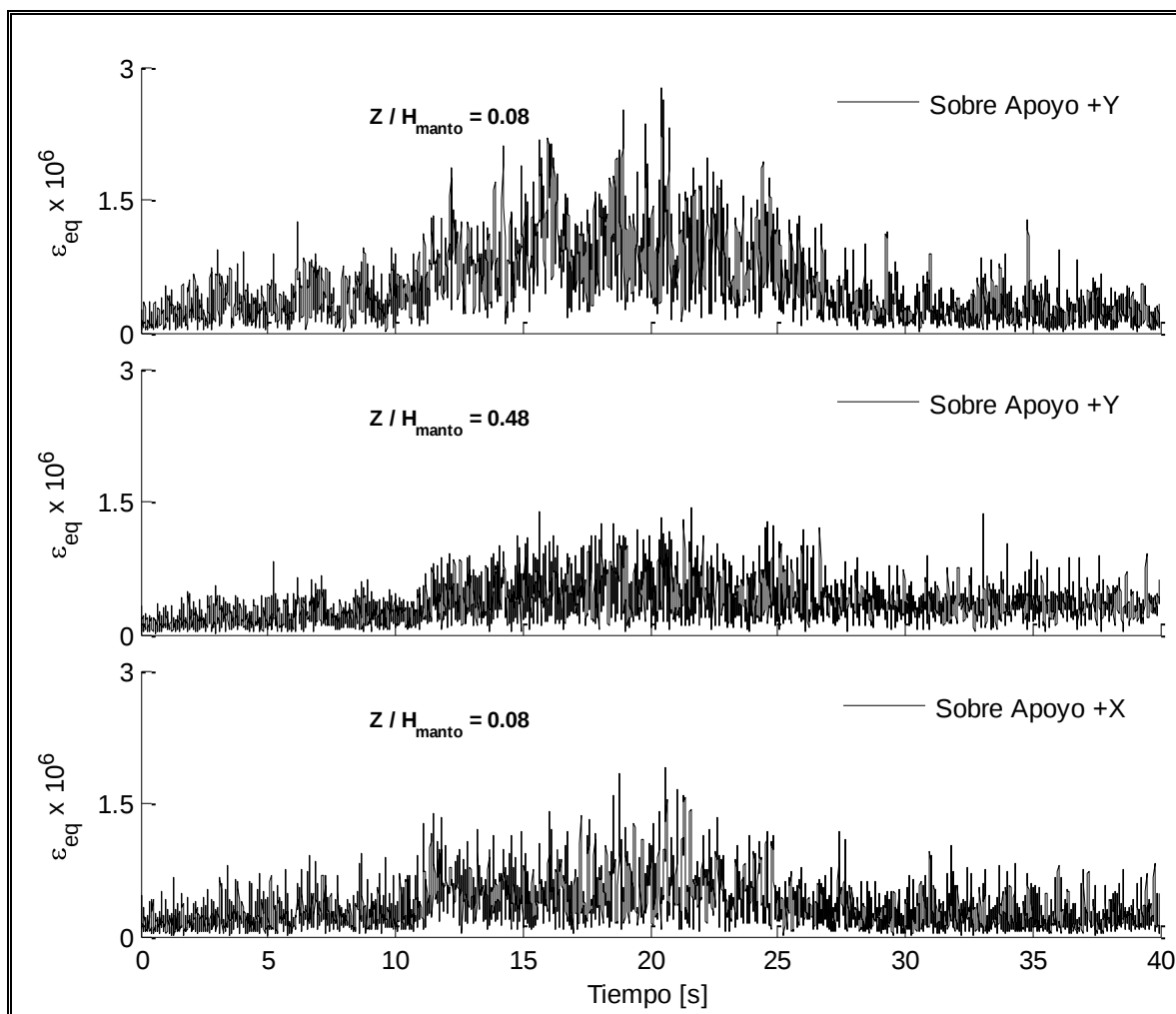


Figura 5.1.2.3-7: Deformaciones Equivalentes o de Von Misses (ϵ_{eq}) en Estanque señal Melipilla IS.

En la Figura 5.1.2.3-7 se puede observar la correlación entre la deformación vertical en los dispositivos y la deformación equivalente (ϵ_{eq}) ya que para el rango de tiempo donde la media de las ϵ_{eq} aumenta, corresponde al mismo rango donde las

deformaciones en los aisladores tienen una media diferente de cero. Este mismo hecho se aprecia para las deformaciones ε_{eq} verticales presentadas en la Figura 5.1.2.3-7.

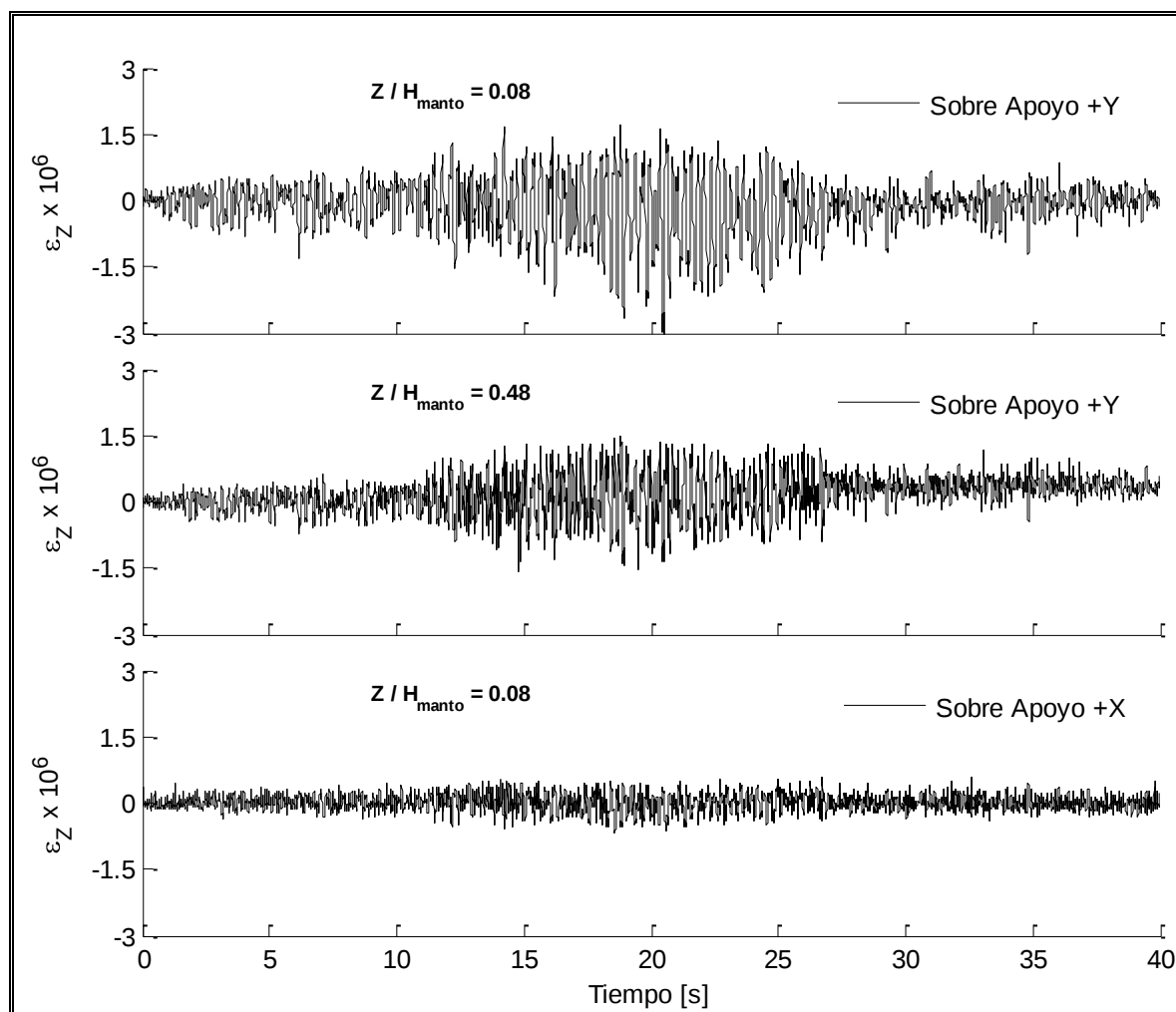


Figura 5.1.2.3-8: Deformaciones Unitarias Verticales (ε_z) en Estanque señal

Melipilla IS

Finalmente, del análisis de las respuestas del sistema en general, se puede afirmar que el comportamiento del sistema en el caso de base aislada cualitativamente es bueno, ya que no hay evidencias de problemas de trabazón del sistema de aislación y los resultados de deformaciones y desplazamientos dejan de manifiesto la gran influencia de

la fuerza de roce del sistema de disipación, el que incluso provoca desplazamientos y deformaciones residuales en el sistema.

5.2 Ensayos en Mesa 1D

Producto de la imposibilidad de comparar numéricamente el comportamiento del sistema de base aislada v/s el de base fija, se realizaron ensayos adicionales en una mesa vibradora uniaxial construida a comienzos del año 2009 en el laboratorio de Ingeniería Estructural de la PUC, la que tiene una capacidad notablemente mayor que la mesa MOOG. Esta mesa está acoplada a un actuador horizontal de 100 Tonf, el que originalmente se utiliza en el ensayo de aisladores elastoméricos con ciclos de deformación horizontal y/o registros sísmicos.

En la nueva mesa 1D se realizaron ensayos del estanque con y sin dispositivos de aislación, para señales sinusoidales y para registros sísmicos escalados 1:4 en desplazamientos y diferentes niveles de aceleración para controlar la intensidad del movimiento.

5.2.1 Montaje e Instrumentación Ensayos en Mesa 1D

Para los ensayos se montó el estanque vacío sobre la mesa 1D, con o sin aisladores dependiendo del sistema a estudiar y se agregó el fluido en su interior (agua). En los ensayos se adquirieron aceleraciones, deformaciones del material mediante strain gauges y sensores de presión de agua. Una imagen del montaje para el caso de base fija se presenta en la Figura 5.2.1-1



Figura 5.2.1-1: Montaje Ensayo Caso Base Fija Mesa 1D.

La instrumentación utilizada en los ensayos 1D fue idéntica a la de los ensayos 3D, salvo tres excepciones: a) no se instalaron potenciómetros de desplazamiento en los aisladores; b) se agregó una roseta triaxial en el apoyo +X, para capturar las deformaciones en una de las placas radiales de la pata y c) Se utilizaron 3 sensores de presión ubicados a diferentes alturas. Los sensores utilizados en los ensayos fueron:

- Acelerómetros: 3 para registrar las aceleraciones de la mesa, 5 para las aceleraciones en el fondo del estanque y 3 para las aceleraciones en el techo del estanque. Acelerómetros adicionales se dispusieron en el actuador y en diferentes zonas del sistema de acoplamiento actuador-mesa, para estudiar el

comportamiento de la mesa (sus resultados no se presentan pues no están en el contexto de este estudio).

- Sensores de presión de agua: 3 en total, los que se presentan en la Figura 5.2.1-2. Los sensores ubicados sobre el apoyo +X, denominados +X1 y +X3 se dispusieron a 20 y 80 cm sobre el fondo respectivamente. El tercer sensor denominado –X2, se ubicó sobre el apoyo –X a 60 cm sobre el fondo.
- *Strain gages*: 16 rosetas triaxiales en 45°, ubicadas cada 45° en dos niveles, sobre el manto, a 10 cm del fondo y a 60 cm sobre el fondo, más una roseta triaxial en una de las caras radiales de la pata +X, a 4 cm desde la base de la pata, la que se muestra en la Figura 5.2.1-2.

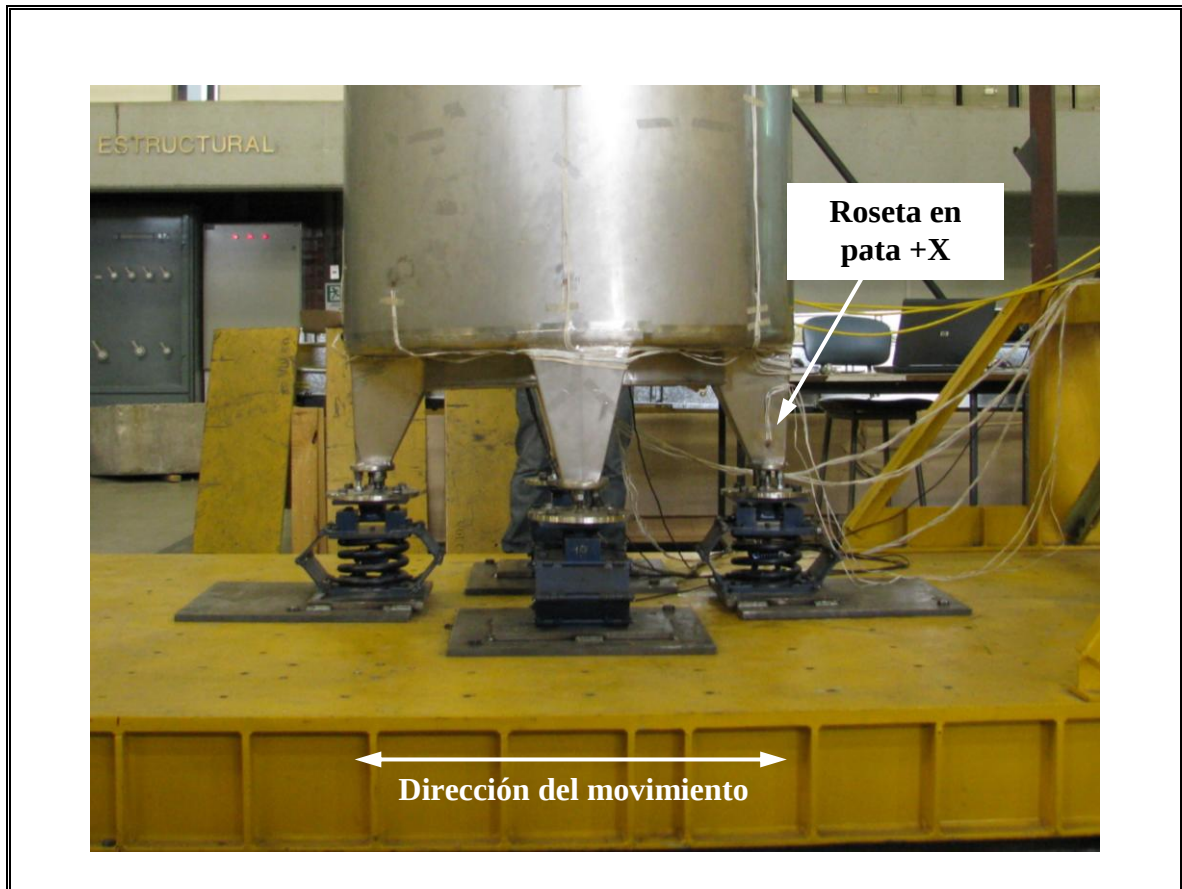


Figura 5.2.1-2: Detalle Instrumentación Roseta en Pata

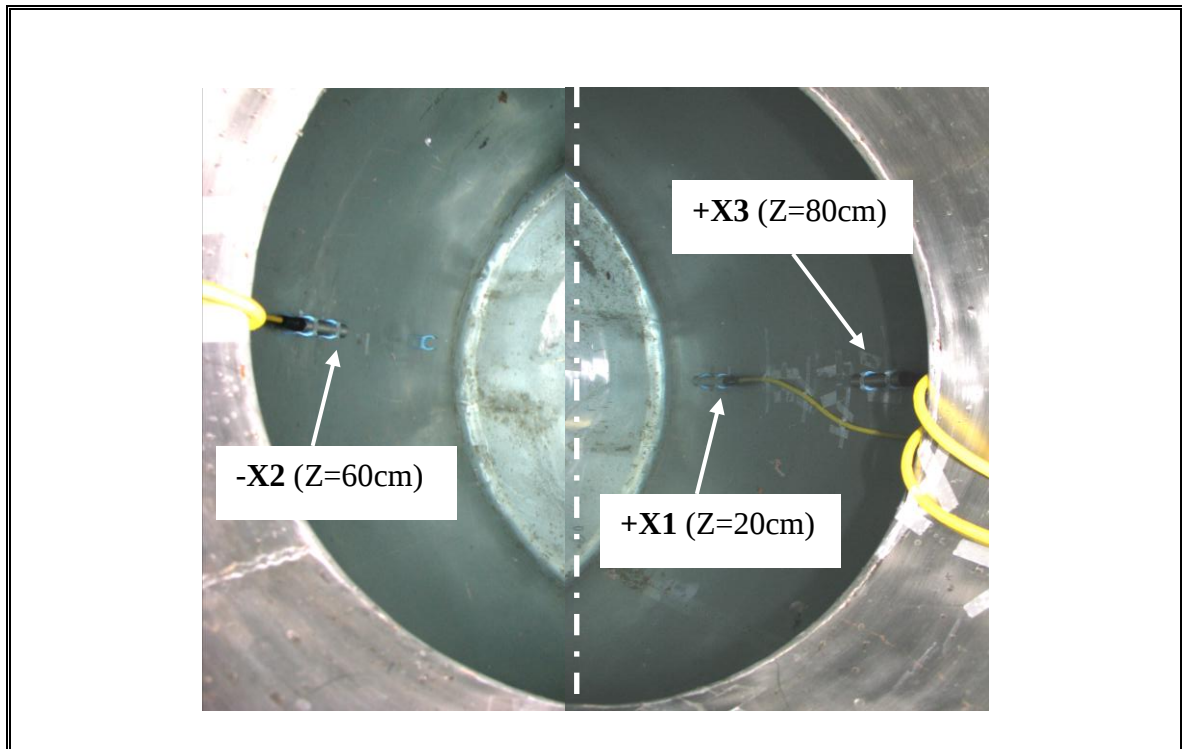


Figura 5.2.1-2: Detalle Sensores Presión

5.2.2 Resultados Ensayos en Mesa 1D

El objetivo principal de estos ensayos fue suplir la deficiencia de los ensayos 3D, los que no permitieron la comparación de las respuestas del sistema aislado con la respuesta del sistema sin aislar por la diferencia de las señales para ambos casos debido a la interacción entre la mesa y el estanque.

En este caso la mesa de ensayos no había sido empleada antes, por lo que las características de su respuesta dinámica eran desconocidas, y no existía seguridad de que estos ensayos fueran efectivamente a producir señales comparables para las dos condiciones de apoyo, lo que se discutirá en las siguientes secciones.

5.2.2.1 Ensayos Sísmicos 1D

El espécimen en estudio se sometió a las señales sísmicas de El Centro y Melipilla, en diferentes intensidades de aceleración comparadas con la del registro original. El detalle de los registros presentados en esta sección se presenta en la Tabla 5.2.2.1-1.

Tabla 5.2.2.1-1: Ensayos sísmicos 1D

Registro	Intensidad de Aceleración c.r. al registro original	Condición de apoyo BF= Base Fija IS = Aislado
El Centro	100%	BF
	150%	IS
Melipilla	100%	BF
	150%	IS

Para permitir la comparación directa entre los casos del modelo BF e IS, se amplificaron las señales de BF por un factor de 1.5 para igualar teóricamente las intensidades tanto de la excitación como de las respuestas medidas en aceleraciones, presiones y desplazamientos.

5.2.2.1.1 Análisis del Comportamiento del Sistema de Ensayos y Manipulación de Datos

El comportamiento del sistema de ensayo y su influencia en el estanque en estudio se puede evaluar analizando las señales de aceleración en frecuencia, tanto de excitación como de respuesta, lo que se presenta para los registros de El Centro y Melipilla en las Figuras 5.2.2.1.1-1 y 5.2.2.1.1-2 respectivamente.

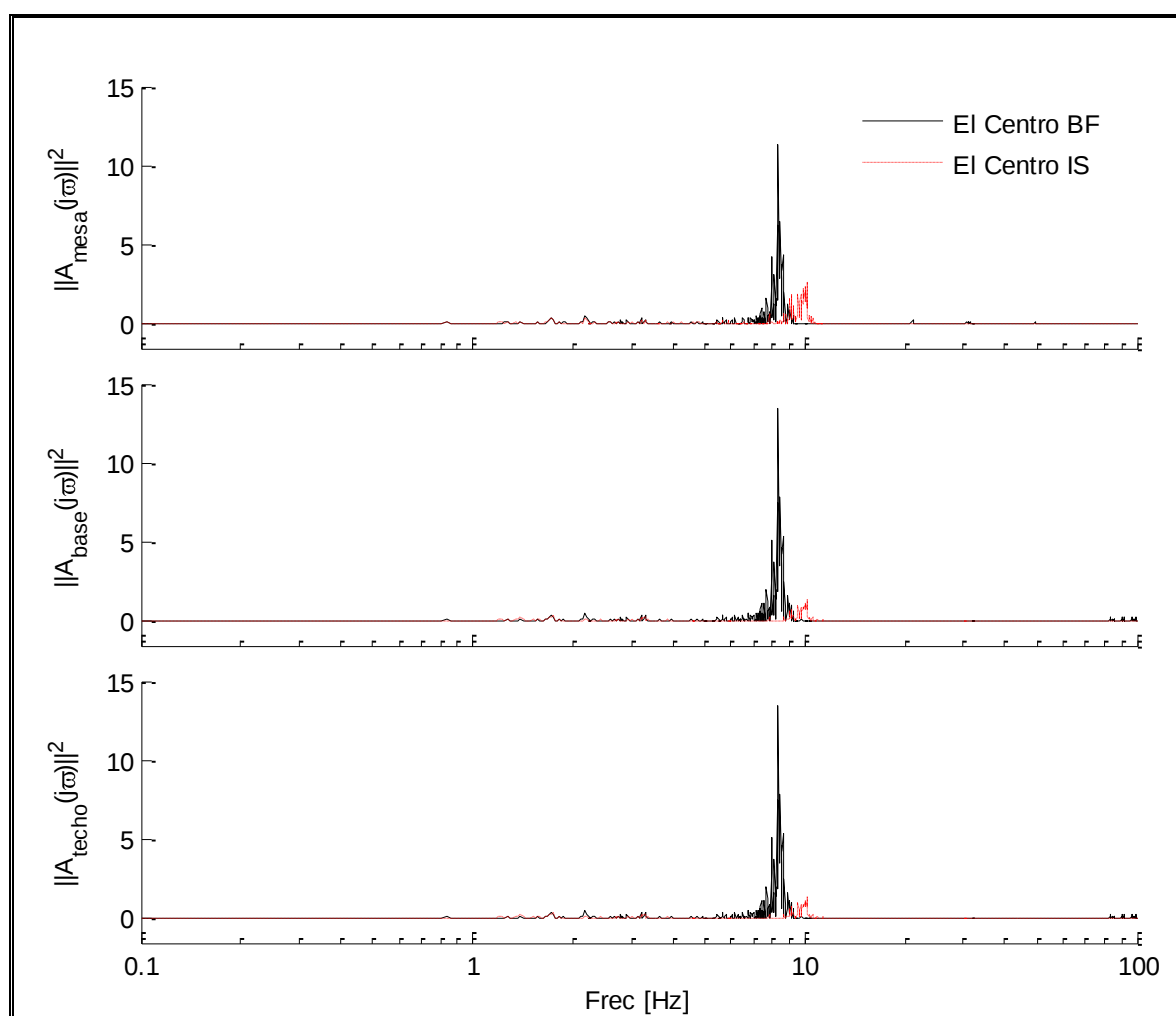


Figura 5.2.2.1.1-1: Espectro de Potencia Ensayos con registro El Centro.

Del análisis de las Figuras 5.2.2.1-1 y 5.2.2.1-2, es claro que durante los ensayos de ambos registros se presentan problemas de resonancia en el sistema Mesa vibradora-Estanque, manifestándose principalmente entre 7 y 11 Hz. Lo anterior afecta a ambos casos de apoyo del estanque, pero mayormente para el caso Base Fija (BF), por la mayor rigidez de ese sistema estructural. Las razones de este mal comportamiento se atribuyeron a la flexibilidad del sistema de conexión y a la presencia de gaps en una junta de tipo cardán, la que por la masa y la frecuencia de la excitación se producía la amplificación observada.

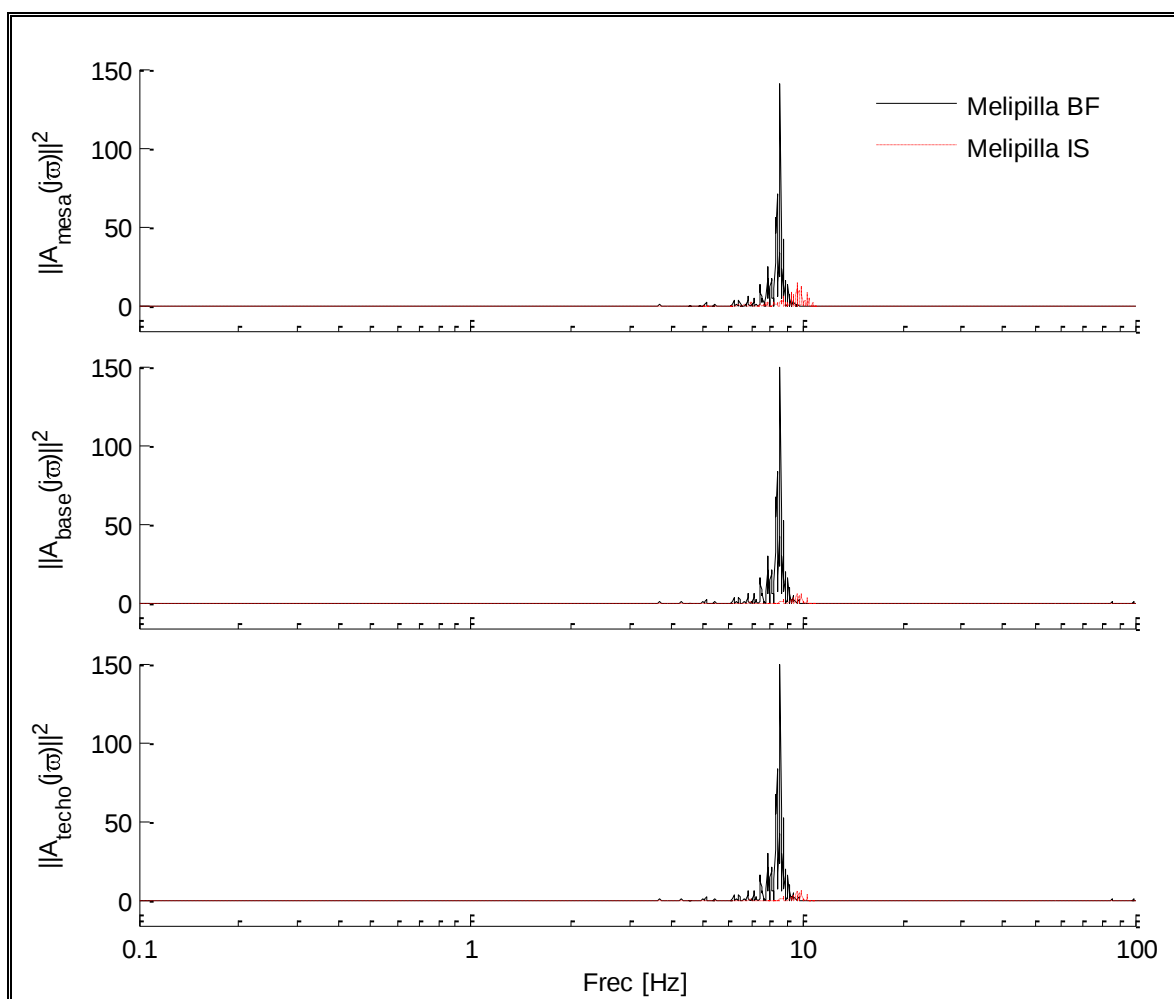


Figura 5.2.2.1.1-1: Espectro de Potencia Ensayos con Registro Melipilla.

Para analizar el comportamiento de la mesa vibradora fuera del rango afectado por la resonancia, es necesario cambiar la escala para observar el rango de interés, lo que se presenta en las Figuras 5.2.2.1.1-3 y 5.2.2.1.1-4. En estas Figuras se aprecia la similitud en el contenido de frecuencias de ambas señales fuera del rango entre 8 y 11Hz, exceptuando por algunas diferencias notorias en torno a 20Hz, la que afortunadamente no está presente en las respuestas de aceleración ni en la base ni en el techo del estanque, no causando problemas para comparar el comportamiento de los sistemas BF e IS.

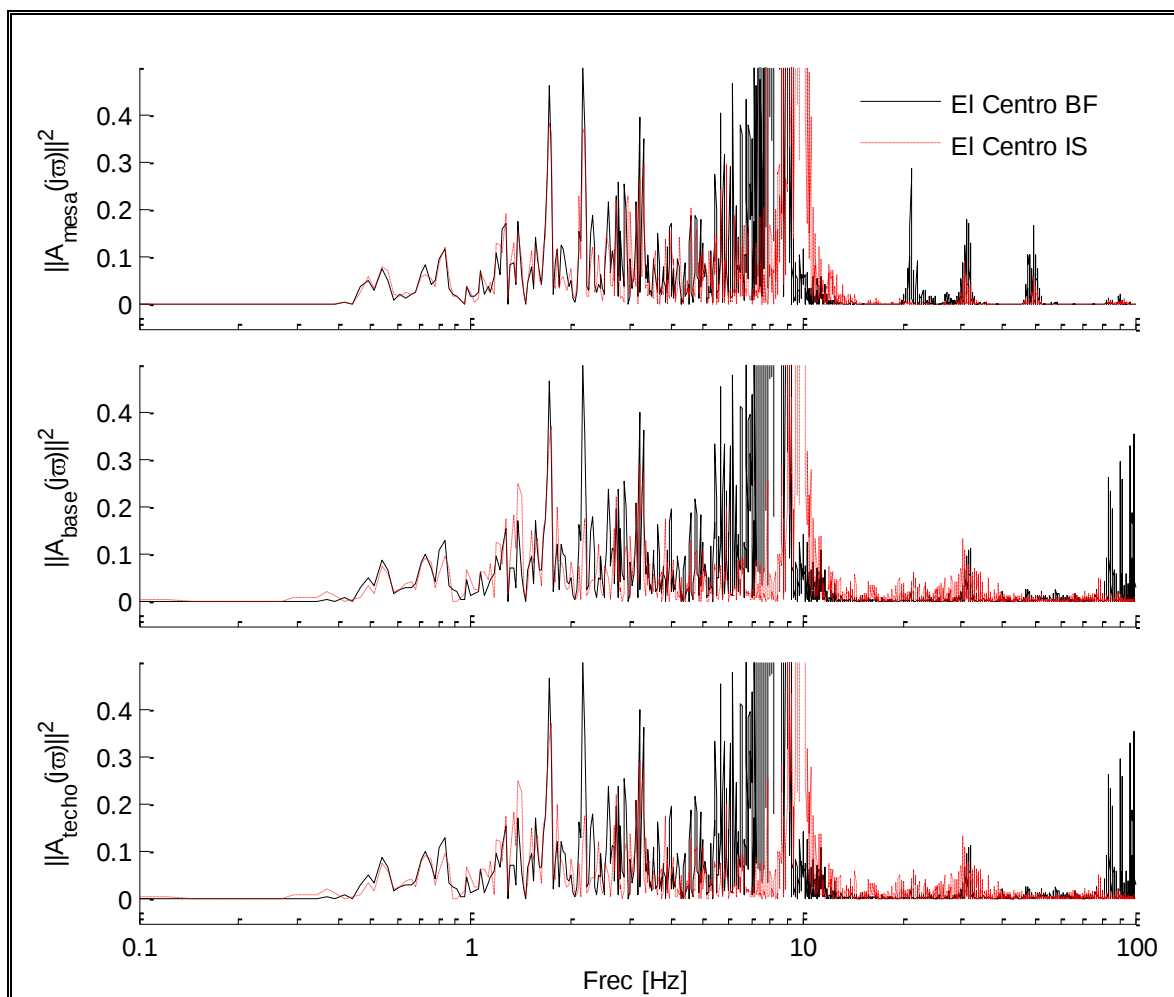


Figura 5.2.2.1.1-3: Espectro de Potencia Ensayos con Registro El Centro
(Detalle).

Con respecto a la respuesta en aceleraciones de los sistemas en estudio, es importante notar que para el caso BF se manifiesta un modo sobre los 30Hz, el que correspondería al modo principal impulsivo según lo presentado en la sección 4.3. En el mismo modelo caso BF cabe destacar la manifestación de modos superiores con frecuencia cercana a los 100Hz, lo que también coincide con el análisis modal presentado en este estudio.

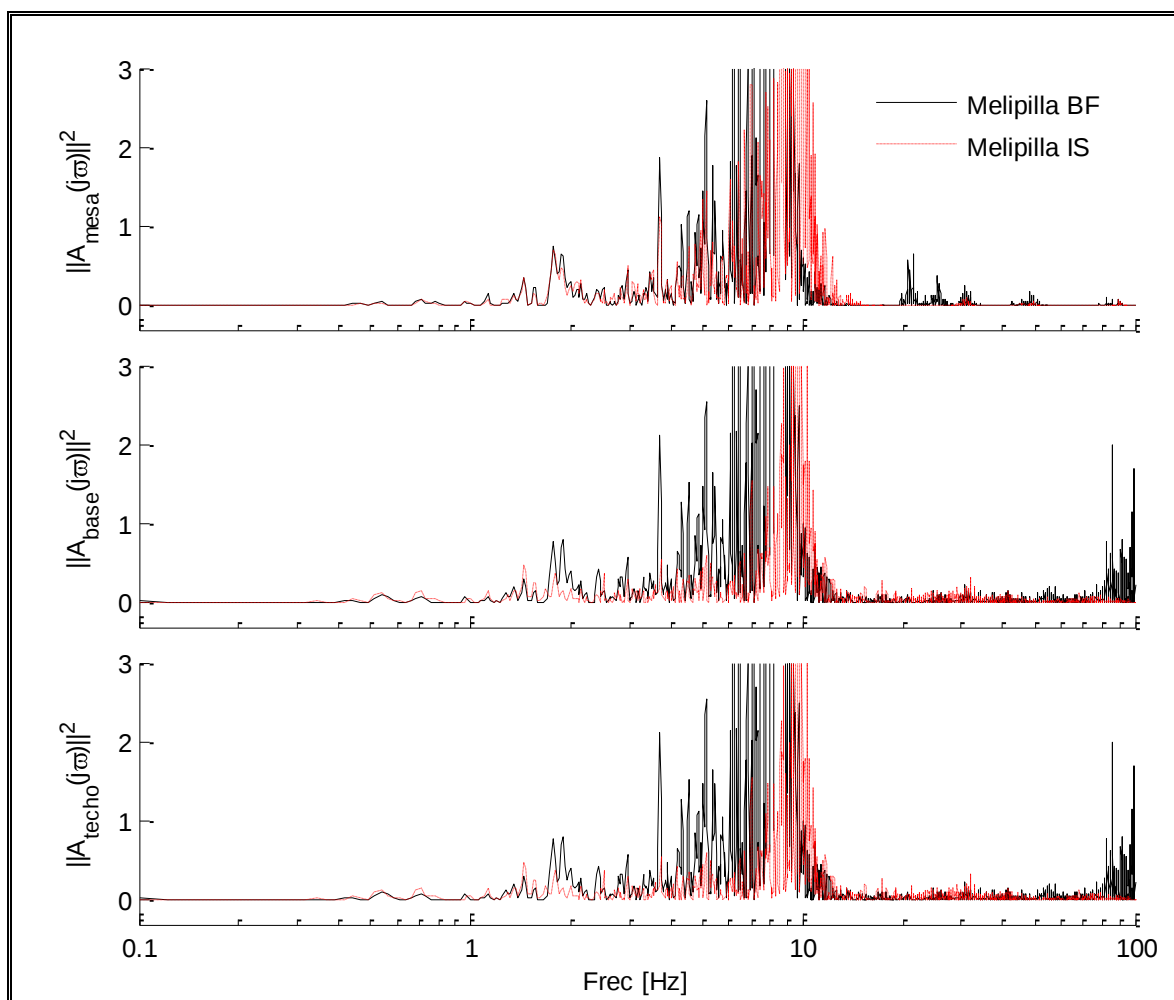


Figura 5.2.2.1.1-4: Espectro de Potencia Ensayos con registro Melipilla
(Detalle).

Para disminuir la diferencia en las señales BF e IS y poder analizar todos los datos y señales dinámicas comparativamente para ambos casos de apoyo, se aplicó un filtro “*bandstop*” entre 8 Hz y 11 Hz a todas las señales obtenidas en los ensayos, ya sean de entrada al sistema (aceleración mesa), o de respuesta (aceleraciones en el estanque, presiones en el fluido, deformaciones unitarias en los strain gages). El objeto de este procedimiento es que se mantengan sólo los contenidos de frecuencia que se

encuentran de manera similar tanto en el caso BF como en el IS, creando un set de datos con mayor base comparativa.

Con el fin de conocer las características de los registros que entregó el sistema y analizar las señales sísmicas después del filtrado, los espectros de respuesta para un amortiguamiento del 2% se presentan en la Figura 5.2.2.1.1-5 para las señales de El Centro y Melipilla.

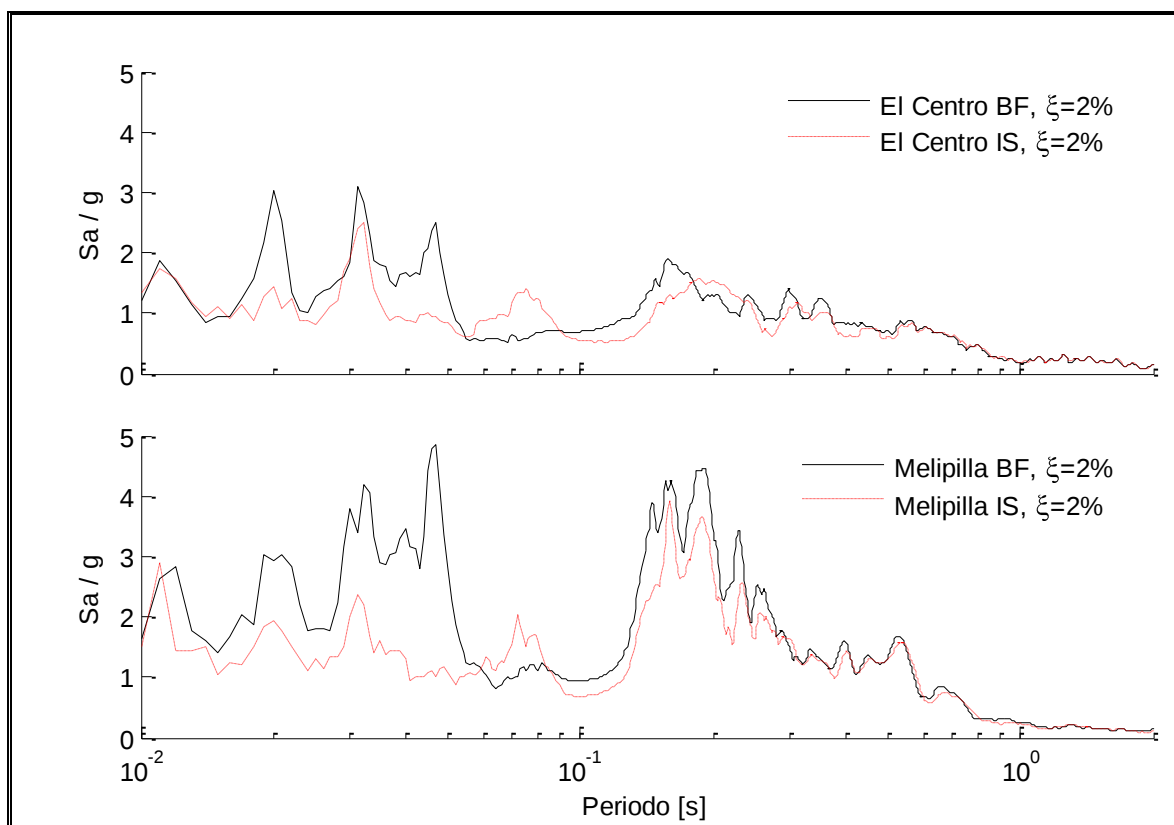


Figura 5.2.2.1.1-5: Espectros de respuesta de las señales empleadas, $\xi=2\%$.

5.2.2.1.2 Comparación de Respuesta Sistemas Base Fija (BF) y Aislado (IS)

Para conocer e ilustrar las diferencias en el comportamiento para los casos BF e IS, se presentará el comportamiento de la respuesta en aceleraciones, presiones y

deformaciones unitarias para los dos registros aplicados, para finalmente estimar los porcentajes de reducción en la respuesta del sistema para el caso IS versus el BF.

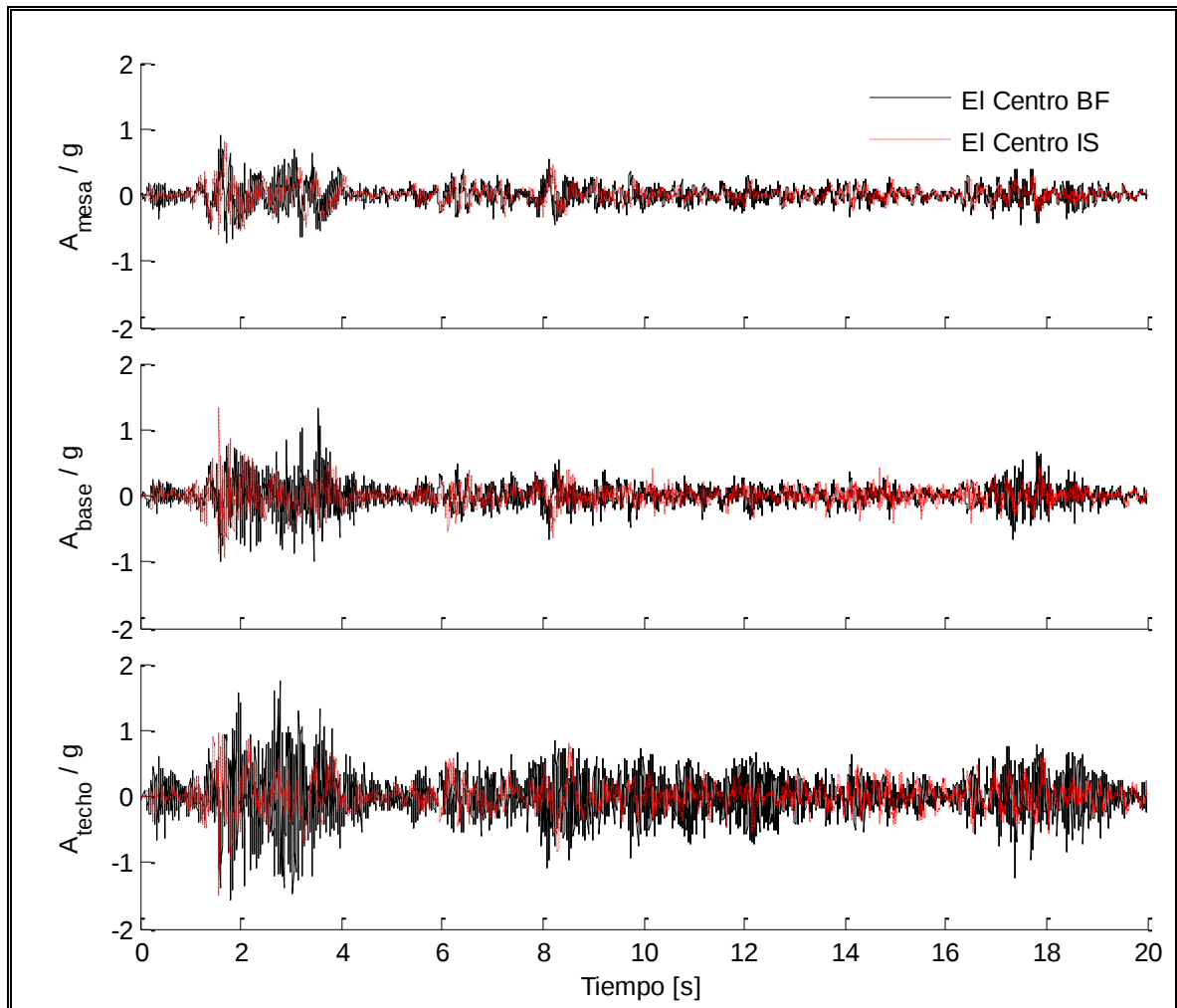


Figura 5.2.2.1.2-1: Excitación y Respuesta en Aceleraciones registro El Centro.

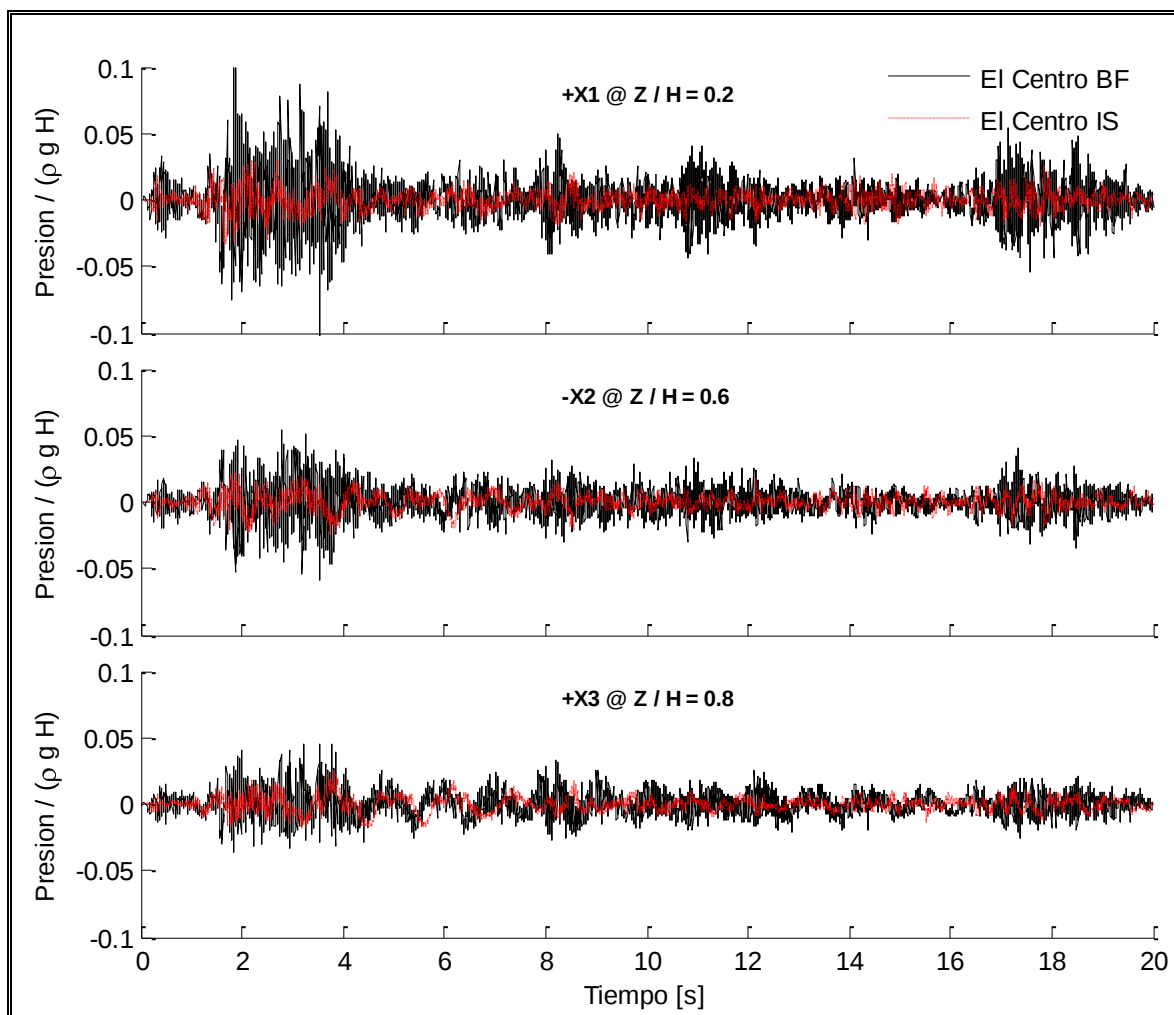


Figura 5.2.2.1.2-2: Respuesta en Presiones Registro El Centro.

De las Figuras 5.2.2.1.2-1 y 5.2.2.1.2-2 es claro que el sistema IS reduce la respuesta con respecto al caso BF, sin embargo para las aceleraciones la reducción no es tan notoria, ya que los valores punta en general se conservan. Para las presiones, la modificación en la respuesta es notoria, resultando presiones 4 veces menores para el caso IS con respecto al caso BF para el sensor ubicado a mayor profundidad $Z/H=0.2$.

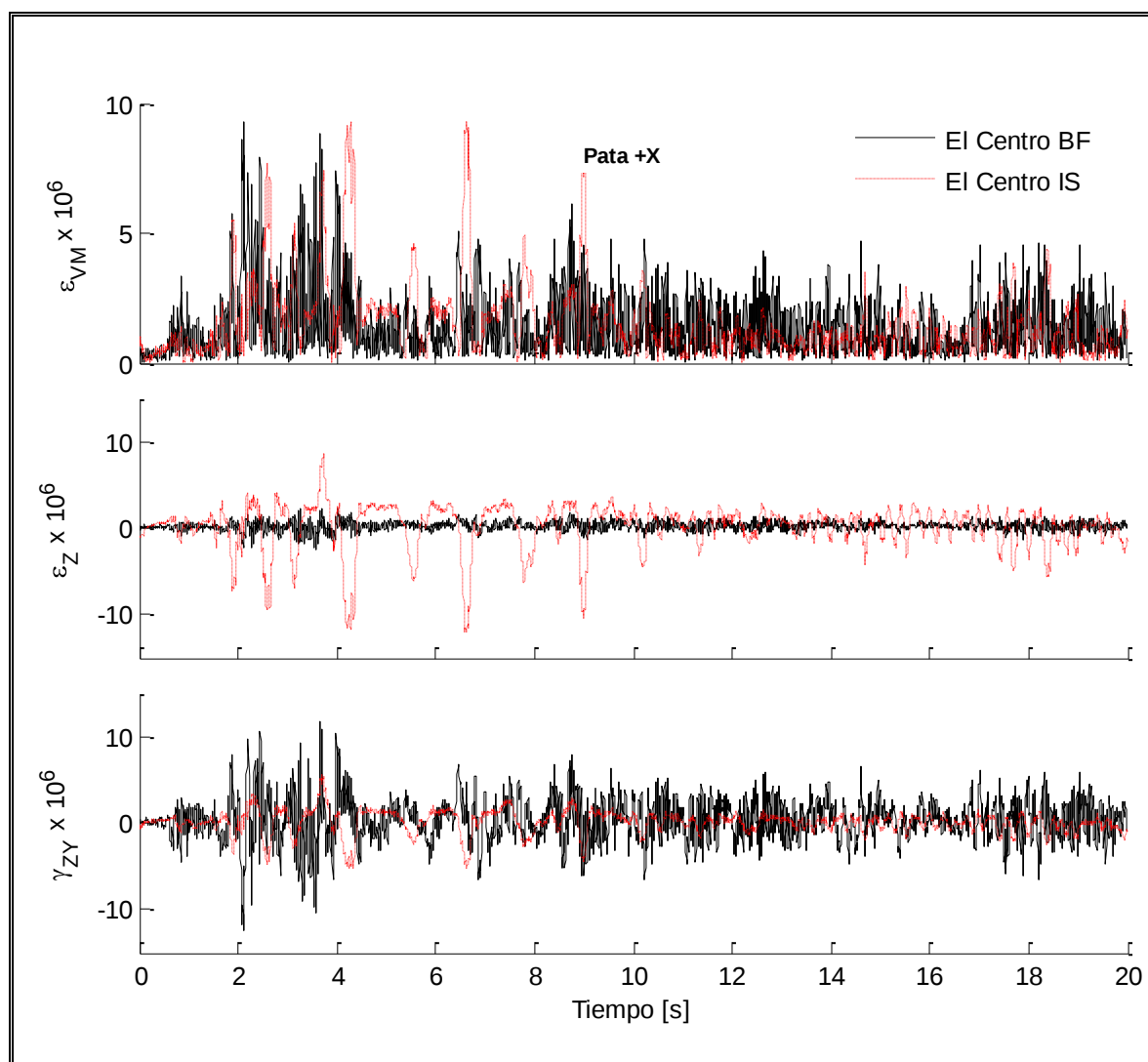


Figura 5.2.2.1.2-3: Deformaciones Unitarias en Roseta Pata +X, Registro El Centro.

Las deformaciones unitarias en la Pata +X, presentadas en la Figura 5.2.2.1.2-3 evidencian una reducción en el valor medio de la deformación de Von Misses, ϵ_{VM} , y en la deformación de corte, γ_{ZY} para el caso IS, lo que contrasta con el aumento de la deformación vertical para el mismo caso. Esto deja en evidencia el cambio en el comportamiento de los soportes que están en la línea de acción del movimiento, los que

pasan a trabajar principalmente a compresión y tracción en la configuración IS, reduciendo el trabajo a corte notoriamente. Otro efecto interesante es que las deformaciones verticales tienen una clara dirección desfavorable, lo que coincide con la direccionalidad observada experimentalmente en los ensayos cíclicos de los dispositivos de aislación, lo que será discutido más adelante.

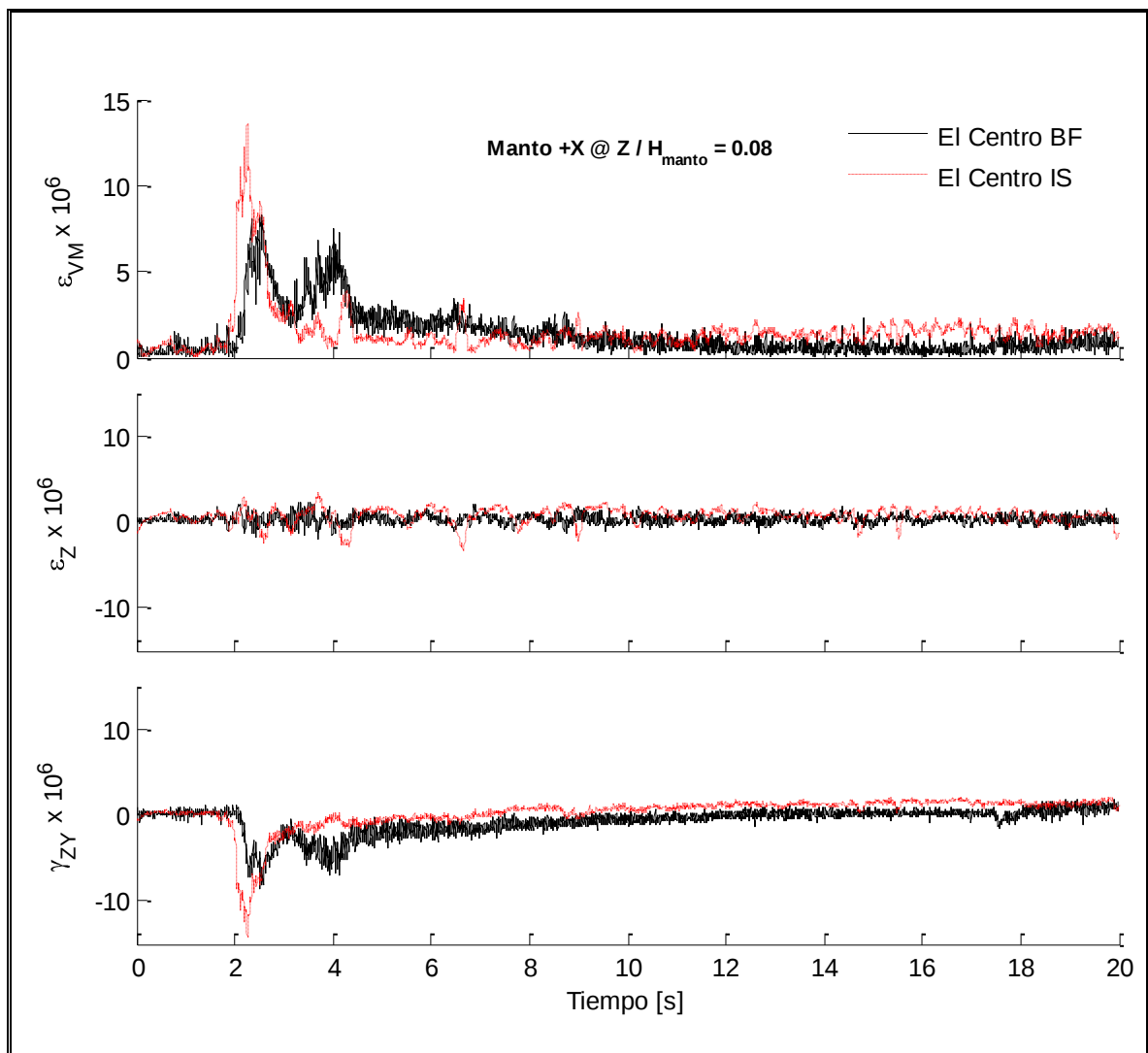


Figura 5.2.2.1.2-4: Deformaciones Unitarias en manto, 10 cm sobre fondo +X, registro El Centro.

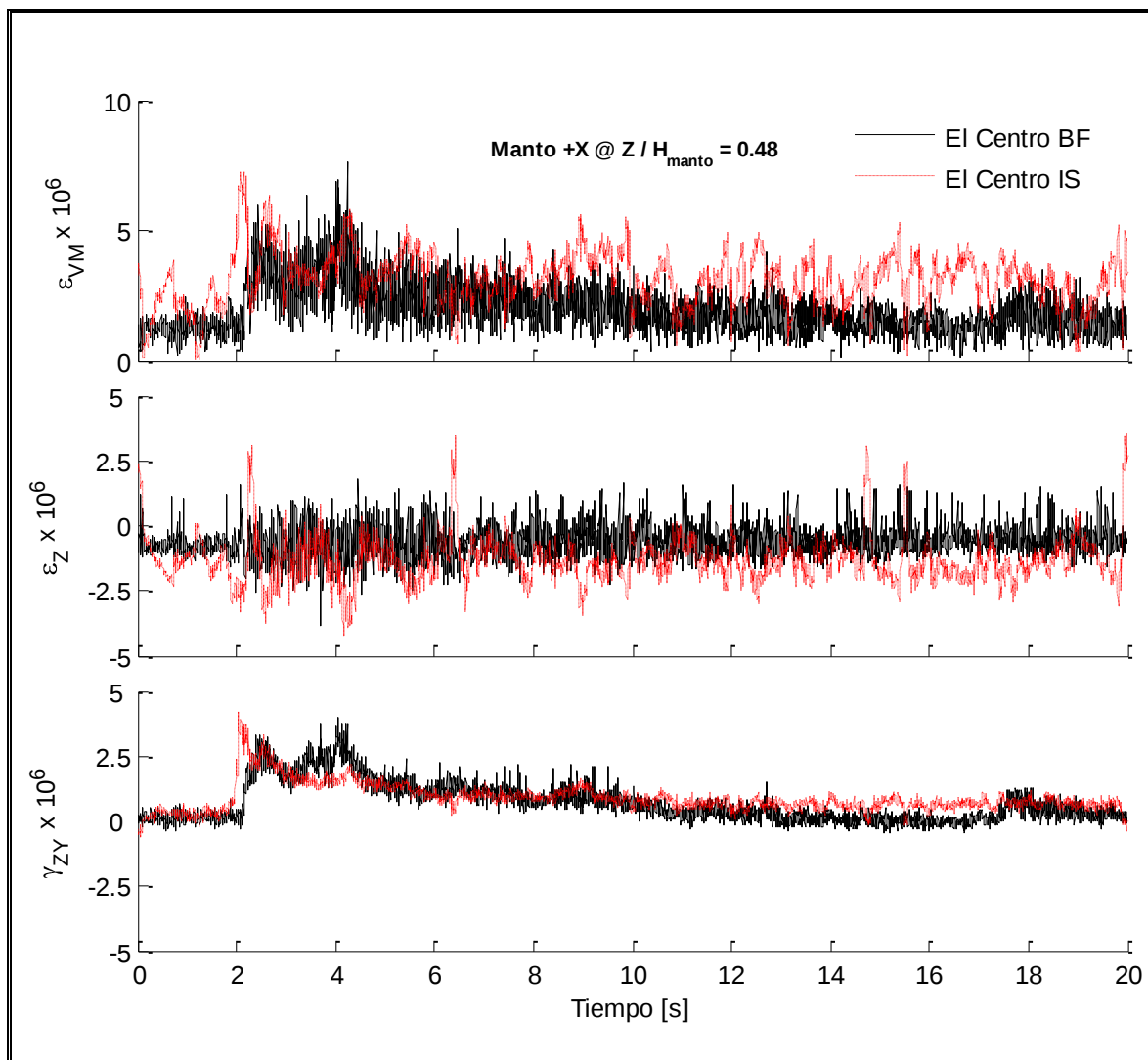


Figura 5.2.2.1.2-5: Deformaciones Unitarias en Manto, 60 cm sobre Fondo +X,
Registro El Centro.

En las Figuras 5.2.2.1.2-4 y 5.2.2.1.2-5 se presentan las deformaciones medidas en el manto en dos niveles diferentes. Lejos de presentar una reducción como era esperado, las deformaciones en el caso IS son iguales o mayores a las del caso BF, presentando claros efectos de acumulación de deformaciones permanentes, como la que

se aprecia a partir del segundo 2. A juicio de los investigadores esta distorsión no es atribuible completamente al sistema de flexibilización basal, sino a variaciones en la fuerza de pretensión aplicada en los apoyos mediante pernos, lo que fue realizado para eliminar juegos existentes en cada apoyo. Debido a los múltiples y amplios desplazamientos impuestos por el registro sísmico es que se producirían variaciones en la fuerza aplicada por los pernos, lo que ya había sido experimentado previamente en los ensayos 3D, observando en ese caso incrementos en las deformaciones de hasta 3 o 4 veces la deformación dinámica experimentada.

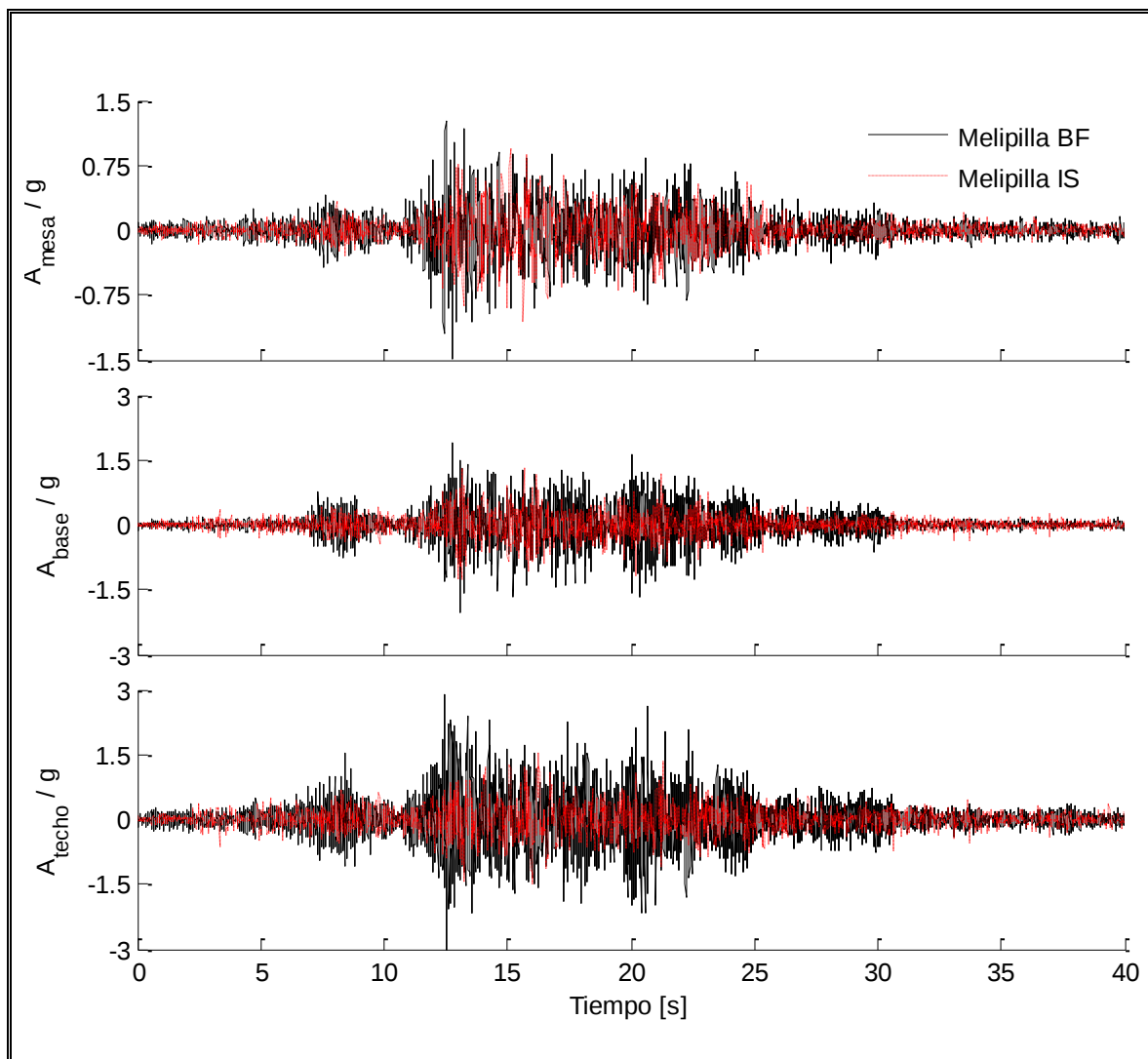


Figura 5.2.2.1.2-6: Excitación y Respuesta en Aceleraciones Registro

Melipilla.

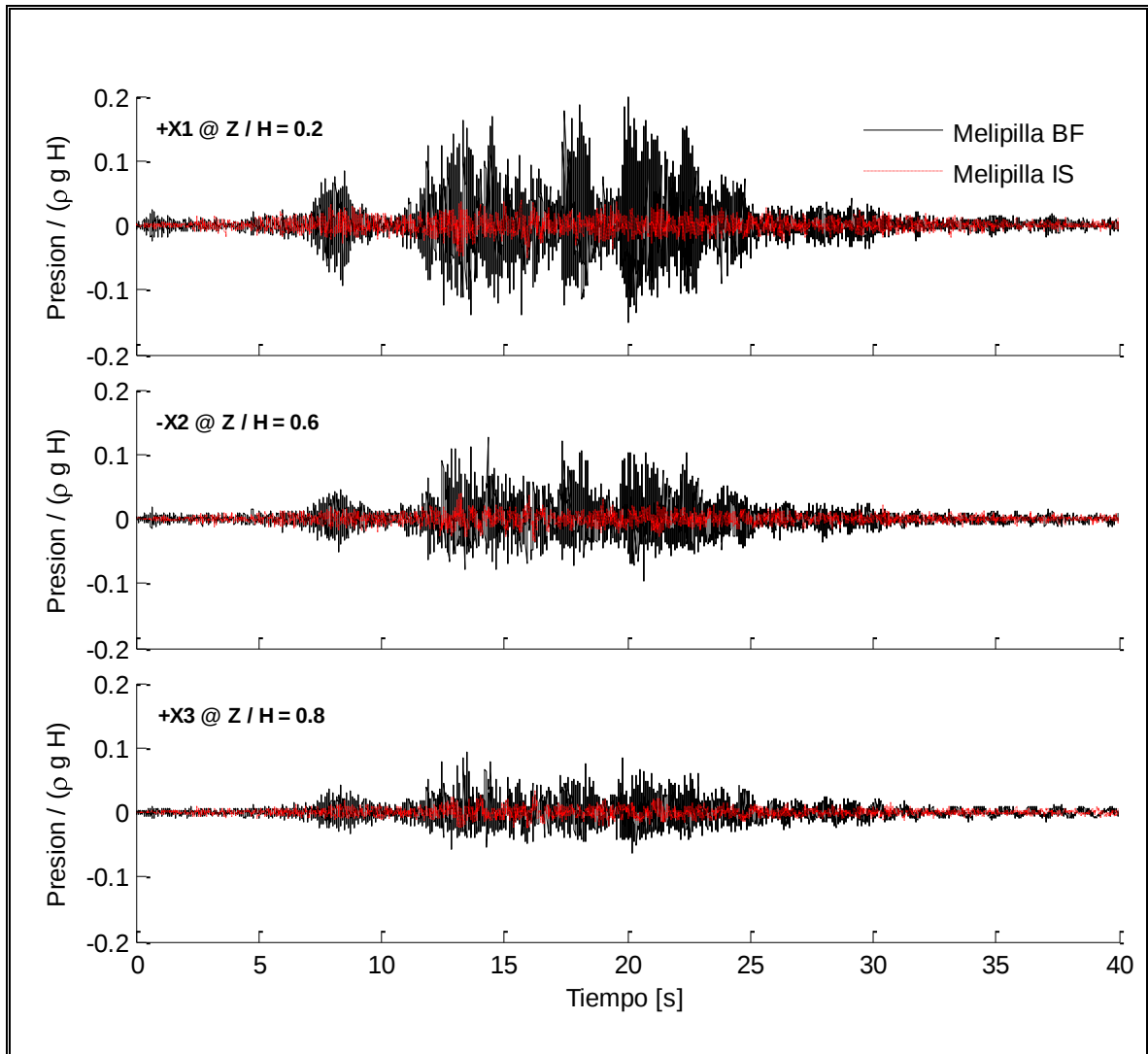


Figura 5.2.2.1.2-7: Respuesta en Presiones Registro Melipilla.

Para el caso del registro de Melipilla, el sistema IS se comporta de mejor manera, reduciendo en más de un 50% las aceleraciones en el techo del estanque, y en alrededor de 30% las aceleraciones en la base del estanque. La reducción en las presiones es aún mayor, alcanzando reducciones en torno al 85% para el caso IS para el sensor de mayor profundidad ($Z/H=0.2$), y entre 60% y 70% para los otros sensores menos profundos.

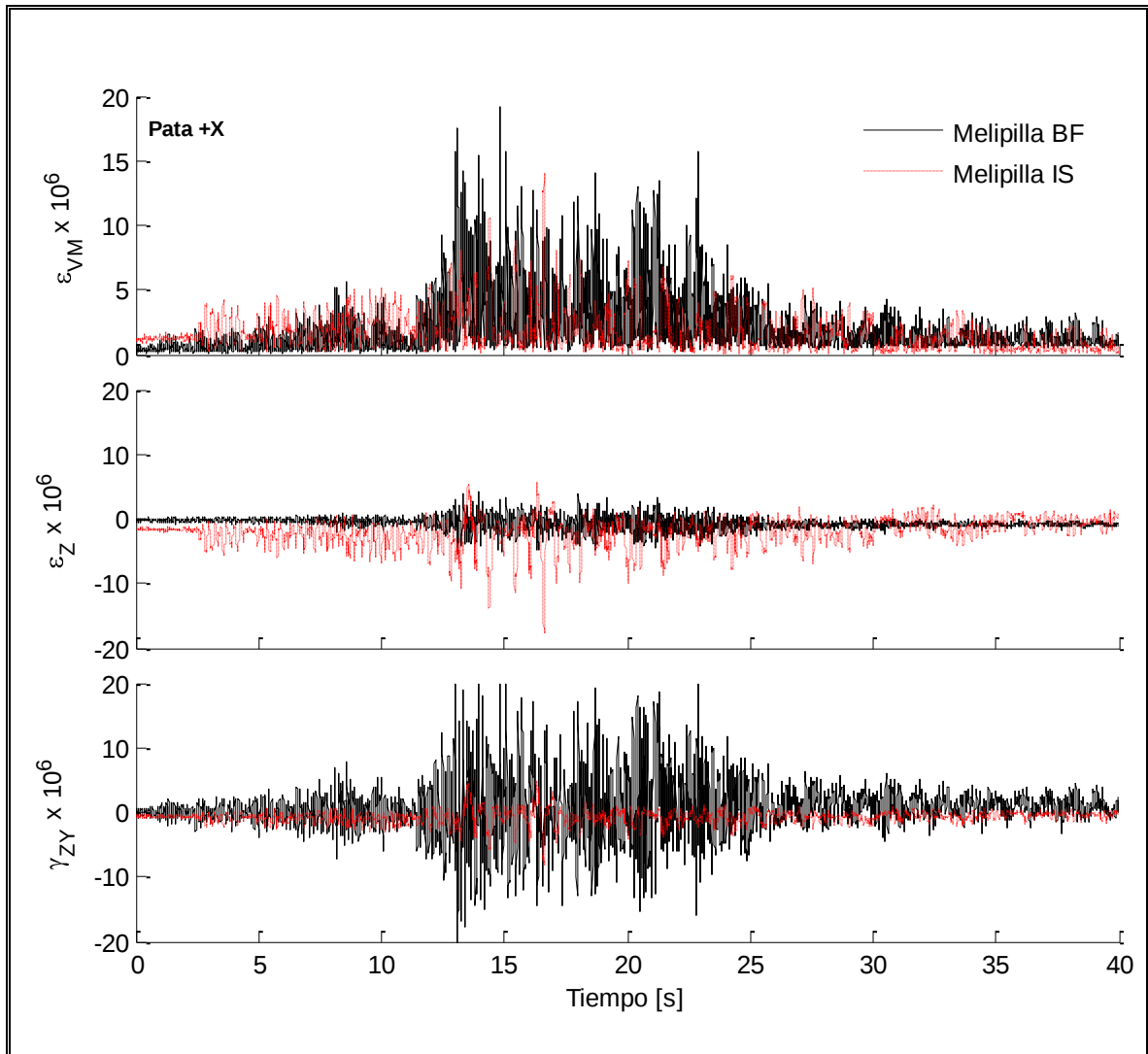


Figura 5.2.2.1.2-8: Deformaciones Unitarias en Roseta Pata +X, registro Melipilla.

Las deformaciones medidas en la pata de apoyo +X presentan un comportamiento mucho mejor comparado con el caso del registro de El Centro, ya que en las deformaciones ε_{eq} se aprecia una reducción de un 20% para el caso aislado entre valores punta comparado con el caso BF, además de que las deformaciones IS son notoriamente menores en el tiempo. La reducción en la deformación γ_{ZY} y el aumento de

ε_z en el caso IS con respecto al caso BF corrobora lo observado para el registro de El Centro. La direccionalidad de las deformaciones verticales se manifiesta aún más que para Melipilla, lo que sin duda indica que si este comportamiento es mejorado en los dispositivos, el comportamiento global del sistema debería mejorar, aumentando las reducciones notablemente.

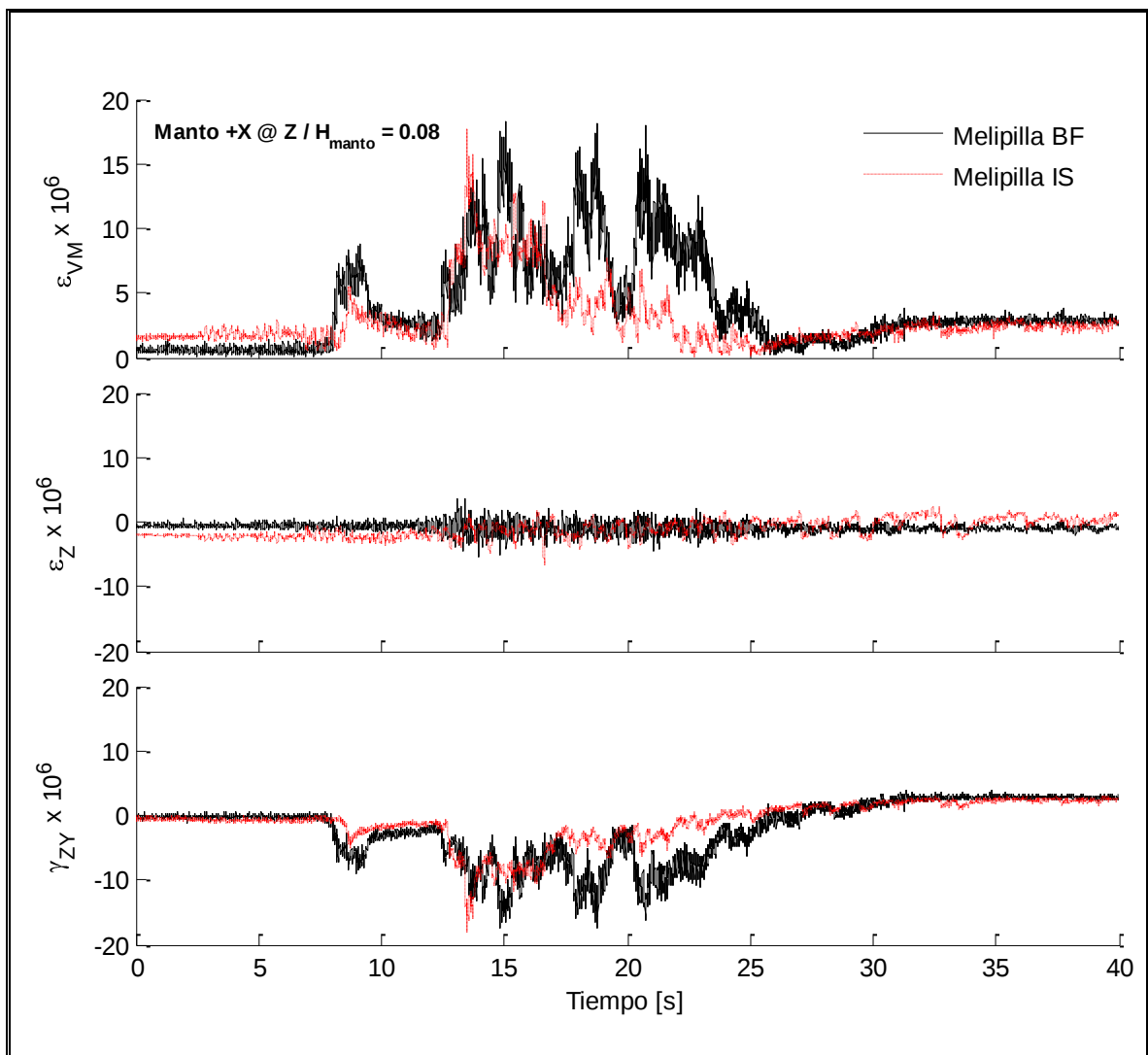


Figura 5.2.2.1.2-9: Deformaciones Unitarias en manto, 10 cm sobre fondo +X, registro Melipilla.

Para las deformaciones unitarias en el manto, al igual que para las registradas para El Centro, la comparación no se puede realizar ya que se presentan grandes saltos, los que también se atribuyen al sistema de pre-tensión en las patas.

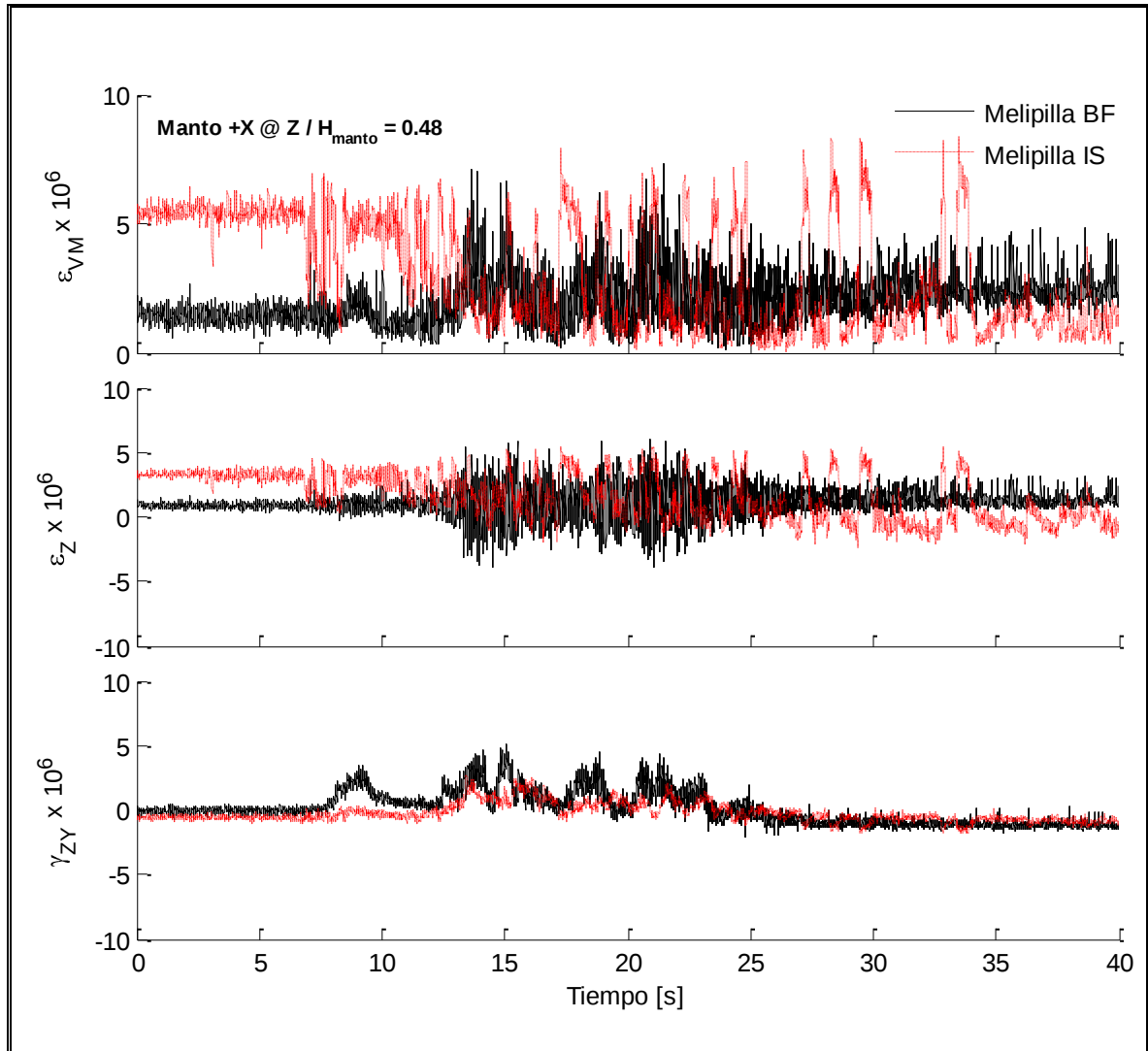


Figura 5.2.2.1.2-10: Deformaciones Unitarias en manto, 60 cm sobre fondo

+X, registro Melipilla.

Finalmente, si bien es cierto que la validez de la comparación planteada en este capítulo para ensayos 1D es discutible tanto a nivel global por los problemas de

comportamiento del sistema de ensayo, como a nivel local en las deformaciones unitarias por las variaciones repentinas y desconocidas de las fuerzas de pretensado en los apoyos, el análisis de los resultados ha entregado información valiosísima respecto al comportamiento del sistema IS y de BF, dejando de manifiesto: a) Reducción notoria en las aceleraciones y presiones para el caso IS con respecto al caso BF y b) Cambio en el comportamiento estructural del sistema, provocando el trabajo mayormente axial de los apoyos en dirección del movimiento en el caso IS, lo que en el sistema BF presenta mayores demandas de deformaciones cortantes.

6 CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo permitió principalmente conocer tanto de manera cualitativa como cuantitativa el comportamiento del sistema con y sin aislamiento rotacional. A continuación se presentan algunas conclusiones sobre la validez de la modelación computacional realizada, sobre el comportamiento de la solución de aislación vertical rotacional implementada y del comportamiento del sistema aislado comparado con el de base fija, para finalmente entregar algunos comentarios y sugerencias para las futuras investigaciones en el tema.

6.1 Conclusiones Generales

Los objetivos principales de esta investigación fueron idear un dispositivo de bajo costo que permitiese la aislación vertical rotacional de los estanques y estudiar su desempeño mediante ensayos dinámicos.

En general se puede afirmar que en este estudio se logró:

- i. Realizar una validación del modelo de elementos finitos a emplear, concluyendo que representa adecuadamente los valores punta y presenta diferencias menores en el comportamiento de sloshing;
- ii. Se idearon y construyeron dispositivos capaces de trabajar de la forma requerida, obteniendo curvas de histéresis con una disipación importante y con la forma buscada;
- iii. Se desarrolló un modelo de elementos finitos para estimar el comportamiento del sistema para ambos casos de apoyo, el que mediante la suposición de niveles de amortiguamiento modal y la superposición modal espectral permitió conocer las diferencias en la distribución de las deformaciones en el estanque tanto cualitativa como cuantitativamente y;

- iv. Se desarrollaron ensayos dinámicos 3D y 1D para conocer las diferencias entre ambas condiciones de apoyo, dejando en evidencia el buen comportamiento del mecanismo de aislación ha quedado comprobado cualitativamente mediante los ensayos 3D, en los cuales se observó la capacidad de resistir acciones combinadas en las 3 direcciones, trabajando sin trabazón alguna. La efectividad del sistema cuantitativamente ha quedado probada mediante la reducción observada en los ensayos 1D, donde se alcanzaron factores de reducción en torno a 50%, 85% y 20% para la respuesta en aceleraciones, presiones y deformaciones respectivamente.

6.2 Sistema de Disipación / Aislación Propuesto

Uno de los aspectos más destacables de este trabajo es la creación de un dispositivo económico capaz de disipar energía por rozamiento y que instalado en las patas soportantes de un estanque permitan la capacidad de generar disipación por Rocking. Si bien es cierto que los dispositivos en general funcionaron de acuerdo a lo requerido, es claro que presentaron algunos comportamientos indeseados, como por ejemplo la direccionalidad en el comportamiento dada por la cuña de disipación por roce, lo que inducía a deformaciones verticales importantes en el apoyo, aumentando las tensiones.

Lo anterior deja de manifiesto que es necesario mejorar este aspecto, ya sea reduciendo la fuerza de roce y/o aumentando las áreas de rozamiento. Otra solución viable es eliminar la forma de cuña para mejorar el comportamiento del sistema, lo que debería eliminar la direccionalidad observada.

6.3 Sistemas de Ensayos Dinámicos

Los problemas que se presentaron a la hora de realizar los ensayos dinámicos tanto para los ensayos 3D como los 1D se debieron fundamentalmente a tres razones, la capacidad de carga de la mesa, la capacidad de los actuadores para reproducir velocidades y fuerzas altas y lo que resultó más complicado, la manifestación de los modos de vibrar del sistema de durante los ensayos o resonancia y/o acople del sistema actuador-especimen.

Sobre la resonancia o acople, este problema es algo que se debe tomar en cuenta al momento de diseñar un aparato de ensayos dinámico, ya que resulta igual o aún más grave que los problemas de resistencia. El problema dinámico de un aparato se convierte en un sistema muy complejo ya que el comportamiento del sistema de ensayos se modifica completamente por la adhesión de una estructura con una masa y una frecuencia propia, la que sin duda afectará al sistema.

Ya que los aparatos de ensayos no son diseñados sólo para una determinada estructura a ensayar, se hace imprescindible realizar múltiples análisis considerando un espectro lo más amplio posible de sistemas acoplados sobre el sistema de ensayos, para de esta manera definir un rango de estructuras o una razón entre la masa y su frecuencia para especificar la capacidad de dicho sistema de ensayos.

6.4 Comentarios para Futura Investigación

Sobre las futuras líneas investigativa a seguir, se pueden subdividir básicamente en dos frentes: Mejorar el modelo numérico de comportamiento del sistema aislado y estudiar y mejorar el comportamiento del sistema de aislación propuesta.

6.4.1 Mejoras al Modelo Numérico

Sin duda que la cantidad de supuestos y simplificaciones adoptadas en el análisis de superposición modal espectral dejan en claro que la validez de este procedimiento es sumamente discutible, especialmente tomando cuenta de las no linealidades impuestas por el sistema de disipación de roce. Bajo lo anterior queda claro que una alternativa de aumentar la precisión del análisis numérico es incluir en primera instancia la no linealidad del comportamiento por roce, y realizar un análisis tiempo-historia para estimar con mayor nivel de detalle el comportamiento del sistema aislado, lo que no fue posible en esta investigación por limitaciones de tipo de análisis con el elemento FLUID80 de ANSYS con que se modeló este problema, el cual no permite comportamiento no lineal en ninguna componente del modelo.

Por otra parte, la modelación simplificada realizada para ambos casos de apoyo, permite un estimador aproximado del factor de reducción, cuya precisión mejoraría si se modifican los dispositivos para evitar el comportamiento con direccionalidad que induce esfuerzos mayores en el sistema, y se estudia con mayor detalle el amortiguamiento modal que provee al sistema. Esto podría ser realizado con ensayos de ruido blanco para posteriormente hacer una identificación de sistemas y también con ensayos de respuesta al impulso.

6.4.2 Mejoras al Sistema de Aislación

Además de implementar cambios menores en el funcionamiento de los dispositivos desarrollados en el presente trabajo, resulta interesante explorar variantes de los mismos con disipación viscosa, lo que no fue desarrollado en este estudio por costo y alcance del mismo. Un disipador viscoso claramente disminuiría las solicitaciones por

cambios en la fuerza de roce, pero por otro lado restringiría quizás en demasía la frecuencia de trabajo del sistema de disipación, al quedar con una rigidez y un amortiguamiento único y definido para cada dispositivo.

Posterior al conocimiento y estudio de soluciones y mejoras, sin duda que el paso a seguir es implementarlos ya sea en estanques existentes, o bien en estanques por fabricar, resultando aún más interesante en los últimos ya que permitiría la reestructuración y la optimización del diseño, pudiendo los aisladores incluso llegar a reemplazar las tradicionales patas.

BIBLIOGRAFIA

American Petroleum Institute (2007). *API Standard 650, Seventh Edition*. Washington D.C., USA: API Publishing Services.

Cerda, Fernando (2006). *Protección Sísmica para Estanques de Acero Inoxidable de Pared Delgada (EAIPD) con apoyos*. Tesis para Optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Hamdan, F.H. (1999). Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, v 53, n 3, 307-333.

Haroun, Medhat. (1983). Behaviour of unanchored oil storage tanks: Imperial Valley earthquake. *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*, v 109, n 1, 23-40.

Haroun, M.; Tayel, M. (1995). Analysis of tank damage during the 1994 Northridge earthquake. *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, n 6, Aug, 1995, p 763

Instituto Nacional de Normalización (2003). *Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. (No. de publicación NCh2369). Santiago, Chile: autor.

Instituto Nacional de Normalización (2003). *Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. (No. de publicación NCh745). Santiago, Chile: autor.

Liu, H., Schubert D. (2002). Water storage tank response to earthquake loads in Alaska. *Cold Regions Engineering Cold Regions Impacts on Transportations and Infrastructure: Proceedings of the Eleventh International Conference*, 2002, p 495-506.

Maleky A., Ziyaeifar M. (2008). Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles. *Journal of Sound and Vibration*, v 311, n 1-2, 372-385.

Malhotra, Praveen K. (1997), New method for seismic isolation of liquid-storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(8), 839-847.

Malhotra, Praveen K. (1998), Seismic Strengthening of Liquid-Storage Tanks with Energy-Dissipating Anchors. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 4, April 1998, pp. 405-414.

Rendel, Michael (2006). *Modelación del Comportamiento Último de Estanques de Acero Inoxidable para Almacenamiento de Vino Mediante un Programa de Elementos Finitos*. Proyecto para Optar al grado de Magíster en Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Shrimali, M.K., Jangid, R.S. (2001), Seismic Response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings. *Engineering Structures*, Volume 24, Issue 7, 909-921