



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS
DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN
BATERÍA DE SILOS INDUSTRIALES
(PARTE II)**

CARLOS PEÑA LOPEZ

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

DIEGO LÓPEZ GARCÍA GONZÁLEZ

Santiago de Chile, Agosto, 2014.

A mis razones de vivir, Ximenita,
Amalita, y quien viene...

AGRADECIMIENTOS

No son pocas las personas que me apoyaron durante estos difíciles años de estudio. Algunos muy importantes ya no me acompañan, como mi madre y mi abuelo. Otros igualmente importantes han llegado, como mi hija Amalia, quien prontamente se convertirá en hermana mayor.

Agradezco de manera muy especial a mi mujer, Ximena, quien sin duda ha sido el pilar más importante en todos los aspectos de mi vida, siendo el académico uno más. Sin su apoyo incondicional y empuje continuo el presente trabajo no hubiera sido posible.

Agradezco profundamente al profesor Diego López-García, quien con su apoyo continuo, buena disposición, y paciencia logró hacer que éste trabajo viera la luz.

Agradezco también a mi socio y fiel amigo Miguel, cuya compañía ha sido la mayor ganancia de estos años de estudio.

Finalmente, agradezco a mi amiga Meli, quien me ayudó de forma concreta y efectiva a completar este trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix
I INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Antecedentes Generales	1
I.2 Objetivos y Alcances.....	5
I.3 Metodología	7
II CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO. 10	10
II.1 Estructura original del edificio en base fija.....	10
II.2 Materiales Estructurales	11
II.3 Características Sísmicas Generales	12
II.4 Cargas Permanentes	12
II.5 Cargas de Material	15
II.6 Combinaciones de Carga.....	18
III ANÁLISIS SÍSMICO CENTRADO DE ESTRUCTURA EN BASE FIJA	21
III.1 Modelo Computacional de Estructura en base fija.....	21
III.2 Solicitaciones generales	29
III.3 Solicitaciones Sísmicas.	32
III.4 Solicitaciones en Silos de Acero	41

IV	ANÁLISIS SÍSMICO CENTRADO DE ESTRUCTURA AISLADA	45
	IV.1 Pre-Diseño de Dispositivos de Aislación	47
	IV.2 Linealización de los dispositivos.....	53
	IV.3 Análisis Modal Espectral	57
	IV.4 Reacciones Basales	64
	IV.5 Diseño Dispositivo de Aislación.....	65
	IV.6 Solicitaciones en Silo de Acero.....	68
V	ANÁLISIS SÍSMICO EXCÉNTRICO DE ESTRUCTURA AISLADA.....	71
	V.1 Solicitaciones de Diseño	71
	V.2 Análisis Sísmico.....	72
	V.3 Reacciones Basales	76
	V.4 Deformaciones Sísmicas	77
	V.5 Verificación Dispositivo de Aislación	78
	V.6 Solicitaciones en Silo de Acero.....	86
VI	ANÁLISIS SÍSMICO OPTIMIZADO DE ESTRUCTURA AISLADA	89
	VI.1 Pre-diseño Sistema de Aislación Optimizado	89
	VI.2 Linealización aproximada de la base aislada	101
	VI.3 Modelo Computacional.....	102
	VI.4 Análisis Sísmico.....	111
	VI.5 Reacciones Basales	114
	VI.6 Deformaciones Sísmicas	115
VII	ANÁLISIS DE RESPUESTAS EN EL TIEMPO	117
	VII.1 Modelo Inelástico No-Lineal de Aisladores Elastoméricos.....	117
	VII.2 Definición de Registros Sísmicos	119
	VII.3 Respuestas en el tiempo	129
VIII	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	186
	VIII.1 Análisis Elásticos Linealizados.....	186
	VIII.2 Análisis Tiempo historia, Comparación entre Casos 1 y 2.....	189
	VIII.3 Análisis Tiempo historia, comparación entre Casos 2 y 3.....	198
IX	CONCLUSIONES.....	207

BIBLIOGRAFÍA.....	212
-------------------	-----

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II-1: Parámetros Sísmicos	12
Tabla II-2: Cubicación Manto de Silo.....	12
Tabla II-3: Cubicación Techo de Silo	13
Tabla II-4: Cubicación Tolva de Silo.....	13
Tabla II-5: Cubicación Losa de soporte de Silos	13
Tabla II-6: Cubicación Vigas Estructurales	14
Tabla II-7: Cubicación Columnas Estructurales	14
Tabla II-8: Peso de Equipos y Anexos	14
Tabla II-9: Datos generales de un Silo.....	16
Tabla II-10: Cubicación de Material para un Silo.....	16
Tabla III-1: Llenado de Silos en condición sísmica.....	32
Tabla III-2: Periodos y Masas Modales	33
Tabla III-3: Parámetros Sísmicos.....	38
Tabla III-4: Reacciones Basales estructura en Base Fija	40
Tabla IV-1: Resumen Aislador Elastomérico	52
Tabla IV-2: Parámetros linealizados para análisis modal espectral.....	54
Tabla IV-3: Periodos y Masas Modales	57
Tabla IV-4: Parámetros Sísmicos para Espectro de Diseño de acuerdo con NCh2745.....	61
Tabla IV-5: Reacciones Basales.....	64
Tabla V-1: Periodos y Masas Modales	74
Tabla V-2: Reacciones Basales.....	76

Tabla V-3: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Interfaz de Aislación.....	77
Tabla V-4: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Techo	77
Tabla V-5: Compresiones de diseño	80
Tabla V-6: Deformaciones de diseño.....	81
Tabla VI-1: Compresiones de Diseño	91
Tabla VI-2: Resumen Características Aisladores Propuestos	100
Tabla VI-3: Resumen Características Aisladores Originales	100
Tabla VI-4: Resumen Propiedades Linealizadas de los Aisladores	101
Tabla VI-5: Periodos y Masas Modales Caso Optimizado	112
Tabla VI-6: Reacciones Basales.....	114
Tabla VI-7: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Interfaz de Aislación	115
Tabla VI-8: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Techo	115
Tabla VII-1: Reacciones Basales Caso Centrado.....	182
Tabla VII-2: Reacciones Basales Caso Excéntrico	182
Tabla VII-3: Reacciones Basales Caso Optimizado	183
Tabla VII-4: Compresiones de Diseño Caso Excéntrico	184
Tabla VII-5: Compresiones de Diseño Caso Optimizado.....	184
Tabla VII-6: Deformaciones de Diseño	185
Tabla VIII-1: Corte Basal de Diseño (t).....	186
Tabla VIII-2: Volumen materiales aisladores (cm ³)	187
Tabla VIII-3: Resumen Parámetros de diseño base aislada Caso 1-2 y Caso 3.....	187
Tabla VIII-4: Corte Basal de Diseño (t).....	188
Tabla VIII-5: Deformación Interfaz Aisladores.....	188
Tabla VIII-6: Deformación Nivel de Techo Silos.....	189

Tabla VIII-7: Corte Basal de Diseño, Aislador N°5	190
Tabla VIII-8: Corte Basal de Diseño, Aislador N°8	190
Tabla VIII-9: Diferencia Porcentual Corte Basal de Diseño.....	191
Tabla VIII-10: Deformación Aislador N°5	191
Tabla VIII-11: Deformación Aislador N°8	192
Tabla VIII-12: Diferencia Porcentual Deformación Aisladores	192
Tabla VIII-13: Reacciones Basales (ton)	193
Tabla VIII-14: Momentos Volcantes en la base.....	193
Tabla VIII-15: Desplazamiento máximo Aislador N°8	196
Tabla VIII-16: Fuerza resultante Aislador N°8.....	196
Tabla VIII-17: Fuerzas instantáneas v/s Fuerzas esperadas.....	197
Tabla VIII-18: Corte Basal de Diseño, Aislador N°5	198
Tabla VIII-19: Corte Basal de Diseño, Aislador N°8	198
Tabla VIII-20: Diferencia Porcentual Corte Basal de Diseño con respecto al Caso 2.....	199
Tabla VIII-21: Deformación Aislador N°5	199
Tabla VIII-22: Deformación Aislador N°8	200
Tabla VIII-23: Reacciones Basales (ton)	200
Tabla VIII-24: Momentos Volcantes en la base.....	201
Tabla VIII-25: Diferencia Porcentual Momentos con respecto al Caso 2	201
Tabla VIII-26: Comparación Amortiguamiento	203
Tabla VIII-27: Compresiones de Diseño	203
Tabla VIII-28: Compresiones de Diseño	204
Tabla VIII-29: Deformaciones de diseño.....	204
Tabla VIII-30: Desplazamiento máximo Aislador N°8	205

Tabla VIII-31: Fuerza resultante Aislador N°8.....	205
Tabla VIII-32: Fuerzas instantáneas v/s Fuerzas esperadas.....	206

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura I.1: Modelo general Batería de Silos en estudio	2
Figura II.1: Modelo General Batería de Silos	10
Figura II.2: Esquema general de silo.....	17
Figura III.1: Modelación de Materiales.....	21
Figura III.2: Modelación de Elementos de Hormigón Armado	22
Figura III.3: Modelación de Manto de Silo.....	24
Figura III.4: Isométrica General de Modelo Estructural	24
Figura III.5: Isométrica General de Modelo Estructural (Extrusión).....	25
Figura III.6: Elevación Longitudinal de Modelo Estructural	25
Figura III.7: Elevación Longitudinal de Modelo Estructural (Extrusión).....	26
Figura III.8: Elevación Transversal de Modelo Estructural	26
Figura III.9: Elevación Transversal de Modelo Estructural (Extrusión).....	27
Figura III.10: Planta de losa de Hormigón Armado.....	27
Figura III.11: Planta de losa de Hormigón Armado (Extrusión).	28
Figura III.12: Modelación de acoplamiento Silo – Mesa.....	29
Figura III.13: Modelación de carga de equipos de techo	30
Figura III.14: Modelación de carga de material en condición operacional.....	31
Figura III.15: Modelación de carga de material en condición sísmica centrada.....	32
Figura III.16: Análisis Modal.....	33
Figura III.17: Primera forma modal $T_y = 0.29$ seg.....	35
Figura III.18: Segunda forma modal $T_x = 0.29$ seg.....	36

Figura III.19: Tercera forma modal $\theta_z = 0.20$ seg.....	37
Figura III.20: Espectro de Diseño NCh2369.....	39
Figura III.21: Modelación de Análisis Espectral	39
Figura III.22: Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección longitudinal.....	42
Figura III.23: Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección transversal.....	43
Figura III.24: Distribución y discretización en altura de Momento flector para máxima acción sísmica	44
Figura IV.1 Modelación para pre-diseño de aisladores.....	48
Figura IV.2 Determinación de Desplazamientos	49
Figura IV.3 Pre-dimensionamiento Aisladores Elastoméricos	51
Figura IV.4 Parámetros de linealización.....	54
Figura IV.5 Modelación de Dispositivos de Aislación para Sismo de Diseño	55
Figura IV.6 Modelación de Dispositivos de Aislación para Sismo Máximo Esperado	56
Figura IV.7 Primera forma modal $T_x = 2.35$ seg.....	58
Figura IV.8 Segunda forma modal $T_y = 2.35$ seg.	59
Figura IV.9 Tercera forma modal $\theta_z = 1.48$ seg.....	60
Figura IV.10 Espectro de Diseño de pseudo-aceleraciones NCh2745.....	62
Figura IV.11 Espectro de Diseño de desplazamientos NCh2745	62
Figura IV.12 Modelación de Análisis Espectral	63
Figura IV.13 Verificación Final Aisladores Elastoméricos	68
Figura IV.14 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección longitudinal.....	69
Figura IV.15 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección transversal.....	69

Figura IV.16 Distribución y discretización en altura de Momento flector para máxima acción sísmica	70
Figura V.1: Modelación de carga de material en condición excéntrica.....	72
Figura V.2: Espectro de Diseño de pseudo-aceleraciones NCh2745.....	73
Figura V.3: Formas modales	75
Figura V.4: Numeración de dispositivos y ubicación de Silos a máxima carga	79
Figura V.5: Datos generales para diseño. Proveedor VULCO.	82
Figura V.6: Aislador elastomérico con corazón de plomo.....	83
Figura V.7 Verificación Final Aisladores Elastoméricos.....	85
Figura V.8 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección longitudinal.	87
Figura V.9 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección transversal.	87
Figura VI.1: Numeración de dispositivos y ubicación de Silos a máxima carga.....	90
Figura VI.2: Definición de grupos de aisladores.....	91
Figura VI.3: Pre-diseño Aisladores Grupo 1.....	93
Figura VI.4: Pre-diseño Aisladores Grupo 2.....	95
Figura VI.5: Pre-diseño Aisladores Grupo 3.....	97
Figura VI.6: Pre-diseño Aisladores Grupo 4.....	99
Figura VI.7: Modelo bilineal.....	102
Figura VI.8: CSI Analysis Reference Manual	103
Figura VI.9: Modelación Aisladores Grupo 1.....	106
Figura VI.10: Modelación Aisladores Grupo 2.....	107
Figura VI.11: Modelación Aisladores Grupo 3.....	109
Figura VI.12: Modelación Aisladores Grupo 4.....	110

Figura VI.13: Espectro de Diseño de pseudo-aceleraciones NCh2745	111
Figura VI.14: Formas modales.....	113
Figura VII.1: Modelación no lineal de dispositivos.....	118
Figura VII.2: Registro longitudinal Lolloe 2010	120
Figura VII.3: Espectros basados en registro longitudinal de Lolloe 2010.....	121
Figura VII.4: Comparación de espectros de pseudoaceleración	121
Figura VII.5: Registro Transversal Lolloe 2010.....	122
Figura VII.6: Espectros basados en registro transversal de Lolloe 2010.....	122
Figura VII.7: Comparación de espectros de pseudoaceleración	123
Figura VII.8: Registro longitudinal Concepción 2010.....	123
Figura VII.9: Espectros basados en registro longitudinal de Concepción 2010	124
Figura VII.10: Comparación de espectros de pseudoaceleración	124
Figura VII.11: Registro Transversal Concepción 2010	125
Figura VII.12: Espectros basados en registro transversal de Concepción 2010	125
Figura VII.13: Comparación de espectros de pseudoaceleración	126
Figura VII.14: Registro longitudinal Constitución 2010	126
Figura VII.15: Espectros basados en registro longitudinal de Constitución 2010.....	127
Figura VII.16: Comparación de espectros de pseudoaceleración	127
Figura VII.17: Registro Transversal Constitución 2010.....	128
Figura VII.18: Espectros basados en registro transversal de Constitución 2010.....	128
Figura VII.19: Comparación de espectros de pseudoaceleración	129
Figura VII.20: Esquema de Puntos de Control	130
Figura VII.21: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Lolloe Dirección Longitudinal	131

Figura VII.22: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Llolleo Dirección Transversal	132
Figura VII.23: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Longitudinal	133
Figura VII.24: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Transversal	134
Figura VII.25: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Longitudinal	135
Figura VII.26: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Transversal	136
Figura VII.27: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Llolleo Dirección Longitudinal	137
Figura VII.28: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Llolleo Dirección Transversal	138
Figura VII.29: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Longitudinal	139
Figura VII.30: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Transversal	140
Figura VII.31: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Longitudinal	141
Figura VII.32: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Transversal	142
Figura VII.33: Historia Deformacion de Corte Aislador 8, Registro Llolleo Dirección Longitudinal	143
Figura VII.34: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Llolleo Dirección Transversal	144
Figura VII.35: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Longitudinal	145
Figura VII.36: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Transversal	146
Figura VII.37: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Longitudinal	147

Figura VII.38: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Transversal	148
Figura VII.39: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Llolleo Dirección Longitudinal	149
Figura VII.40: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Llolleo Dirección Transversal	150
Figura VII.41: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Longitudinal	151
Figura VII.42: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Transversal	152
Figura VII.43: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Longitudinal	153
Figura VII.44: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Transversal	154
Figura VII.45: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Llolleo	155
Figura VII.46: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Llolleo	156
Figura VII.47: Máxima Deformación Compuesta Aislador 8, Registro Llolleo	157
Figura VII.48: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Concepción.....	158
Figura VII.49: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Concepción.....	159
Figura VII.50: Máxima Deformación Compuesta Aislador 8, Registro Concepción.....	160
Figura VII.51: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Constitución	161
Figura VII.52: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Constitución	162
Figura VII.53: Máxima Deformación Compuesta Aislador 8, Registro Constitución.....	163
Figura VII.54: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Llolleo	164
Figura VII.55: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Llolleo	165
Figura VII.56: Máxima Deformación Compuesta Aislador 5, Registro Llolleo	166
Figura VII.57: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Concepción.....	167

Figura VII.58: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Concepción.....	168
Figura VII.59: Máxima Deformación Compuesta Aislador 5, Registro Concepción.....	169
Figura VII.60: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Constitución	170
Figura VII.61: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Constitución	171
Figura VII.62: Máxima Deformación Compuesta Aislador 5, Registro Constitución.....	172
Figura VII.63: Respuesta de cortes basales, Registro Llolleo Longitudinal.....	173
Figura VII.64: Respuesta de cortes basales, Registro Llolleo Transversal.....	174
Figura VII.65: Máximo Corte Compuesto, Registro Llolleo	175
Figura VII.66: Respuesta de cortes basales, Registro Concepción Longitudinal	176
Figura VII.67: Respuesta de cortes basales, Registro Concepción Transversal	177
Figura VII.68: Máximo Corte Compuesto, Registro Concepción	178
Figura VII.69: Respuesta de cortes basales, Registro Constitución Longitudinal	179
Figura VII.70: Respuesta de cortes basales, Registro Constitución Transversal	180
Figura VII.71: Máximo Corte Compuesto, Registro Constitución	181
Figura VIII.1: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Llolleo, Aislador N°5, Caso 2.....	195
Figura VIII.2: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Llolleo, Aislador N°8, Caso 2.....	195
Figura VIII.3: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Llolleo, Aislador N°5, Caso 3.....	202
Figura VIII.4: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Llolleo, Aislador N°8, Caso 3.....	202

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a una continuación de un estudio desarrollado originalmente por el Ingeniero Miguel Medalla. Dicho trabajo se centra en el análisis de la respuesta sísmica esperada de un sistema estructural industrial “real” considerando una solución en base fija y una solución en base aislada con dispositivos elastoméricos.

De manera general, el sistema estructural en estudio está conformado por 6 silos de Acero para almacenamiento de 1000ton de material cada uno, dispuestos sobre un soporte de Hormigón Armado.

Originalmente se evaluó la respuesta probable de la estructura en condición de ausencia de excentricidad en la distribución de la cargas en la superestructura. El trabajo actual explora la posibilidad de la existencia de máximas excentricidades en la distribución de material almacenado en la batería de silos. Además, se propone una alternativa de “optimización” del sistema de aislamiento original, cuyos beneficios de implementación se discuten a la luz de la conveniencia práctica.

Los análisis sísmicos consideraron una verificación de diseño mediante un análisis modal espectral consistente con la normativa nacional vigente. Complementariamente, se realizaron análisis de respuesta en el tiempo para tres pares de registros artificiales compatibles con el espectro elástico de diseño de NCh2745.

Luego de los análisis realizados se concluyó que para el caso estudiado no existe mayor sensibilidad del sistema de aislamiento ante las torsiones en planta que se consideraron, situación que se discute dentro del trabajo. Por otra parte, también se concluye que el sistema de aislamiento original podría ser notablemente más económico, sin embargo la conveniencia de la implementación de esta “mejora” resulta discutible en caso industrial.

ABSTRACT

The study presented in this work is a follow-up of a previous study by former student Miguel Medalla, who analyzed the seismic response of two configurations of a realistic industrial structural system: a fixed-base configuration and a base-isolated configuration with elastomeric bearings.

The industrial system considered in Medalla's study and in the study presented in this work is made up of 6 1000 ton steel silos for bulk material storage, and a supporting reinforced concrete substructure.

Medalla's study evaluated the response of the structure assuming no eccentricity in the distribution of the gravity loads acting on the superstructure. This study, on the other hand, considers the utmost possible eccentricities of such loads. Besides, an optimization of the properties of the isolation system is evaluated, and the convenience of such optimized system over the uniform (i.e., not optimized) system considered by Medalla is discussed.

Both configurations (i.e., fixed-base and base-isolated) of the structure were designed per the current Chilean seismic codes using the modal spectrum analysis method. The seismic response was then more thoroughly evaluated by performing nonlinear time history analysis considering synthetic records compatible with the design spectrum indicated in NCh 2745.

It is concluded that the response of the base-isolated configuration is not sensitive to the gravity load eccentricity. It was also found that an optimized isolation system might be considerably more economical than a uniform system, but might not be practical in industrial structures.

I INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes Generales

El presente trabajo corresponde a una continuación del trabajo desarrollado por el Ingeniero Miguel Medalla Riquelme durante su actividad de graduación de este mismo programa de Magíster Profesional. De manera específica, el trabajo al que nos referimos es el siguiente:

ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS DE AISLACIÓN SÍSMICA EN BATERÍA DE SILOS INDUSTRIALES, Octubre de 2013.

Dicho trabajo da cuenta del análisis de la respuesta sísmica esperada de un sistema estructural industrial “real” considerando una solución en base fija y una solución en base aislada. Se estudia el uso de aisladores elastoméricos del tipo LRB.

De manera general, el sistema estructural en estudio está conformado por 6 silos de Acero para almacenamiento de 1000ton de material cada uno, dispuestos sobre un soporte de Hormigón Armado. Los detalles de la estructura se encuentran en los capítulos siguientes del presente documento. Sin embargo, a modo de referencia la Figura I.1 entrega una descripción esquemática

El análisis de solicitaciones provenientes de del material almacenado se realizada considerando las disposiciones del Eurocódigo 1. Parte 4: Silos y Estanques 2006, normativa que considera entre otras cosas las posibles variaciones en las propiedades del material contenido, como también las distintas distribuciones de presiones internas producto de los posibles canales de flujo que pueden generarse al interior del material durante el proceso de vaciado de los silos.

Las solicitaciones de origen sísmico consideran un análisis modal espectral de acuerdo a la normativa nacional vigente, y complementariamente, un análisis de

respuesta en el tiempo para tres registros artificiales compatibles con el espectro elástico de diseño de NCh2745-2013.

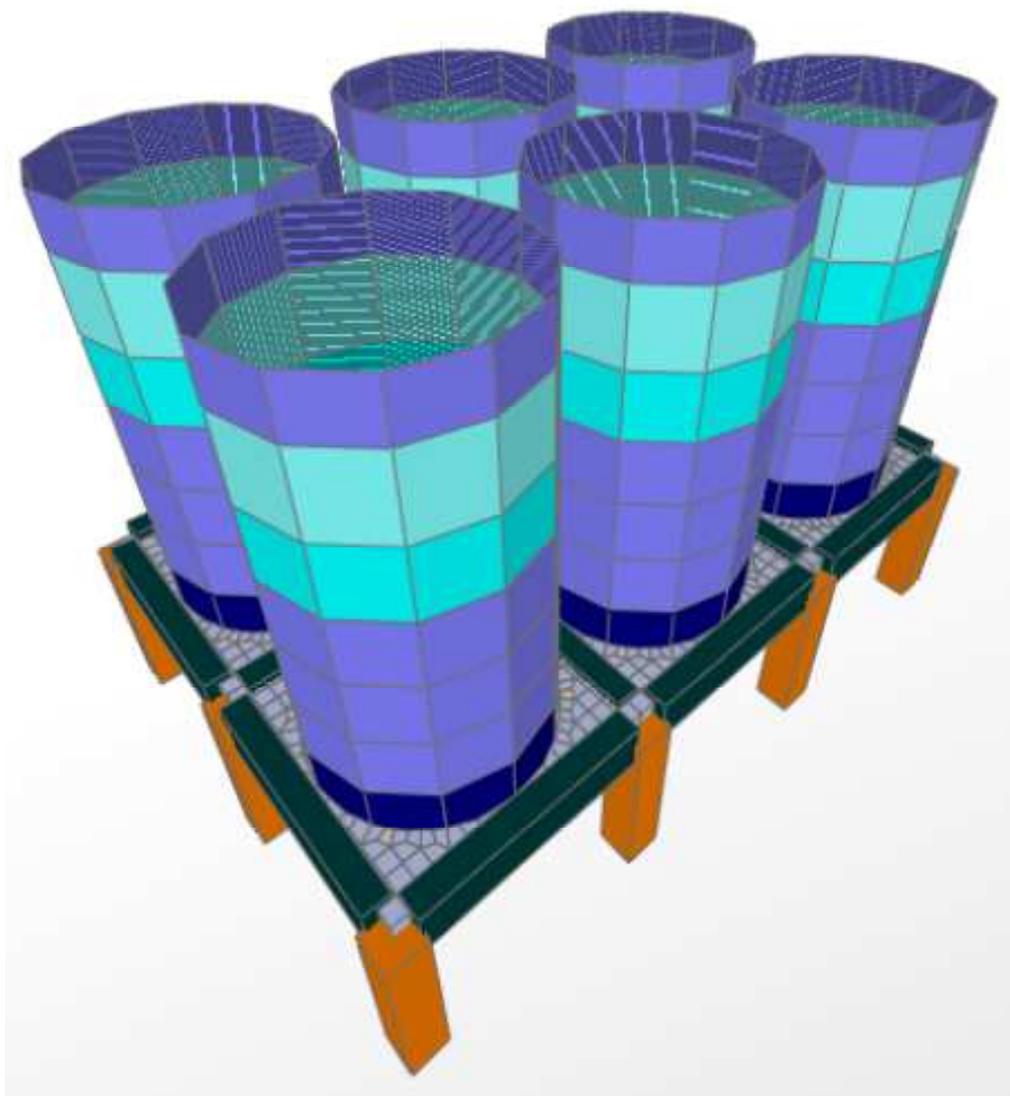


Figura I.1: Modelo general Batería de Silos en estudio

En el trabajo original se obtuvieron reducciones, para la estructura en base aislada, de aproximadamente un 40% en las demandas de diseño y un 90% en las demandas elásticas, en relación a las obtenidas para la estructura en base fija. Complementariamente, los análisis de historia en el tiempo establecieron que puede esperarse un nivel de daño nulo en la estructura de base aislada y un nivel de daño

importante para la solución en base fija, al momento de producirse el sismo de diseño. Sin duda esta situación pone en riesgo el objetivo de continuidad de operación de las plantas industriales.

Los resultados importantes del trabajo original son reproducidos en el presente documento en aquellos casos en que es necesario.

Existen dos aspectos muy importantes que no fueron considerados en el trabajo original y que se explican a continuación.

El primer aspecto corresponde a la posible excentricidad del centro de masas del sistema de silos, cargado para condición sísmica.

Debido a que se trata de una estructura que alberga equipos de capacidades importantes para el almacenamiento de material, cuyos diferentes niveles de llenado controlan totalmente la respuesta sísmica del edificio, se definen los siguientes criterios para los análisis.

Condición operacional: Se considera que los seis silos deben ser capaces de alcanzar un llenado simultáneo hasta su nivel operacional. Esto es, el 80% de su capacidad de llenado volumétrica. Si bien el diseño unitario de cada uno de los silos admite el llenado al máximo de su capacidad volumétrica, no se considera como una condición de diseño para el conjunto, sino como una condición extremadamente eventual que no debiera coincidir con el llenado límite de un segundo silo.

Condición sísmica: Como condición de llenado probable al momento de producirse el sismo de diseño se considera, por motivos de proceso, que los silos en su conjunto no debieran sobrepasar un nivel de llenado medio la mayor parte del tiempo. De esta forma se asume como criterio razonable que la carga total de material en el edificio no supera a la equivalente de los seis silos operando al 50% de su capacidad volumétrica.

El trabajo original analiza el caso en el cual los dos silos centrales se encuentran operando en su nivel máximo (80%) mientras los otros cuatro se encuentran operando al 35%. Claramente esta condición evita la generación de torsiones en planta significativas para el sistema.

Si bien la información de que se dispone indica que la situación anterior debiera ser suficiente para el diseño desde el punto de vista del proceso, el presente trabajo explora la opción de excentricidades naturales máximas del centro de masas del sistema de almacenamiento. Consecuentemente, se analiza el caso límite en el cual dos silos de un extremo se encuentran operando en su nivel máximo (80%) mientras los otros cuatro se encuentran operando al 35%. De esta forma se espera generar la máxima torsión que pudiera experimentar el sistema.

El segundo aspecto corresponde a la posibilidad de uso de diferentes dispositivos de aislamiento elastomérico en cada punto de apoyo.

El trabajo original valida el uso de dispositivos idénticos en cada uno de los puntos de apoyo de la superestructura. Sin embargo, las solicitaciones que se generan en cada uno de ellos al considerar su posición, presentan notables variaciones. Esta situación abre la posibilidad de "optimización" del sistema.

Claramente la definición de "sistema óptimo" conlleva el cumplimiento de criterios que a este momento podrían considerarse arbitrarios. Sin embargo, en esta ocasión se ha considerado como mejora al sistema propuesto originalmente (aisladores idénticos) la disminución del consumo de goma y de plomo. Es así como nos centramos en el uso de aisladores más pequeños en donde sea posible y en la distribución del elemento disipador de energía (corazón de plomo) en el sector perimetral de la estructura. Esto último tiene la intención conceptual de controlar mejor la torsión natural de la superestructura.

I.2 Objetivos y Alcances

Objetivos

Un primer objetivo del presente estudio es definir si el sistema original de aislamiento de base incorporado a la estructura cuenta con las capacidades necesarias para soportar una sollicitación sísmica de máxima excentricidad, no considerada en el diseño original, y que consecuencias podrían esperarse a nivel de la superestructura.

Un segundo objetivo es definir la conveniencia de utilizar un sistema de aislamiento “optimizado” en relación al original desde el punto de vista del costo directo del sistema.

Como objetivo complementario se plantea el desarrollo de cada análisis y cada toma de decisión desde un punto de vista fuertemente realista y práctico. Esto es, sin desmedro de la calidad técnica de los cálculos a realizar se privilegia la factibilidad y simplicidad constructiva de las soluciones por sobre la rigurosidad teórica que pudiera no aportar información adicional al problema de implementación.

Esto último cobra especial importancia en nuestro país y en la época actual, ya que si bien las tecnologías tanto de aislamiento de base como de disipación de energía a nivel mundial han dejado de ser consideradas una innovación, contando incluso con normativa técnica específica que regula su aplicación, en Chile continúan interpretándose como una “complicación innecesaria de los diseños” o una “complicación innecesaria de la construcción”. Claramente estas últimas afirmaciones no cuentan con argumentos válidos que las apoyen, no podría ser de otra forma, pero contribuyen a que en nuestro país se haya retrasado la entrada masiva de estas tecnologías tanto al área industrial como habitacional. En esta línea, un aporte real a la profesión y al beneficio de los clientes, es mostrar como la ingeniería de aplicación de estas tecnologías puede llegar a ser tan simple o compleja como lo es el diseño tradicional de estructuras sismo-resistentes, sin necesidad de

entrar en las complicaciones adicionales inherentes a la rigurosidad de la investigación académica o de laboratorio.

Alcances

En razón de que el trabajo actual consiste principalmente en una continuación de un trabajo existente y aprobado, o un “comentario” al mismo, todos aquellos resultados o análisis que ya se encuentran documentados en el trabajo original, únicamente son reproducidos en este documento, en aquellos casos en que sea necesario. Sin embargo queda fuera del alcance del presente estudio la validación documentada de forma explícita de dichos resultados o conclusiones.

Por lo anterior, la presente entrega cuenta con los siguientes alcances explícitos.

- Modelación matemática para la incorporación de los sistemas de aislación de base que sean necesarios.
- Evaluación de solicitaciones sísmicas para diseño mediante análisis modal espectral considerando linealización equivalente de los sistemas aislados.
- Evaluación de solicitaciones de diseño a nivel del sistema aislado y de los dispositivos individuales representativos.
- Evaluación de solicitaciones de diseño para sectores representativos de la superestructura.
- Comparaciones explícitas entre solicitaciones del mismo tipo para las diferentes alternativas de estructura a analizar.
- Evaluación de respuesta probable de los diferentes sistemas mediante análisis Tiempo Historia No lineal para registros compatibles con el espectro de diseño correspondiente.

Quedan fuera del alcance del presente documento las siguientes actividades.

- Modelación física o ensayos de laboratorio de los dispositivos en estudio.
- Verificación estructural del edificio principal o equipos que alberga.
- Evaluación de dispositivos de aislamiento alternativos, tales como péndulos friccionales, fricción seca, etc.

I.3 Metodología

En atención a los objetivos que persigue el presente estudio se decidió seguir una secuencia de actividades bien planificada y tendiente a prevenir la repetición de trabajo, situación que se considera crítica si se piensa en procedimientos claros y de aplicación práctica concreta.

Si bien los capítulos definidos en el presente documento se han estructurado de manera tal que el lector pueda evaluar claramente los resultados que corresponden a cada una de las estructuras definidas sin necesidad de revisar la totalidad del documento, no necesariamente representan de manera estricta el orden secuencial en que las actividades fueron desarrolladas.

Actividades desarrolladas en orden secuencial.

Actividades previas:

- Recopilación y estudio de bibliografía importante en relación al diseño de dispositivos de aislamiento de base.
- Estudio detallado de normativa nacional aplicable enfocado en la detección de opciones viables para la aplicación práctica de los dispositivos en el área industrial.

- Desarrollo de planillas de diseño-verificación de dispositivos típicos de acuerdo a la normativa nacional vigente y al estado del arte de la profesión.
- Estudio de valores típicos para las propiedades de diseño de los dispositivos de aislamiento elastomérico y verificación de disponibilidad de los productos elegidos en el mercado nacional.
- Estudio de condiciones y requisitos constructivos típicos, orientado a la incorporación en el diseño de soluciones conocidas (estándares) para la simplificación de las maniobras de montaje de los dispositivos.
- Estudio de trabajo original desarrollado por el Ingeniero Miguel Medalla.
- Verificación de costos y plazos de acuerdo a cantidades preliminares, en orden a definir la factibilidad real del uso de los dispositivos. Paralelamente, verificación de disponibilidad y costos para la realización de ensayos de los dispositivos en laboratorios nacionales.

Una vez completas las actividades anteriores se concluyó que la instalación de los dispositivos preliminares (originales) del caso en estudio es absolutamente factible de ser ejecutada en estructuras sismo-resistentes industriales chilenas con la utilización tanto de proveedores de aisladores elastoméricos como de laboratorios de certificación nacionales, dentro de plazos competitivos. Con este resultado positivo se procede a desarrollar los nuevos análisis propuestos para la estructura.

- Desarrollo de modelo matemático “general” para la estructura, enfocado en la evaluación de las respuestas de diseño a nivel del sistema aislado.

- Incorporación de elementos con características lineales y no lineales destinados a modelar el comportamiento de los aisladores elastoméricos ubicados dentro de la estructura.
- Definición y asignación de estados de cargas estáticos comunes a todas las opciones de aislamiento de base.
- Evaluación (mediante planillas de verificación) de múltiples opciones de dispositivos posibles para cada caso y elección de la opción considerada adecuada a la luz de la información preliminar disponible.
- Determinación de solicitaciones sísmicas de diseño mediante el uso de análisis modal espectral considerando linealización equivalente de los dispositivos elastoméricos.
- Validación de los dispositivos propuestos y evaluación de solicitaciones generales en la estructura.
- Análisis-procesamiento de los tres pares de registros, compatibles con el espectro de diseño, a ser usados en los análisis Tiempo Historia No Lineales.
- Análisis de Historia en el Tiempo de cada uno de los casos de estudio con el fin de validar la metodología utilizada (análisis modal espectral con linealización equivalente de los dispositivos) para el diseño.

II CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO

II.1 Estructura original del edificio en base fija

El sistema estructural en estudio corresponde a una batería de 6 Silos cilíndricos de acero destinados al almacenamiento de Cal. Cada uno de ellos cuenta con una capacidad máxima de 1000ton. Dichos Silos se encuentran dispuestos originalmente sobre una mesa de soporte de hormigón armado conformada por marcos de hormigón armado resistentes a momento.

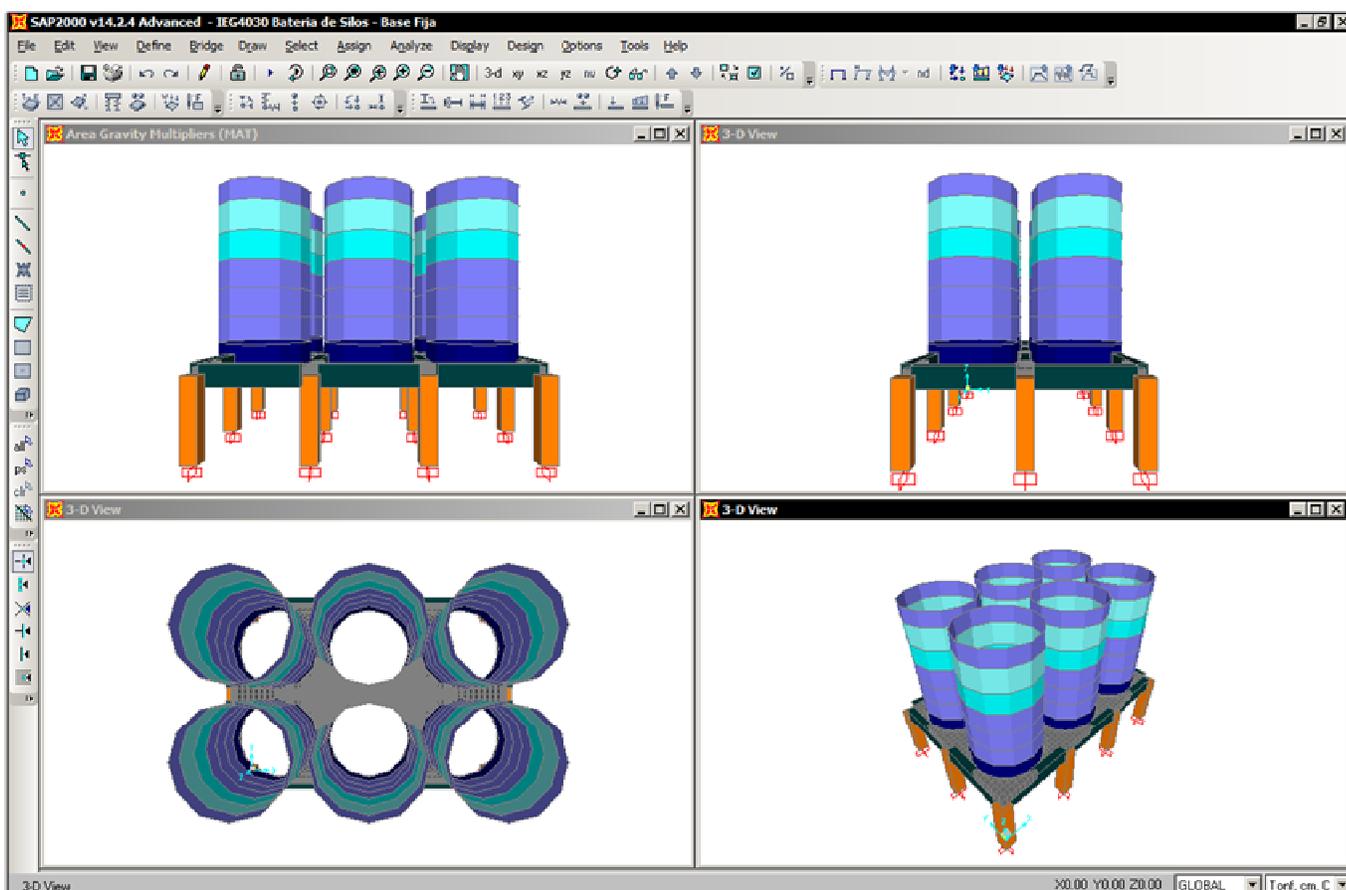


Figura II.1: Modelo General Batería de Silos

Los Silos de acero presentan un diámetro de 7m y una altura de cilindro de 12m. Respecto al techo, este corresponde a un cóno auto-soportado con una inclinación de

30°. La descarga se realiza de forma centrada a través de una tolva cónica inferior con una inclinación de pared de 60°.

La mesa de hormigón presenta espesores de losa de 1m y una altura de 6m respecto al nivel de la losa de fundación. Los marcos de hormigón armado están compuestos por vigas de 800/1500 [mm] y columnas de 1200/1200 [mm] con espaciamiento a eje de 8m.

El sistema de fundación corresponde a una losa o mat de fundación de 27.6m x 19.6m con un espesor de 1m.

II.2 Materiales Estructurales

En general, la estructura ha sido diseñada para ser construida con los materiales de uso más común y disponibles en el mercado nacional.

Hormigón Estructural	:	Grado H30 $f'_c : 0.25 \text{ ton/cm}^2$ $E_c : 238 \text{ ton/cm}^2$ $\gamma_{HA} : 2.50 \text{ ton/m}^3$
Acero de refuerzo	:	A630-420H $F_y : 4.2 \text{ ton/cm}^2$ $F_u : 6.3 \text{ ton/cm}^2$ $E_s : 2040 \text{ ton/cm}^2$
Acero Estructural	:	ASTM A36 $F_y : 2.53 \text{ ton/cm}^2$ $F_u : 4.08 \text{ ton/cm}^2$ $E_s : 2040 \text{ ton/cm}^2$

$$\gamma_s: 7.85 \text{ ton/m}^3$$

II.3 Características Sísmicas Generales

Las características sísmicas del lugar específico de emplazamiento de la estructura, de acuerdo con NCh2369 (y NCh2745) son las siguientes.

Tabla II-1: Parámetros Sísmicos

Factor de Importancia	I	1.0	Categoría C2
Aceleración Efectiva	A_o/g	0.4	Zona Sísmica 3
Suelo	T_s	II	Tipo de Suelo
	T'	0.35	Seg.
	N	1.33	-
Coefficiente sísmico mínimo	C_{min}	0.10	
Coefficiente sísmico vertical	C_v	0.27	

II.4 Cargas Permanentes

A continuación se presentan aquellas solicitaciones verticales que no presentan grandes variaciones en el tiempo, por ejemplo los pesos propios de la estructura y equipos.

Peso propio de Acero Estructural de Silos

Tabla II-2: Cubicación Manto de Silo

Diámetro Silo	7.00	m
Altura Manto	11.62	m
Espesor Manto (promedio)	13.0	Mm
Área Manto	255.54	m^2

Volumen Manto	3.32	m ³
Peso Unitario Acero	7.85	t/m ³
Peso Propio Manto	26.08	ton

Tabla II-3: Cubicación Techo de Silo

Ángulo de Inclinación	30.00	°
Altura Techo	2.02	m
Espesor Techo	12.0	mm
Área Techo	44.44	m ²
Volumen Techo	0.53	m ³
Peso Propio Techo	4.19	ton

Tabla II-4: Cubicación Tolva de Silo

Altura Tolva	5.00	m
Ángulo de Inclinación	60.00	°
Espesor Tolva	12.00	mm
Área Tolva	76.97	m ²
Volumen Tolva	0.92	m ³
Peso Propio Tolva	7.25	ton

Finalmente el Peso Estructural de cada Silo es: 37.5 ton

Peso propio Soporte de Hormigón Armado

Tabla II-5: Cubicación Losa de soporte de Silos

Espesor	1.00	m
Largo	24.00	m
Ancho	16.00	m
Diámetro agujero	7.00	m
Área	153.09	m ²

Volumen	153.09	m ³
Peso Unitario HA	2.50	t/m ³
Peso Propio Losa.	382.73	ton

Tabla II-6: Cubicación Vigas Estructurales

Ancho	0.80	m
Altura	1.50	m
Largo	115.60	m
Área	1.20	m ²
Volumen	138.72	m ³
Peso Propio Vigas	346.80	ton

Tabla II-7: Cubicación Columnas Estructurales

Ancho	1.20	m
Altura	1.20	m
Largo	72.00	m
Área	1.44	m ²
Volumen	103.68	m ³
Peso Propio Columnas	259.20	ton

Finalmente el Peso de los elementos de Hormigón Armado es: 988.7 ton

Peso de Equipos y Anexos.

Sobre el techo de los Silos se cuenta con algunos equipos mecánicos, así como también una plataforma de mantención:

Tabla II-8: Peso de Equipos y Anexos

Ventilador	0.3	ton
Colector de Polvo	10.5	ton

Peso propio plataforma	2.0	ton
------------------------	-----	-----

Peso Total de Equipos y Anexos sobre cada Silo es: $PP_{Eq} = 12.8\text{ton}$

II.5 Cargas de Material

Como ya se ha dicho, la estructura alberga equipos de capacidades importantes, cuyos diferentes niveles de llenado controlan la respuesta sísmica del edificio. Por este motivo, se definen los siguientes criterios para los análisis.

Condición operacional

Los seis silos deben ser capaces de alcanzar un llenado simultáneo hasta un nivel operacional del 80% de su capacidad volumétrica máxima.

Cada uno de los silos debe admitir el llenado al máximo de su capacidad volumétrica de manera aislada. No se considera como una condición de diseño para el conjunto.

Condición sísmica

Como condición de llenado probable al momento de producirse el sismo de diseño se considera, por motivos de proceso, que los silos en su conjunto no debieran sobrepasar un nivel de llenado equivalente a los seis silos operando al 50% de su capacidad volumétrica.

Como una forma de llevar esta condición a un nivel de exigencia razonablemente máxima, se ha decidido considerar que dos de los silos se encuentran en su nivel máximo operativo, 80%, mientras los otros cuatro se encuentran operando al 35% de su capacidad volumétrica.

Capacidades a almacenamiento

A continuación se presentan las características de un silo de manera aislada, de acuerdo al esquema presentado en la Figura II-2.

$$\text{Peso específico Cal } \gamma_{\text{cal}} = 1.9 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Ángulo Reposo Cal } \phi = 34^\circ$$

Tabla II-9: Datos generales de un Silo

d_c	7.00	m	Diámetro interno
B	30	°	Ángulo inclinación Techo
H2	2.02	m	Altura Techo
H1	11.62	m	Altura del Manto
h_o	0.79	m	Distancia entre superficie media y punto de contacto con pared
H2'	2.36	m	Altura pila superior
H1'	11.23	m	Altura recta del Cilindro cargado
h_c	12.01	m	Altura de carga hasta la zona de transición (H + h_o)
Z_1	6.95	m	Altura zona de transición
Z_2	20.6	m	Altura de techo

Tabla II-10: Cubicación de Material para un Silo

Llenado	V	PP _{mat}
	m ³	Ton
100%	537	1021
80%	430	817
50%	269	510
35%	188	357

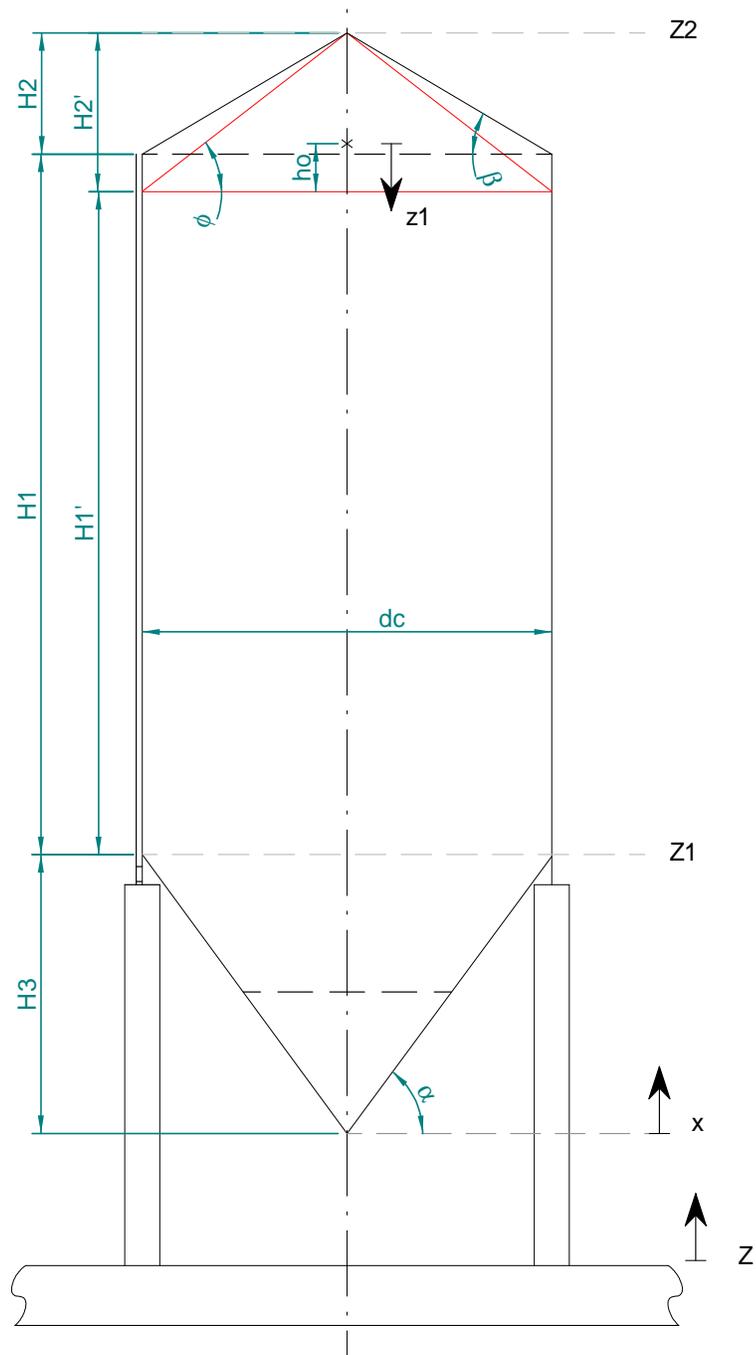


Figura II.2: Esquema general de silo

Peso de Material Total en condición operacional: 4902ton

Peso de Material Total en condición sísmica: 3060ton

Considerando la enorme diferencia entre las magnitudes de las cargas de tipo muerto que existen en la estructura y las cargas de operación, es claro que el nivel de llenado de los Silos y su distribución espacial dentro de los mismos controla la respuesta de la estructura.

II.6 Combinaciones de Carga

Compatibilizando los requisitos establecidos por la normativa nacional vigente y la práctica profesional en consistencia con los métodos de diseño utilizados comúnmente para la verificación y aceptación del diseño de cada tipo de estructura, se puede llegar a varios grupos de combinaciones de cargas cuyos objetivos difieren. Si bien el presente estudio se centra en la verificación y aceptación de la respuesta de diseño de aisladores elastoméricos, a continuación se indican las combinaciones base que debieran ser verificadas para cada caso de estudio.

Normativa nacional específica a considerar:

- NCh3171 Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de cargas.
- NCh2369 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- NCh2745 Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica.

Estados de carga a combinar:

- D = Cargas Muertas (Peso Propio, Carga de Equipos, etc.).
- CM_{100%} = Carga de Material con Silos al 100% de su capacidad máxima.
- CM_{80%} = Carga de Material con Silos al 80% de su capacidad máxima.
- CM_{50%} = Carga de Material equivalente a los Silos llenos hasta el 50% de su capacidad máxima.
- Ex_{80%} = Solicitación sísmica en dirección longitudinal consistente con CM_{80%}

$E_{y80\%}$	=	Solicitud sísmica en dirección transversal consistente con $CM_{80\%}$
$E_{x50\%}$	=	Solicitud sísmica en dirección longitudinal consistente con $CM_{50\%}$
$E_{y50\%}$	=	Solicitud sísmica en dirección transversal consistente con $CM_{50\%}$
$E_{v50\%}$	=	Solicitud sísmica en dirección vertical consistente con $CM_{50\%}$

Si bien para los casos en estudio en estricto rigor existen solicitaciones de viento, no serán incluidas en razón de las elevadas solicitaciones sísmicas que presenta la estructura, las cuales resultan órdenes de magnitud superiores a aquellas que podría originar el viento. Consecuentemente, no se espera que la incorporación de dichas solicitaciones constituya un aporte para el diseño en el escenario de estudio.

Combinaciones para verificación de Manto de Acero Estructural de Silos

ASD₁	1.0	D	+	1.0	$CM_{100\%}$		
ASD_x	1.0	D	+	1.0	$CM_{80\%}$	+ 0.75	$E_{x80\%}$
ASD_y	1.0	D	+	1.0	$CM_{80\%}$	+ 0.75	$E_{y80\%}$

Combinaciones para verificación de Estructura de Soporte de Hormigón Armado

LRFD₁	1.2	D	+	1.6	$CM_{80\%}$		
LRFD_x	1.2	D	+	1.2	$CM_{50\%}$	+ 1.4	$E_{x50\%}$
LRFD_y	1.2	D	+	1.2	$CM_{50\%}$	+ 1.4	$E_{y50\%}$

Combinaciones para verificación de Estabilidad y Tensiones de contacto de Losa de Fundación

EST₁	1.0	D	+	1.0	$CM_{80\%}$		
EST_{x+1}	1.0	D	+	1.0	$CM_{50\%}$	+ 1.0	$E_{x50\%}$ + 1.0 $E_{v50\%}$
EST_{x-1}	1.0	D	+	1.0	$CM_{50\%}$	+ 1.0	$E_{x50\%}$ - 1.0 $E_{v50\%}$
EST_{y+1}	1.0	D	+	1.0	$CM_{50\%}$	+ 1.0	$E_{y50\%}$ + 1.0 $E_{v50\%}$
EST_{y-1}	1.0	D	+	1.0	$CM_{50\%}$	+ 1.0	$E_{y50\%}$ - 1.0 $E_{v50\%}$

Combinaciones para verificación de Aisladores Elastoméricos

A_1	1.0	D	+	1.0	$CM_{80\%}$		
A_{x1}	1.2	D	+	1.2	$CM_{50\%}$	+	1.0 $E_{x50\%}$
A_{x2}	0.8	D	+	0.8	$CM_{50\%}$	+	1.0 $E_{x50\%}$
A_{y1}	1.2	D	+	1.2	$CM_{50\%}$	+	1.0 $E_{y50\%}$
A_{y2}	0.8	D	+	0.8	$CM_{50\%}$	+	1.0 $E_{y50\%}$

En este último set de combinaciones para verificación de los dispositivos de aislación es conveniente precisar que debe utilizarse las solicitaciones sísmicas provenientes del análisis para la condición de sismo máximo (M_M) de acuerdo con NCh2745, mientras en todos los demás casos deben utilizarse solicitaciones provenientes de análisis consistentes con el sismo de diseño (probabilidad de excedencia de 10% en el periodo de exposición, 50 años como estándar).

III ANÁLISIS SÍSMICO CENTRADO DE ESTRUCTURA EN BASE FIJA

En este capítulo se analiza la respuesta sísmica a nivel de diseño de la estructura en base fija considerando las disposiciones de la Norma Chilena NCh2369.Of2003 “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”.

III.1 Modelo Computacional de Estructura en base fija

Para la modelación matemática de la estructura se utilizó el software SAP2000 Versión Advanced 14.2.4. A continuación se describen las características principales consideradas en la modelación estructural.

Definición de Materiales

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for a concrete material. The 'General Data' section includes 'Material Name and Display Color' set to 'H30', 'Material Type' set to 'Concrete', and 'Material Notes' with a 'Modify/Show Notes...' button. The 'Weight and Mass' section shows 'Weight per Unit Volume' as 2.5E-06 and 'Mass per Unit Volume' as 2.549E-09, with 'Units' set to 'Tonf, cm, C'. The 'Isotropic Property Data' section includes 'Modulus of Elasticity, E' (238.751), 'Poisson's Ratio, U' (0.2), 'Coefficient of Thermal Expansion, A' (9.900E-06), and 'Shear Modulus, G' (99.4796). The 'Other Properties for Concrete Materials' section includes 'Specified Concrete Compressive Strength, f_c' (0.25) and a checkbox for 'Lightweight Concrete'. At the bottom, there is a 'Switch To Advanced Property Display' checkbox and 'OK' and 'Cancel' buttons.

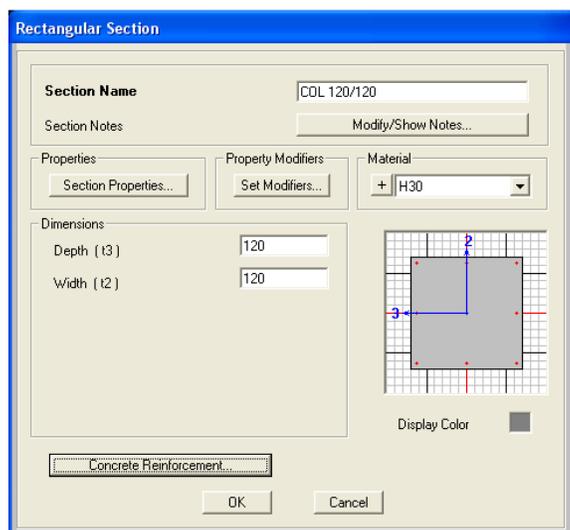
Definición de Hormigon Estructural

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for a steel material. The 'General Data' section includes 'Material Name and Display Color' set to 'A36', 'Material Type' set to 'Steel', and 'Material Notes' with a 'Modify/Show Notes...' button. The 'Weight and Mass' section shows 'Weight per Unit Volume' as 7.849E-06 and 'Mass per Unit Volume' as 8.004E-09, with 'Units' set to 'Tonf, cm, C'. The 'Isotropic Property Data' section includes 'Modulus of Elasticity, E' (2040), 'Poisson's Ratio, U' (0.3), 'Coefficient of Thermal Expansion, A' (1.170E-05), and 'Shear Modulus, G' (784.6154). The 'Other Properties for Steel Materials' section includes 'Minimum Yield Stress, F_y' (2.53), 'Minimum Tensile Stress, F_u' (4.08), 'Effective Yield Stress, F_{ye}' (2.53), and 'Effective Tensile Stress, F_{ue}' (4.08). At the bottom, there is a 'Switch To Advanced Property Display' checkbox and 'OK' and 'Cancel' buttons.

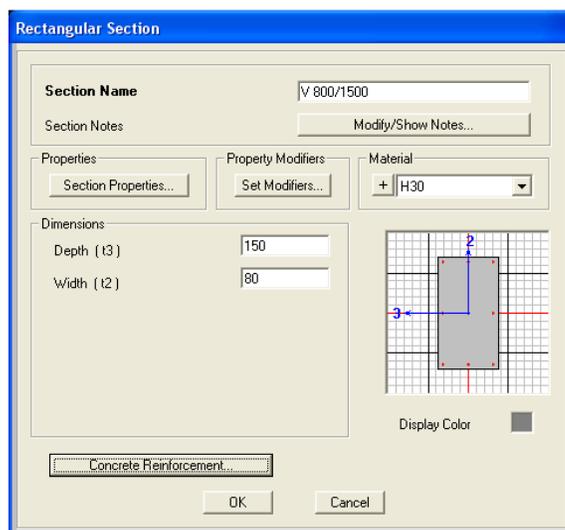
Definición de Acero Estructural

Figura III.1: Modelación de Materiales

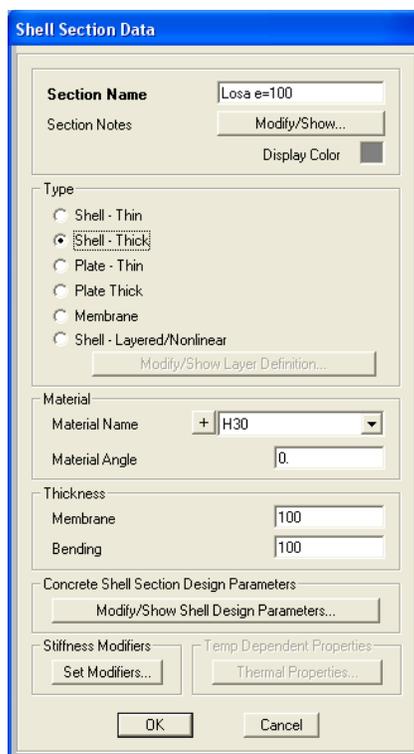
Definición de Secciones



Columna de HA 120 x 120 [cm]



Viga de HA 150 x 80 [cm]

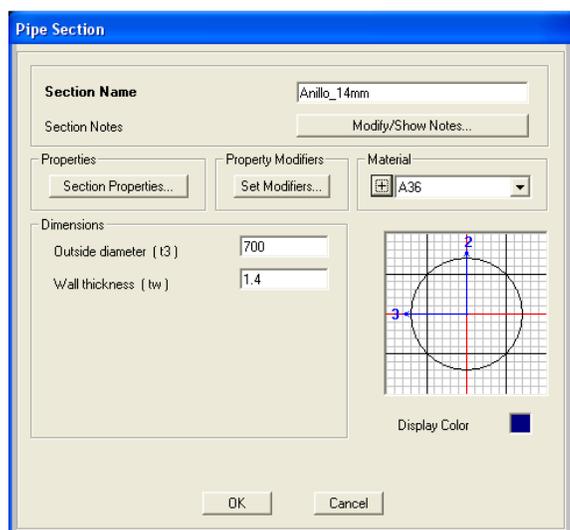


Losa de HA e = 100 [cm]

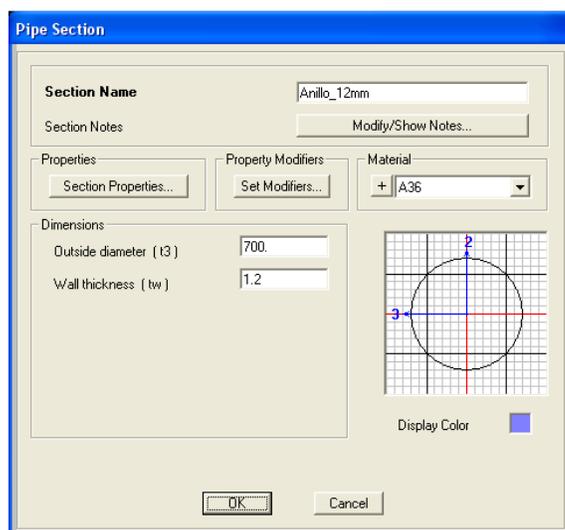
Figura III.2: Modelación de Elementos de Hormigón Armado

Notar que las secciones de hormigón armado han sido modeladas asumiendo secciones brutas y sin incluir posibles efectos de flexibilización por agrietamiento. Además, los elementos de área que modelan la losa de apoyo de los silos incorporan deformaciones de corte.

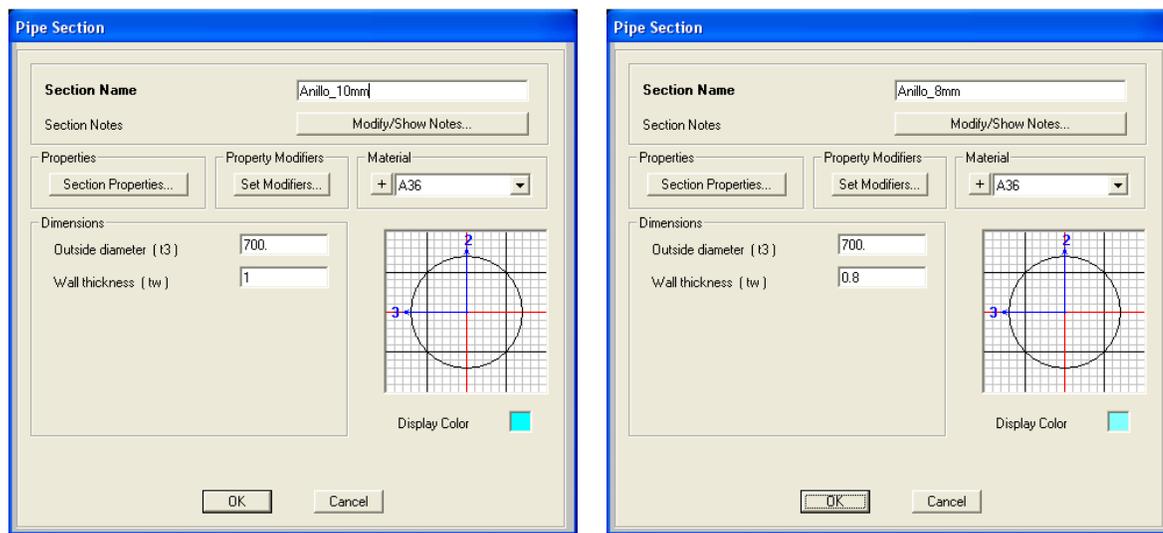
Para la modelación de los silos de acero se consideró lo siguiente. En virtud de que no se requiere conocer el estado tensional local del manto derivado de las cargas de llenado o vaciado, incluso de las tensiones locales flexurales derivadas del efecto sísmico, se decide modelar únicamente la rigidez global que aporta el manto en su trabajo de compresión-tracción vertical. Consistentemente, para efectos de nuestro estudio los silos son modelados como elementos “esbeltos de tipo frame”.



Anillo $D = 700\text{cm}$ $e = 14\text{mm}$



Anillo $D = 700\text{cm}$ $e = 12\text{mm}$



Anillo $D = 700\text{cm}$ $e = 10\text{mm}$

Anillo $D = 700\text{cm}$ $e = 8\text{mm}$

Figura III.3: Modelación de Manto de Silo

Modelo Estructural general

A continuación se presentan imágenes del modelo estructural a utilizar.

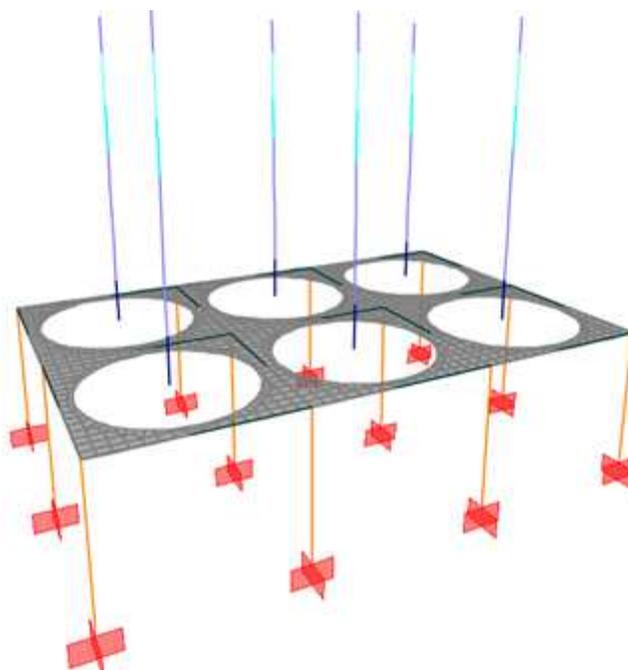


Figura III.4: Isométrica General de Modelo Estructural

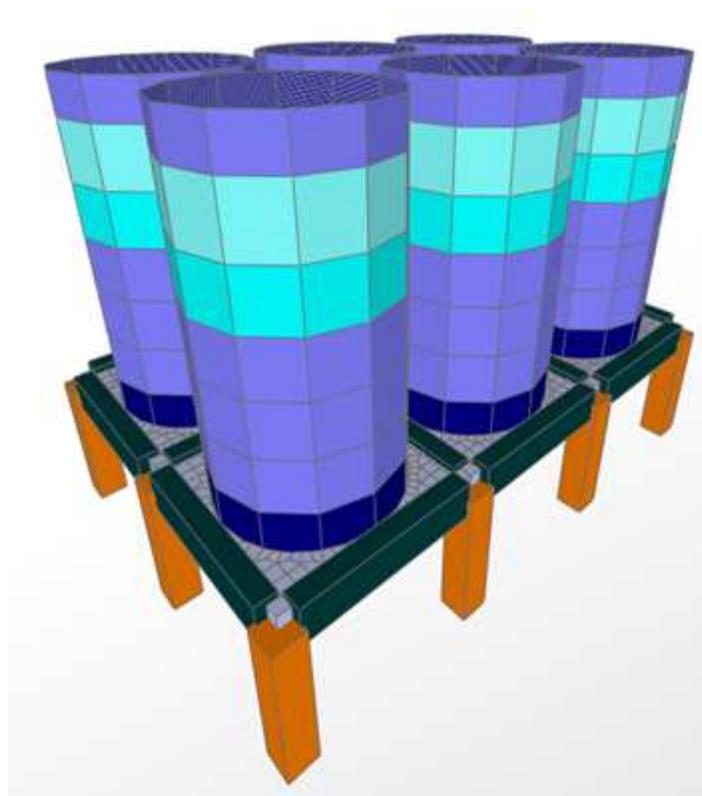


Figura III.5: Isométrica General de Modelo Estructural (Extrusión)

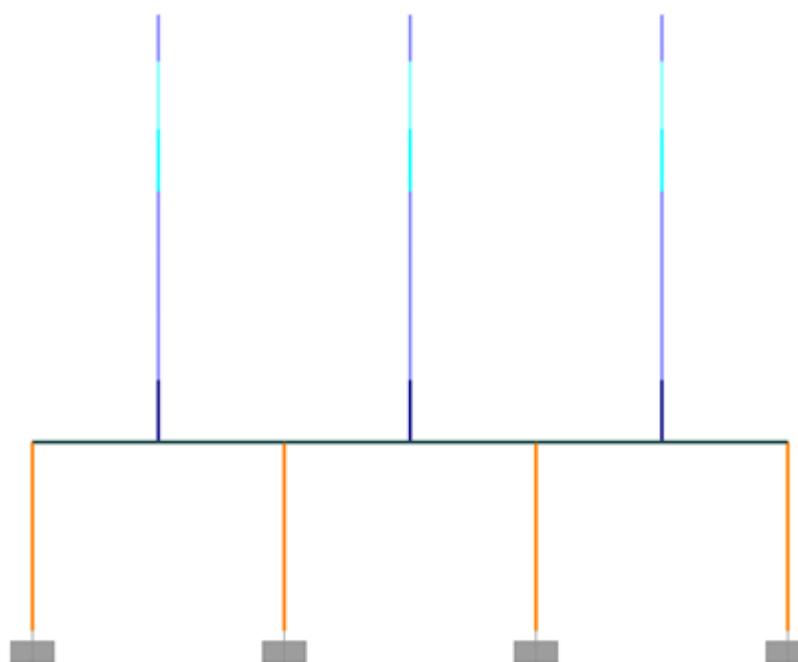


Figura III.6: Elevación Longitudinal de Modelo Estructural

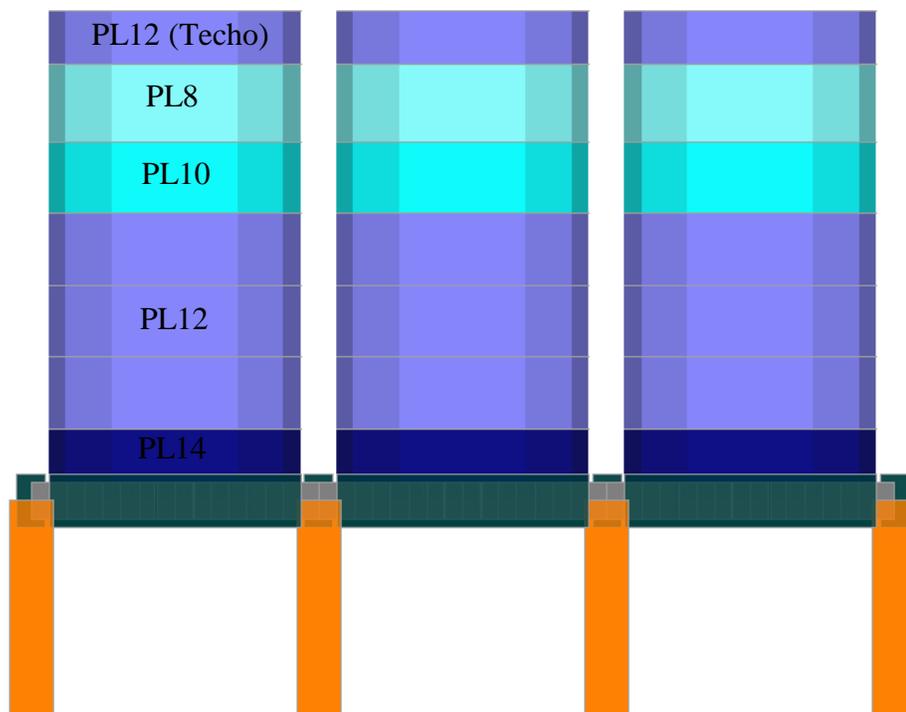


Figura III.7: Elevación Longitudinal de Modelo Estructural (Extrusión)

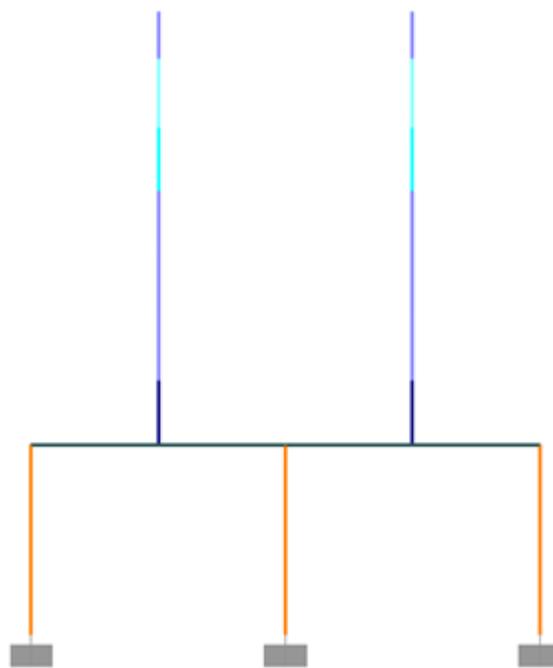


Figura III.8: Elevación Transversal de Modelo Estructural

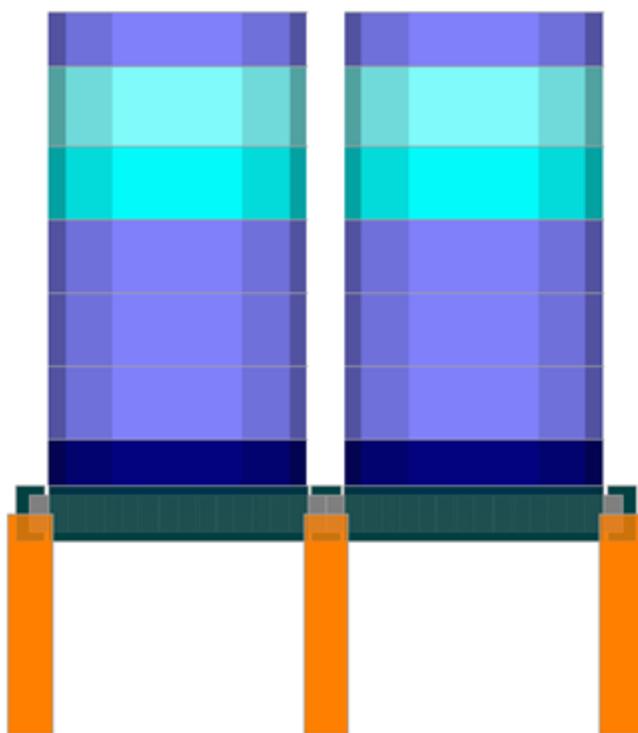


Figura III.9: Elevación Transversal de Modelo Estructural (Extrusión)

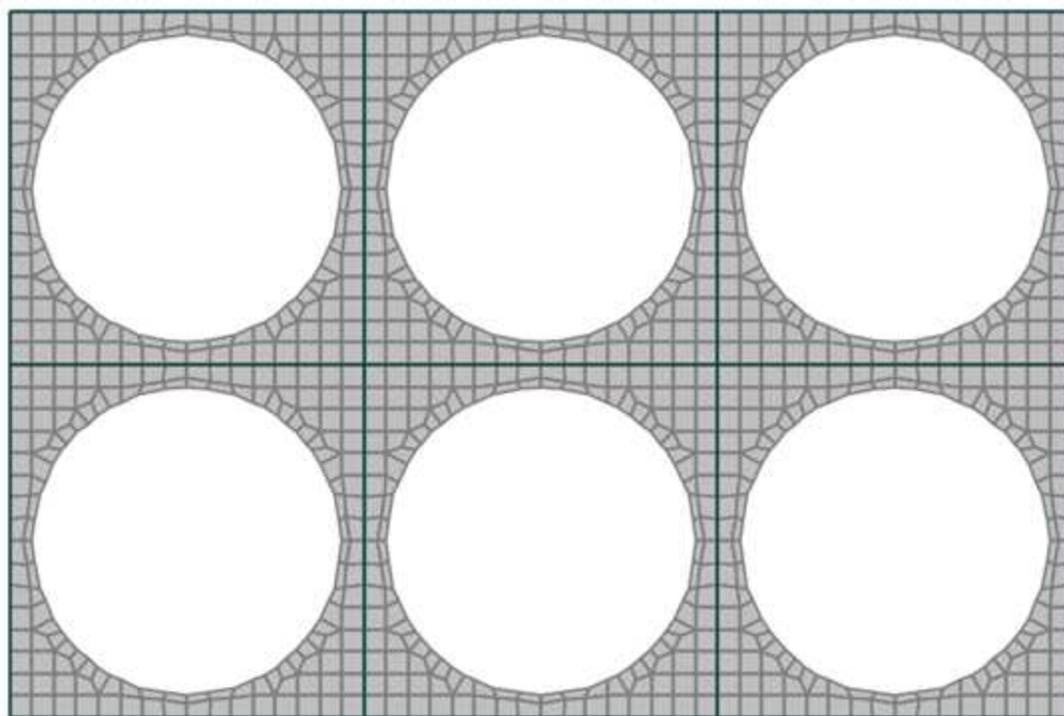


Figura III.10: Planta de losa de Hormigón Armado.

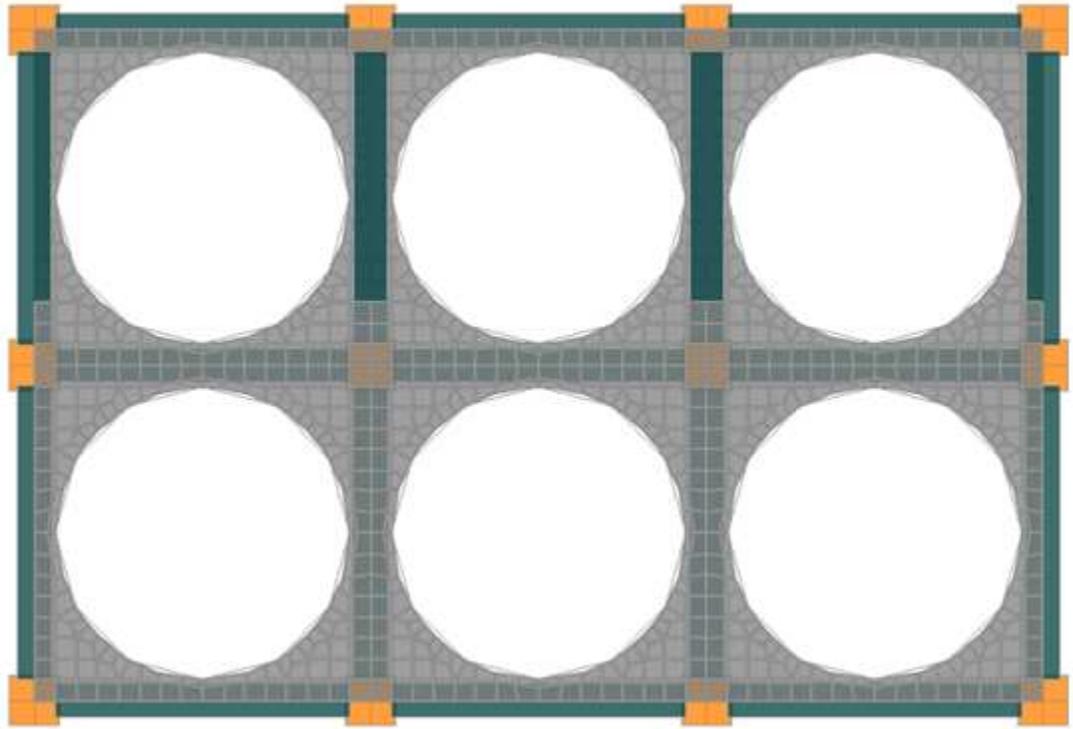


Figura III.11: Planta de losa de Hormigón Armado (Extrusión).

Vinculación de Silo con Mesa de Hormigón Armado:

Se modeló la unión del Silo de Acero contra la mesa de Hormigón Armado con un vínculo cinemático que acopla los 6 grados de libertad (GDL) del nodo central del silo con su apoyo perimetral. Lo anterior se realizó usando la opción de acoplamiento de SAP2000 denominada “Constraint Body”, que permite modelar un comportamiento de cuerpo rígido entre los nodos agrupados.

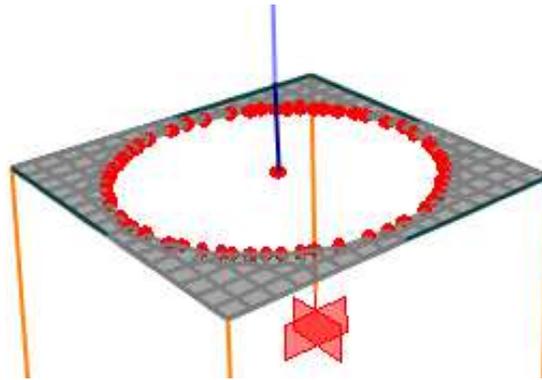


Figura III.12: Modelación de acoplamiento Silo – Mesa
(Nodos rojos = Nodos Acoplados).

III.2 Solicitaciones generales

Cargas de Peso Propio

Estas cargas son determinadas automáticamente por el software en función de los elementos estructurales incorporados en el modelo y las propiedades de los materiales definidas.

Cargas Equipos de Techo y Anexos

Si bien estas cargas no aportan al diseño general del sistema estructural global en estudio, sino exclusivamente al diseño local de las estructuras de techo, son incorporadas por motivos de rigurosidad.

Estas cargas son modeladas de manera puntual en el extremo superior del manto estructural.

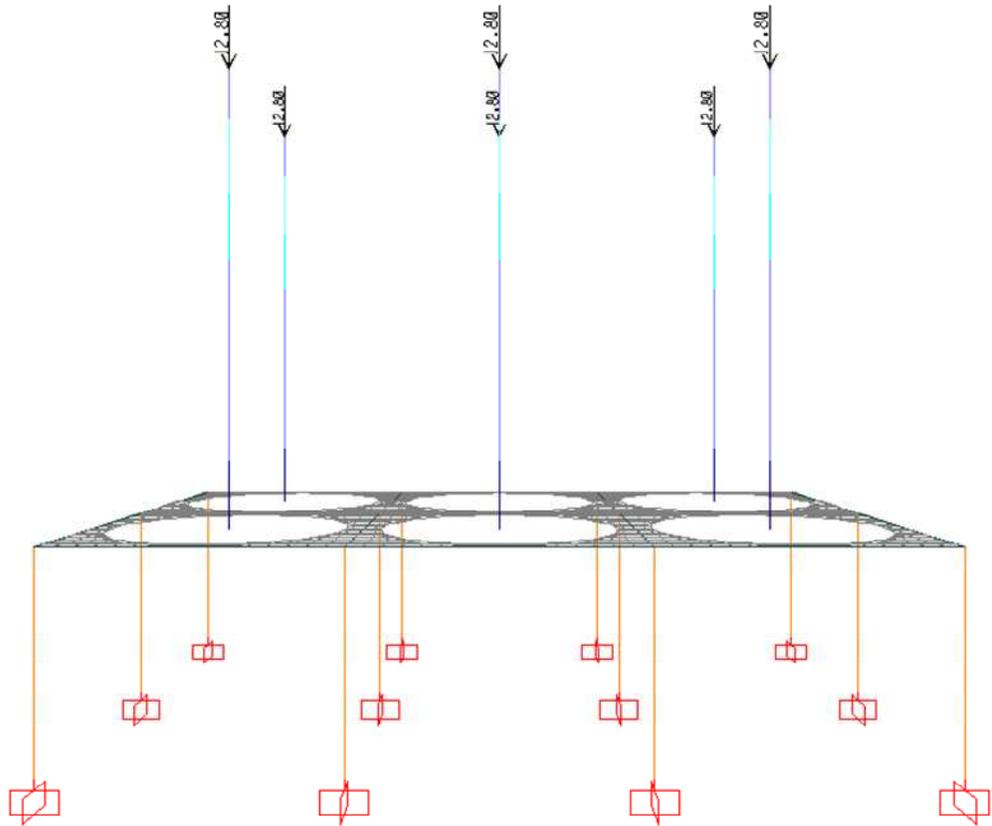


Figura III.13: Modelación de carga de equipos de techo

Cargas de Material – Condición Operacional

De acuerdo al nivel de llenado ya definido para cada Silo (80%) se considera una distribución discreta de la carga de material almacenado en altura suficientemente “fina” como para captar los efectos de una respuesta continua. Específicamente, se consideran 11 nodos separados 1m. El material que corresponde al almacenamiento de la tolva llena se tributa al primer nodo inferior del manto cilíndrico modelado.

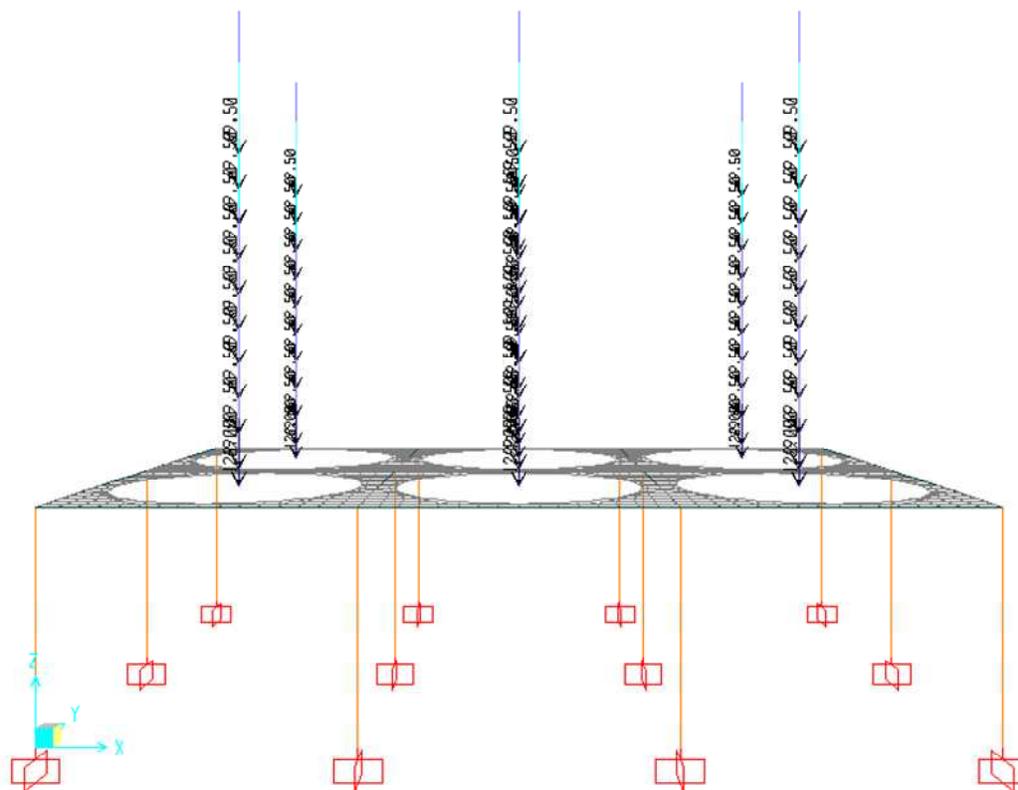


Figura III.14: Modelación de carga de material en condición operacional

Cargas de Material – Condición Sísmica Centrada

En este caso se mantienen los dos Silos centrales invariantes en relación al caso anterior, incorporando cambios sólo en los cuatro Silos restantes. En atención a que el centro de gravedad del volumen equivalente a un llenado del 35% coincide (razonablemente) con el segundo nodo inferior, se decide tributar la totalidad de la carga a tal punto.

Tabla III-1: Llenado de Silos en condición sísmica

# Silos	Llenado	V m ³	PP _{mat} t
2	80%	430	817
4	35%	188	357
Total		1612	3062

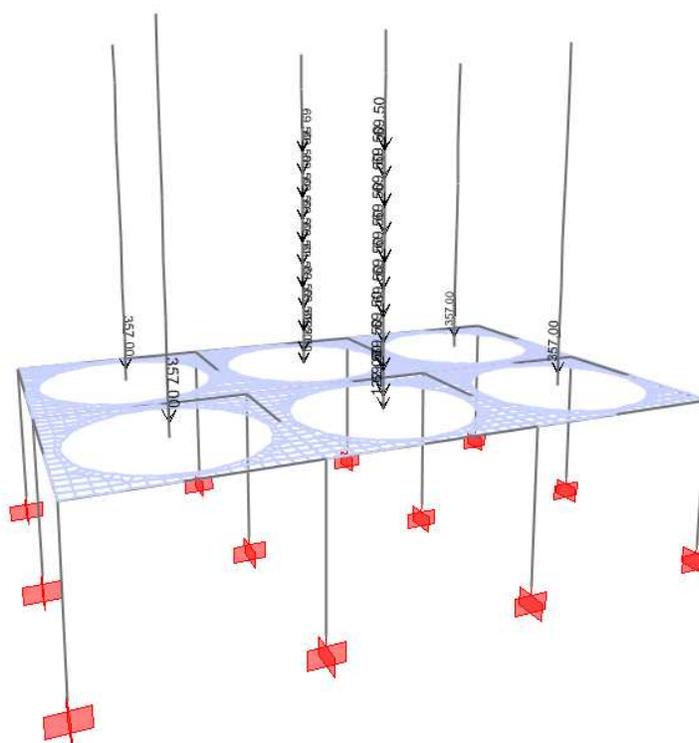


Figura III.15: Modelación de carga de material en condición sísmica centrada

III.3 Solicitaciones Sísmicas.

Las solicitaciones de diseño de origen sísmico se definen de acuerdo con los requisitos establecidos por NCh2369 y mediante un análisis modal espectral.

Análisis Modal

Para el análisis modal se consideró una respuesta tridimensional completa (6 GDL's en cada nodo) con la metodología de los valores y vectores propios, considerando como masa sísmica la correspondiente a la totalidad de las cargas permanentes y a la carga de material en condición sísmica centrada.

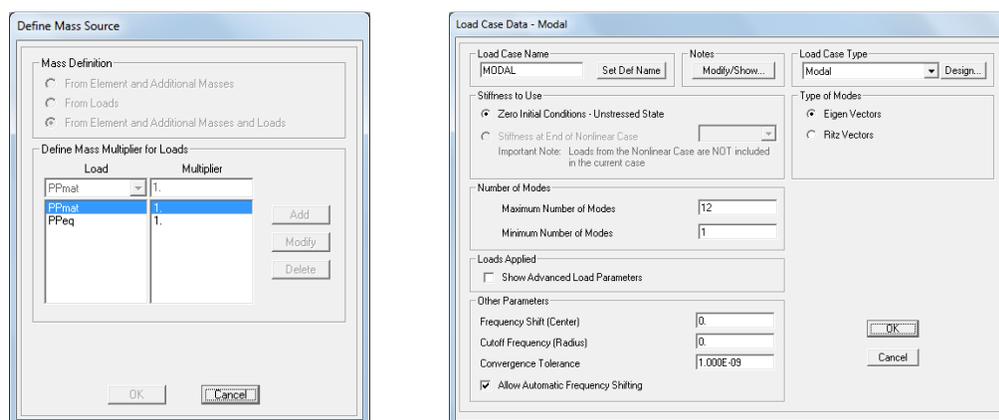


Figura III.16: Análisis Modal

Luego del análisis modal los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla III-2: Periodos y Masas Modales

TABLE: Modal Participating Mass Ratios								
StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.29	0.00	0.98	0.00	0.00	0.98	0.54	0.54
2	0.29	0.97	0.00	0.00	0.98	0.98	0.23	0.77
3	0.20	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.19	0.96
4	0.16	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00	0.96
5	0.14	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.02	0.98
6	0.14	0.02	0.00	0.00	1.00	0.98	0.01	0.99
7	0.13	0.00	0.02	0.00	1.00	1.00	0.01	1.00

UX	:	Traslación en dirección longitudinal
UY	:	Traslación en dirección transversal
UZ	:	Traslación en dirección vertical
RZ	:	Rotación respecto a eje vertical

La tabla anterior ha sido truncada en razón de que la masa total en las direcciones de interés (traslaciones horizontales y giro en planta) ha sido completada con el séptimo modo.

A continuación se muestran las 3 primeras formas modales obtenidas.

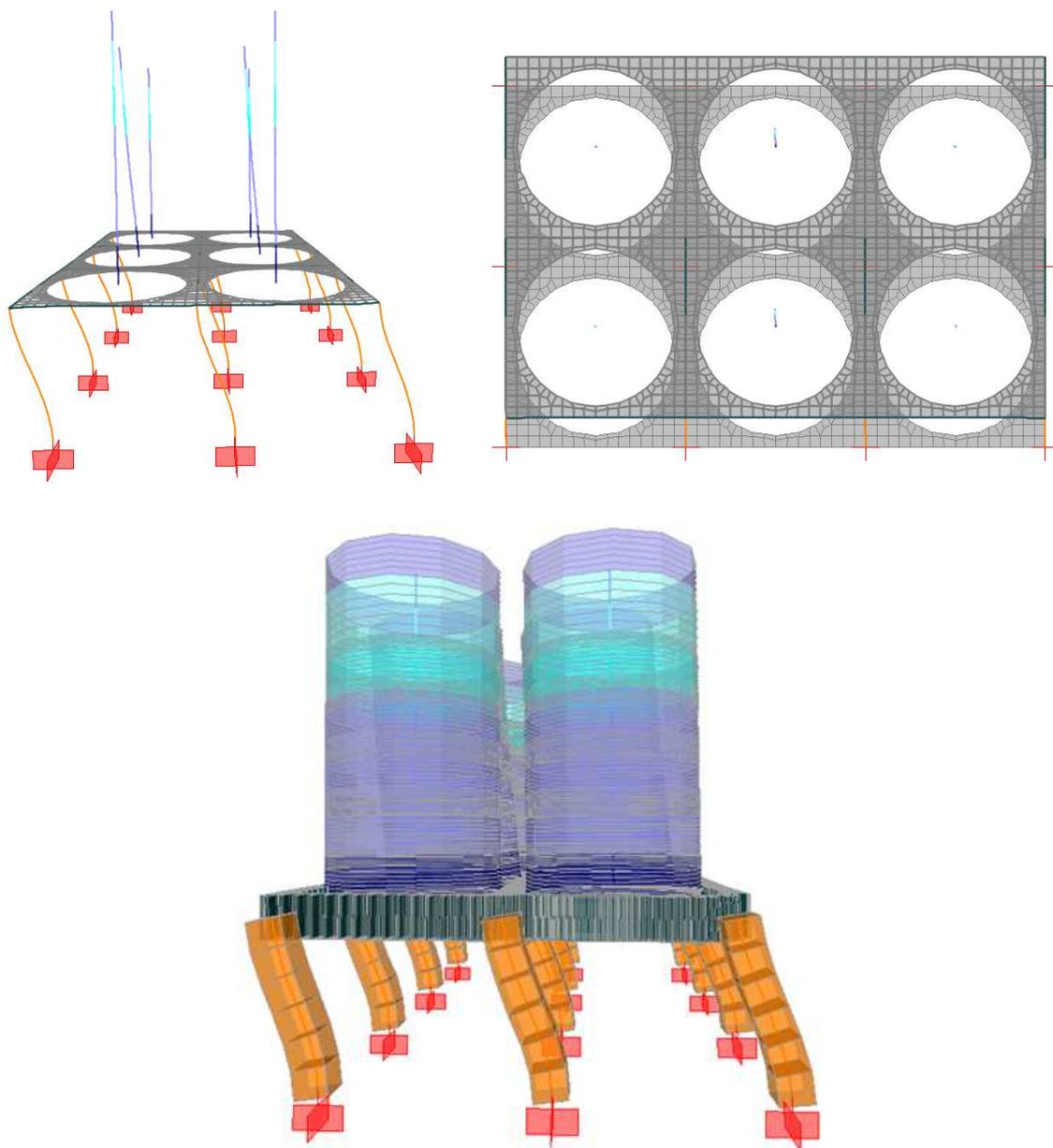


Figura III.17: Primera forma modal $T_y = 0.29$ seg

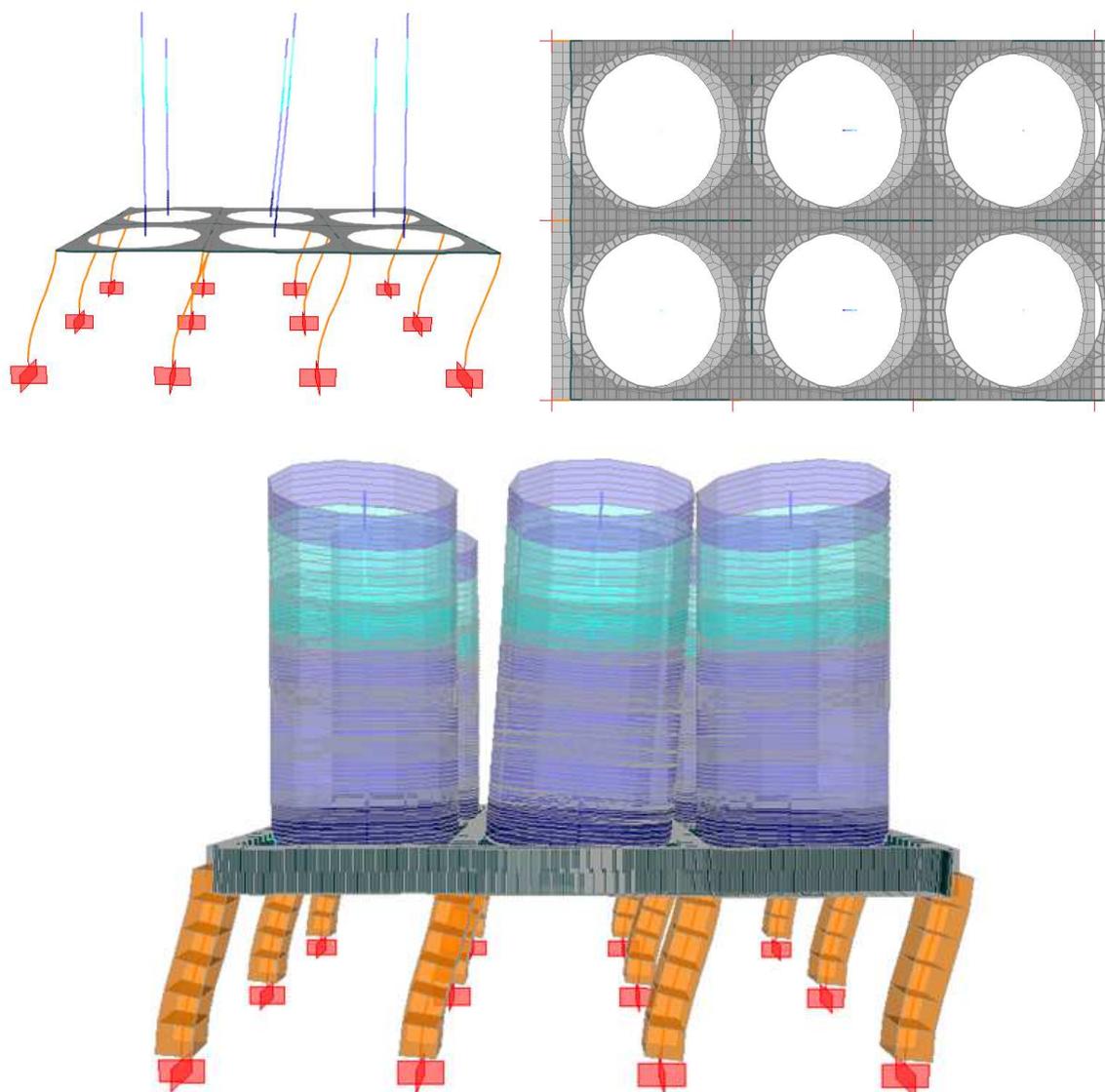


Figura III.18: Segunda forma modal $T_x = 0.29$ seg

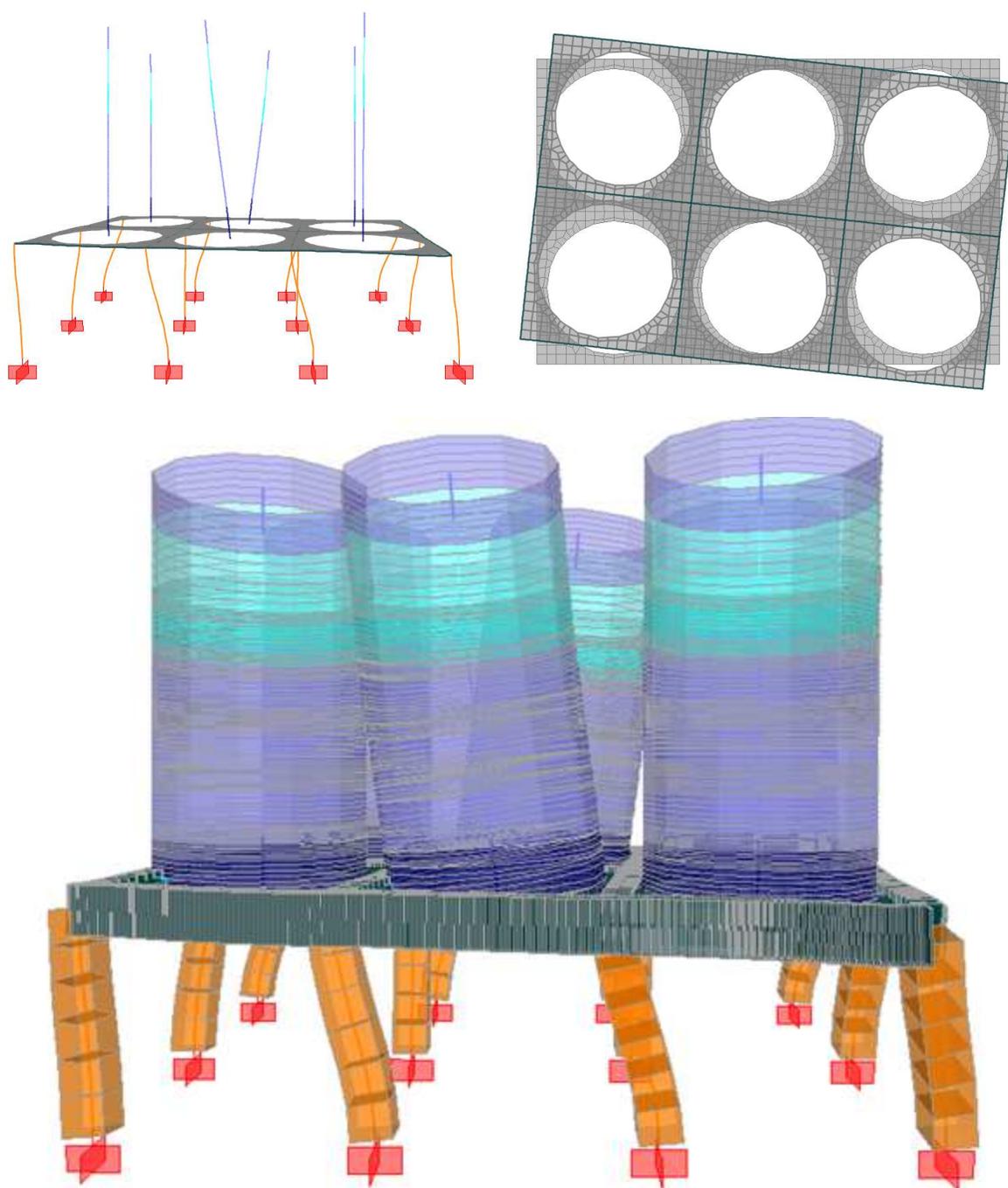


Figura III.19: Tercera forma modal $\theta_z = 0.20$ seg

Espectro de Diseño

De acuerdo al sistema estructural y dado que el comportamiento inelástico se desarrollará en los elementos de hormigón armado es que se consideró los siguientes parámetros sísmicos:

Tabla III-3: Parámetros Sísmicos

Categoría	I	1	Clasifica como categoría C2
Aceleración Efectiva	A_o/g	0.4	Zona Sísmica 3
Suelo	T_s	II	Tipo de Suelo
	T'	0.35	Seg.
	n	1.33	-
Amortiguamiento	ξ	0.05	Estructura de HA
F. Reducción de Resp.	R	5	Estructuras de Marcos Dúctiles
Coeficiente sísmico máximo	C_{max}	0.18	
Coeficiente sísmico mínimo	C_{min}	0.10	
Coeficiente sísmico vertical	C_v	0.27	

Considerando esta información, el espectro de diseño para fuerzas laterales ingresado al modelo es el siguiente:

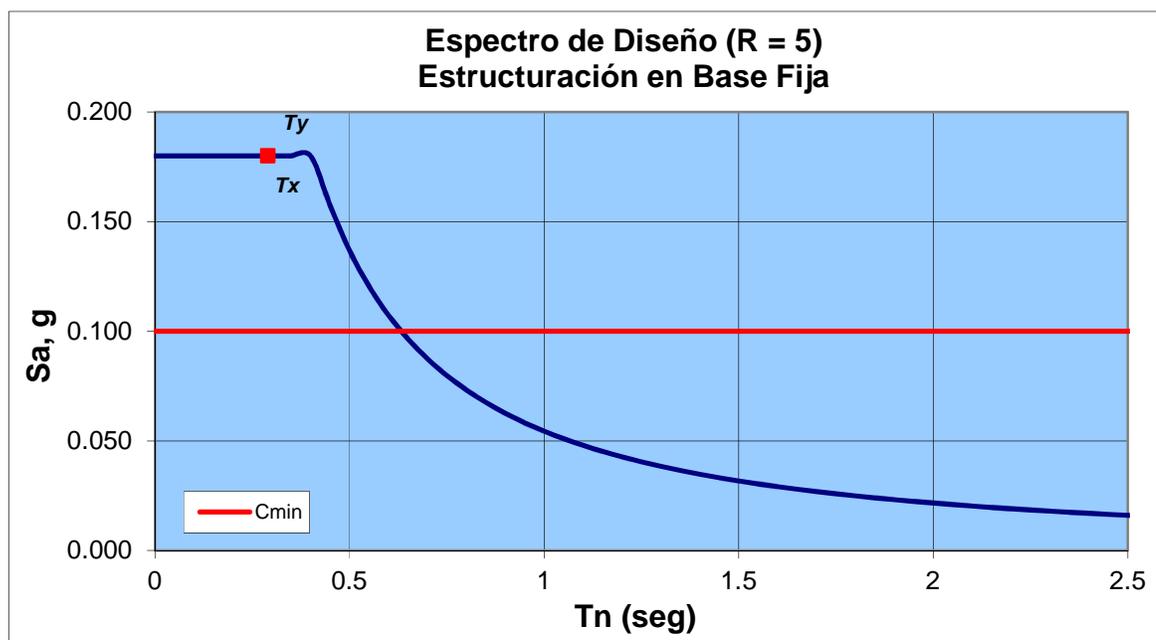
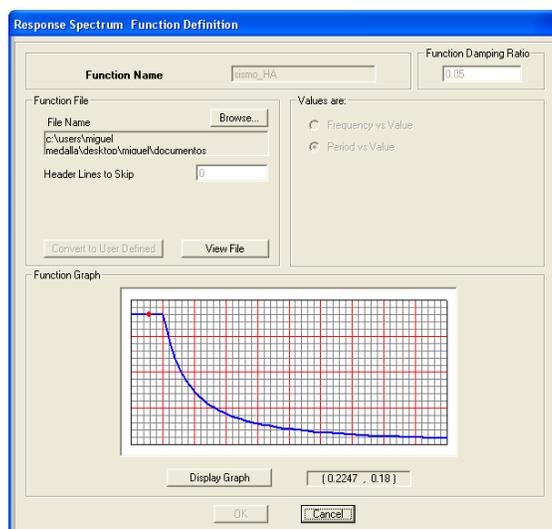
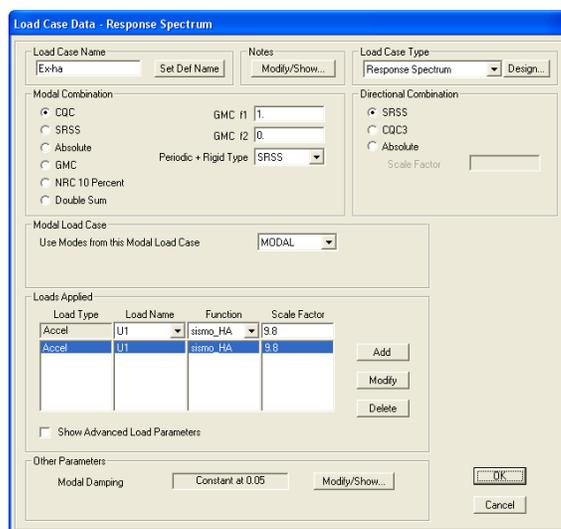


Figura III.20: Espectro de Diseño NCh2369

[T_x , T_y 1^{er} y 2^{do} Periodo de Vibración]



Modelación de Espectro de diseño



Excitación sísmica, Dirección Longitudinal

Figura III.21: Modelación de Análisis Espectral

Reacciones Basales

Una vez realizado el análisis descrito se obtuvo las siguientes reacciones basales.

Tabla III-4: Reacciones Basales estructura en Base Fija

Reacciones Basales				
Estado de Carga	Tipo de Carga	FX	FY	FZ
		T	T	t
PP _{HA}	Estática	0	0	988
PP _{mat}	Estática	0	0	3062
PP _{Eq}	Estática	0	0	77
PP _{Silo}	Estática	0	0	225
Ex	Espectral	741	0	0
Ey	Espectral	0	745	9
Ev	Estática	0	0	1175
Peso Sísmico [t]				4352
Corte mínimo normativo [t]				435
Corte máximo normativo [t]				782

Donde :

- Ex = Componente sísmica en dirección longitudinal x
- Ey = Componente sísmica en dirección transversal y
- Ev = Componente sísmica vertical

De los resultados anteriores se desprende lo siguiente:

$R_{\text{eff}_x} = 5$ Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección x

$R_{\text{eff}_y} = 5$ Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección y

Lo anterior establece que si el diseño del sistema estructural resulta ajustado, ante un evento sísmico severo deberá ser capaz de tolerar demandas inelásticas importantes (haciendo uso de la ductilidad que le confiera el detallamiento correspondiente), con el consiguiente nivel de daño estructural asociado.

III.4 Solicitaciones en Silos de Acero

En términos generales, los silos pueden considerarse como un equipo montado sobre una estructura, de esta forma no se establece que deban tener grandes capacidades de disipación de energía (ver NCh2369). Por lo tanto deben diseñarse para demandas de fuerza mayores. Sin embargo, el caso especial de un silo de manto de acero corresponde a una estructura cuyo mecanismo de colapso y sistema resistente ante cargas laterales son plenamente conocidos, y por lo tanto parece más correcto entenderlo como una subestructura instalada sobre otra estructura principal de soporte. Desde este punto de vista parece razonable asignar un R local a estos equipos que sea consistente con el mecanismo de falla que se espera desarrollen durante un evento sísmico de elevada magnitud. En este contexto, debemos reconocer que el mecanismo de colapso asociado a la falla de este tipo particular de silos corresponde al pandeo inelástico en compresión vertical del manto. Este tipo de falla desarrolla una baja disipación de energía (que se origina principalmente en la fluencia parcial de la sección que pandeo), razón por la cual el factor de reducción R asociado al diseño de los silos debe estar apoyado fundamentalmente en la sobre-resistencia de los elementos y no en su capacidad de incursión inelástica. Con todo lo anterior, y en acuerdo con la filosofía de diseño que apoya la definición de requisitos de diseño práctico establecidos en NCh2369, se considera que un valor adecuado para el factor de reducción aplicable al diseño local del silo es $R=3$. Si bien en estricto rigor un factor de reducción $R=2$ podría “garantizar” la ausencia de incursiones inelásticas significativas en el manto de los silos, no se considera adecuado en esta ocasión específica en razón de la probable incursión inelástica que puede desarrollar la subestructura de apoyo ($R=5$) durante un evento sísmico de elevada magnitud, la cual debiera limitar la sollicitación que se transmite al nivel de apoyo de los silos.

En resumen, en función de la baja capacidad de disipación de energía presente en el Silo de Acero, se procedió a amplificar las sollicitaciones sísmicas obtenidas de la modelación estructural por un factor equivalente a la razón entre los factores de

modificación de respuesta “R” de cada subestructura. Esto establece que las demandas obtenidas de la modelación estructural deberán ser amplificadas, para efectos de las verificaciones de los silos, por el factor: $F_{AMP} = 5/3 = 1.67$.

No obstante lo anterior, en estos equipos existe la posibilidad de aumentar el factor de modificación de respuesta si se logra establecer un mecanismo de falla dúctil, lo que sin duda podría lograrse si el sistema de anclaje permitiera que los pernos fluyeran en tracción antes de que se produzca el pandeo vertical en el manto del lado opuesto. La experiencia práctica en este tipo de estructuraciones establece que dichos casos no son comunes.

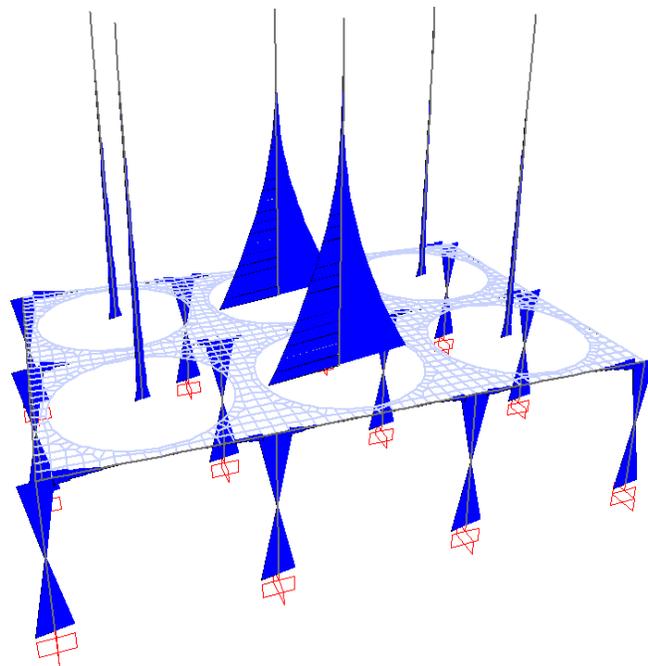


Figura III.22: Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección longitudinal.

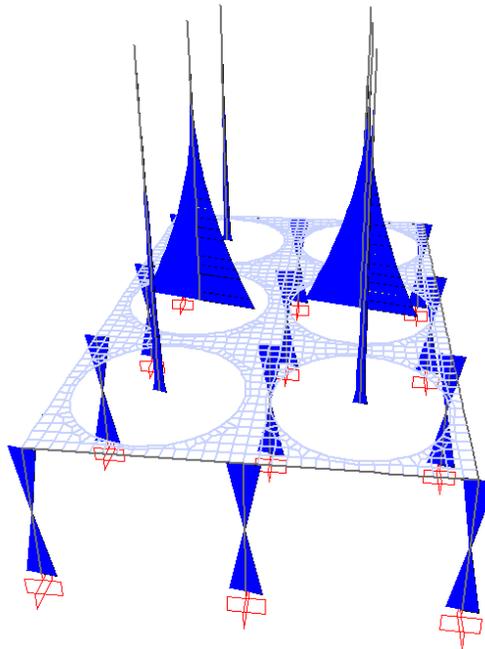
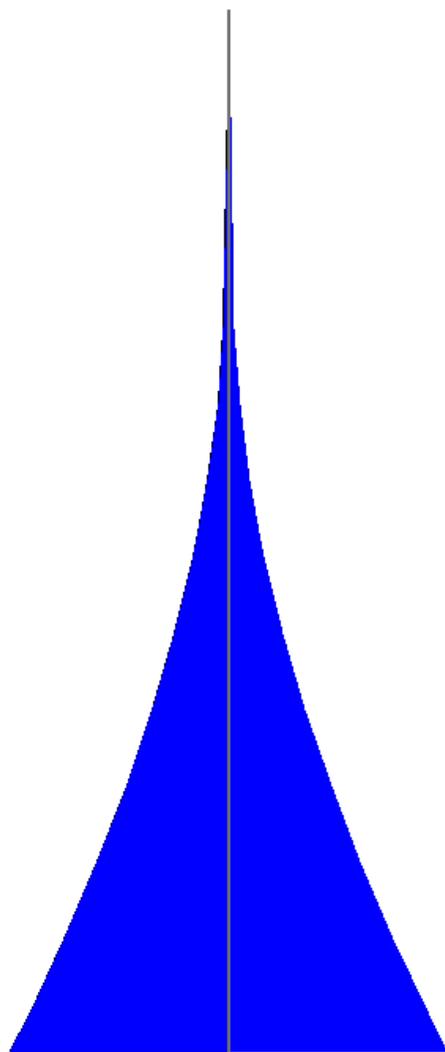


Figura III.23: Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección transversal.

Si bien el nivel de sollicitación es prácticamente el mismo en ambas direcciones principales, se tiene que la sollicitación sísmica en la dirección longitudinal “X” es la que genera las máximas exigencias.



Distribución de Momento

Punto N°	Z M	z₁ M	M* t m
1	16.79	0.00	27
2	16.13	0.66	33
3	15.25	1.54	64
4	14.38	2.41	116
5	13.50	3.29	189
6	12.63	4.16	282
7	11.75	5.04	395
8	10.88	5.91	525
9	10.00	6.79	675
10	9.13	7.66	842
11	8.25	8.54	1028
12	7.38	9.41	1227
13	6.50	10.29	1443

$M^* = \text{Momento Sísmico}$

Análisis Estructural en base fija

Figura III.24: Distribución y discretización en altura de Momento flector para máxima acción sísmica

IV ANÁLISIS SÍSMICO CENTRADO DE ESTRUCTURA AISLADA

En atención a la estructuración que presenta el edificio original, se decide disponer el sistema de aislación en la interfaz entre vigas de hormigón armado y columnas. Específicamente bajo el tope de concreto inferior de las vigas. Lo anterior debido a que esta posición permite disminuir el momento volcante en el nivel en que se incorporan los dispositivos.

La metodología de solución en este caso continúa siendo el análisis modal espectral, de acuerdo a la norma chilena NCh2745. Para la modelación se considera una linealización equivalente de los dispositivos de aislación elastoméricos con corazón de plomo, cuyo comportamiento es intrínsecamente no lineal. Dicha linealización se realiza de acuerdo a la deformación de diseño y máxima.

La superestructura debe diseñarse considerando una demanda espectral correspondiente a un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años con un factor de modificación $R=2$ (respuesta elástica). Para la subestructura en cambio debe diseñarse con un factor de modificación de respuesta igual a $R=1.5$. Respecto al dispositivo de aislación propiamente, debe ser diseñado para tolerar las demandas elásticas del sismo máximo probable, correspondiente a un 10% de probabilidad de excedencia en 100 años.

Para la verificación de los aisladores se utiliza una herramienta electrónica diseñada especialmente para este fin, la cual forma parte integrante y complementaria del presente estudio.

En relación al corte basal mínimo. NCh2745 establece que debe respetarse como mínimo para el diseño lo establecido en la Norma de Diseño Sísmico de Edificios NCh433. Sin embargo, por tratarse de una estructura industrial se decide adoptar el mínimo establecido en NCh2369, en este caso $C_{\min} = 0.1g$.

Se considera como periodo objetivo efectivo del modo aislado del sistema T_M , entre 2.5 y 3 seg. Adicionalmente, se intenta disminuir los desplazamientos de diseño introduciendo un amortiguamiento importante al sistema a través del corazón de plomo de los dispositivos. Lo anterior con el objeto que el dimensionamiento de las juntas de elementos que crucen la interfaz de aislamiento pueda simplificarse.

Es importante detenerse un momento en este concepto. Si bien el aislamiento de base permite reducir las demandas sísmicas elásticas horizontales de la superestructura en valores de hasta un 90% a través del incremento sustancial de los periodos fundamentales de vibración libre, existe un segundo efecto beneficioso. Este segundo efecto es el amortiguamiento que el sistema de aislamiento puede introducir en los primeros modos fundamentales. Este amortiguamiento causa un efecto directo de disminución en las deformaciones laterales máximas del sistema aislado, que es donde se concentran las deformaciones laterales de todo el sistema estructural. En aplicaciones industriales, este efecto de disminución de deformaciones de diseño en el sistema aislado resulta crucial, debido a que las deformaciones en el techo tienden a controlar las soluciones de conexión de las subestructuras o equipos que llegan a este nivel de la estructura. Por ejemplo, correas transportadoras. Dicho sea de paso, la incorporación de altos niveles de amortiguamiento en el sistema de aislación puede lograr que a nivel del techo el desplazamiento lateral máximo esperado de la estructura aislada sea igual o menor al desplazamiento inelástico máximo esperado de la estructura convencional. En estos casos, se elimina la necesidad de desarrollar soluciones de conexión especiales contra los sistemas externos (de entrada o salida) diferentes a las que debieran haber sido implementadas en el caso convencional.

No obstante lo anterior, se opta por establecer un límite práctico de un 20% (aproximadamente) para considerar los efectos beneficiosos del amortiguamiento.

En razón de la simplicidad constructiva y de diseño que reviste, se decide usar una uniformidad de dispositivos en toda la interfaz de aislamiento. Si bien desde el punto de vista netamente técnico esta decisión podría resultar arbitraria y cuestionable, ya

que el control “óptimo” de la respuesta esperada exige el uso de dispositivos de diferente tamaño e incluso de diferente naturaleza, desde el punto de vista práctico industrial reviste ventajas cruciales. Entre ellas, la estandarización de las soluciones constructivas y la simplificación de posibles procesos de mantención y recambio, ya que pueden mantenerse “en bodega” dispositivos de repuesto “universales”. En casos especiales, en que se decida usar soluciones aisladas en varias estructuras de un mismo proyecto incluso podría resultar atractiva (por temas de plazos y costos) la estandarización de dispositivos entre varias o todas las estructuras.

IV.1 Pre-Diseño de Dispositivos de Aislación

Para la estimación de la carga axial “preliminar” sobre los dispositivos se generó un modelo “auxiliar” con elementos link lineales con rigideces de corte que permitieran desarrollar los periodos objetivos antes definidos y rigideces axiales del orden de 1000 veces la rigidez de corte. Luego se realizó un análisis modal ajustado al corte mínimo.

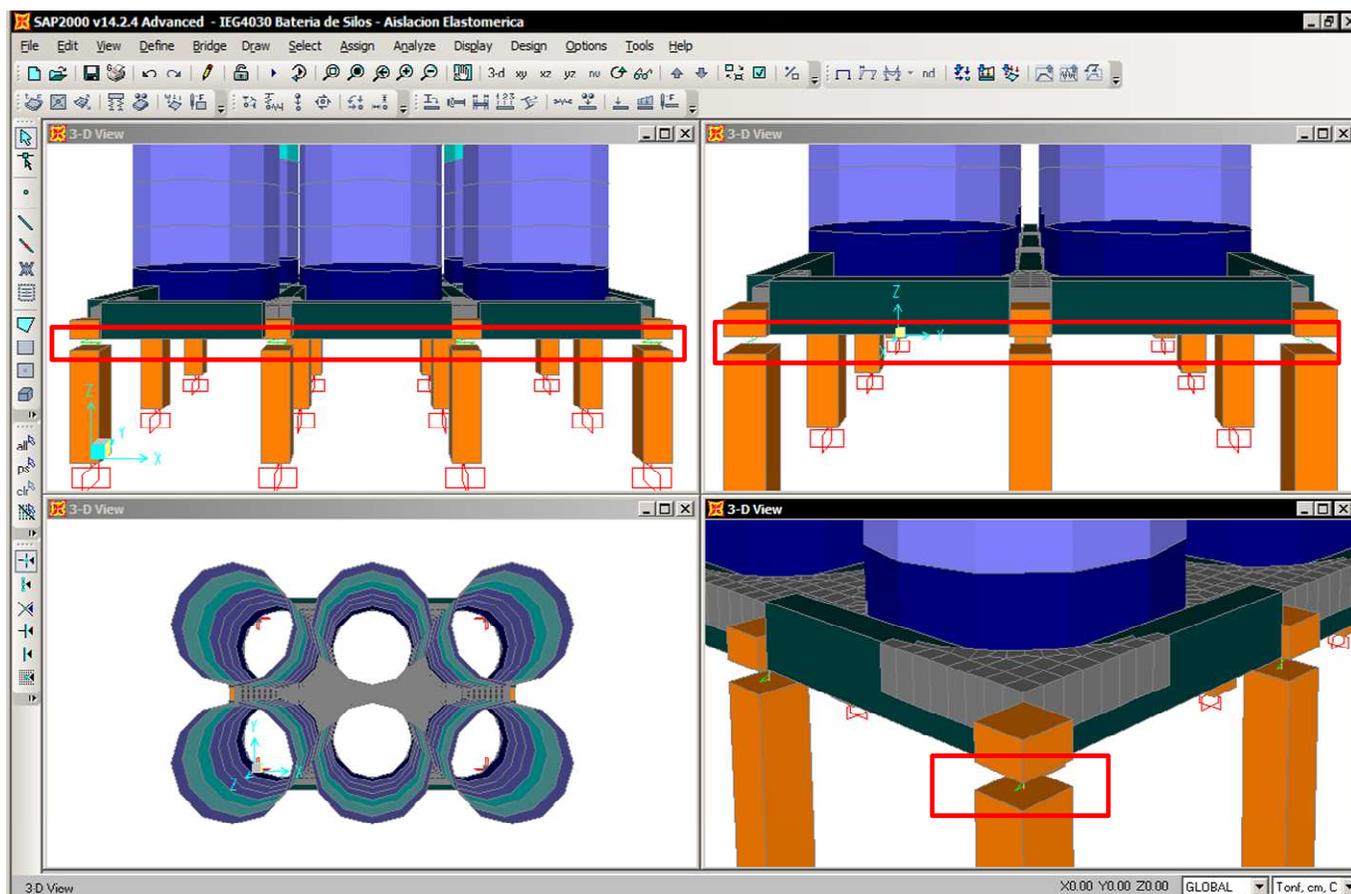


Figura IV.1 Modelación para pre-diseño de aisladores

Realizado el análisis se obtuvo las siguientes demandas axiales máximas:

Compresión de Largo Plazo [P _{LP}]	:	967 t
Compresión de Corto Plazo [P _{CP}]	:	889 t
Compresión Mínima [P _{min}]	:	92 t
Peso Sísmico sobre Aislador [W]	:	723 t

Los desplazamientos fueron obtenidos considerando las disposiciones de NCh2745.

Desplazamiento de Diseño	:	213 mm
Desplazamiento Máximo	:	255 mm

Determinación de Desplazamientos de Diseño

Categoría	A						
Zona	3						
Suelo	II						
R	Pórticos - Hormigón armado						

I	1	A_o	0.4 g
Z	1.25	β	20.0 %
M_M	1.2	B	1.94
T_a	0.03 seg	T_D	2.40 seg
T_b	0.2 seg	$S_a(T_D)$	0.210 g
T_c	0.54 seg	$S_a Z I / R_1 B$	0.068 g
T_d	2 seg	C_{min}	0.120 g
T_e	10 seg	$C_{diseño}$	0.120 g
PGA	0.41 g	$S_d(T_D)$	30.00 cm
$\alpha_A A$	1100 cm/s ²	S_d / B	15.46 cm
$\alpha_V V$	94 cm/s	D_D	193.3 mm
$\alpha_D D$	30 cm	D_M	232.0 mm
R_1	2.0	$D_{TD min}$	212.6 mm
		$D_{TM min}$	255.2 mm

Figura IV.2 Determinación de Desplazamientos

De acuerdo a todos los parámetros antes definidos se procede a realizar el pre-dimensionamiento del aislador elastomérico.

AISLADOR ELASTOMERICO CIRCULAR CON NUCLEO DE PLOMO

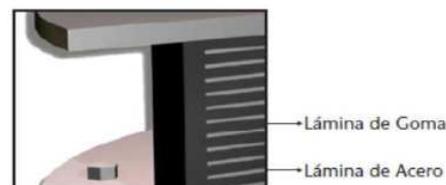
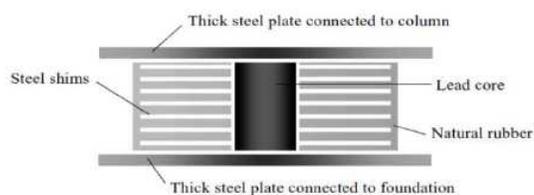
Bateria de Silos Pre - Dimensionamiento

Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	213 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	255 mm
Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	967.0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	889.0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	92.0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	723.0 tonf

Características de los aisladores

Diámetro del aislador	D	100 cm
Diámetro del núcleo de plomo	d_p	15 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0.8 cm
Numero laminas de goma	n_r	44
Altura total de goma	H_r	35.2 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0.3 cm
Altura total del aislador	h	48.1 cm
Módulo de corte de la goma	G	6.5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	7677 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	251 cm ²
Primer factor de forma	S	30.5
Inercia sección bruta	I	4906253 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	10622 kgf/cm ²
	$(EI)_{ef}$	1.74E+10 kgf cm ²
Rigidez al corte postfluencia	k_p	1630 kgf/cm
Rigidez axial	k_{axial}	2831 tonf/cm
Rigidez flexural	$k_{flexural}$	493498 tonf cm

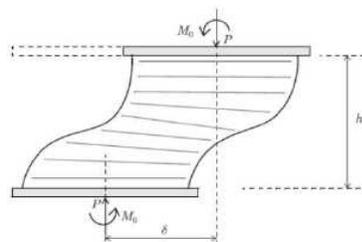


Carga critica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	70 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	101261 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	2623 tonf
Tensión de pandeo	p_{cr}	342 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	889 tonf
Área de corte efectiva	A_s	10491 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	1281 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_h	1630 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	349 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	21.42 %



Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	$\sigma_{ADM LP}$	130.0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	126.0 kg/cm ²
	FU	0.97 OK

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Área de superposición	A_r	5332 cm ²
	A_r/A_c	0.69 OK
Carga de colapso	$A_r P_{cr}$	1822 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	889 tonf
	FU	0.49 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	167 kgf/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	1769 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	53.98 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	21.30 cm
	FS	2.53

Deformación angular total máxima

Deformación angular por corte	γ_s	0.72
Deformación angular por flexión	γ_b	0.00
Área efectiva de compresión	A_r	5332 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	166.7 kgf/cm ²
	E_0	35.0 kgf/cm ²
	k	1.0
	ϵ_c	2.551 x10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	0.47
Deformación angular total	γ_0	1.19
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5.5
Deformación angular total limite	$\gamma_0 \lim$	4.68
Factor de seguridad	FS	3.92

Frecuencia vertical

Periodo vertical	T_v	0.10 seg
Frecuencia vertical	f_v	9.9 Hz
Frecuencia vertical mínima	$f_{v \min}$	10.0 Hz

SE ACEPTA

Placas de acero

Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	166.7 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	126.0 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	σ_{tCP}	0.593 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	σ_{tLP}	0.448 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2.400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	F_{tCP}	1.911 tonf/cm ²
Tracción admisible Largo Plazo	F_{tLP}	1.437 tonf/cm ²

F_{UCP} **0.31 OK**
 F_{ULP} **0.31 OK**

Propiedades linealizadas (W) - Sismo Diseño -

Deformación de corte de diseño	γ	0.61
Modulo de Corte efectivo	$G(\gamma)$	6.50 kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0 kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	17.7 tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p (k_2)$	1630 kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i (k_1)$	16303 kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2460 kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1.20 cm
Fuerza de fluencia	F_y	19.6 tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	3.44 seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.20

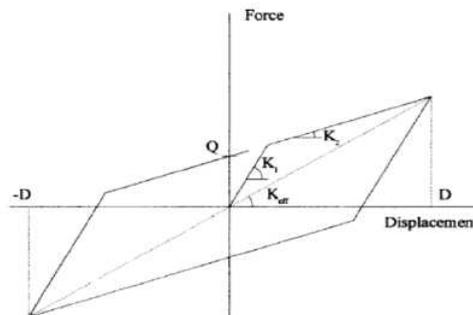
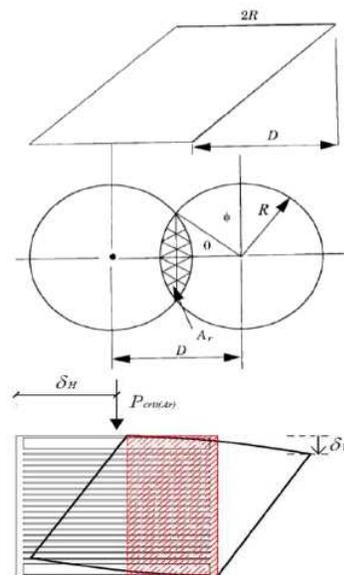


Figura IV.3 Pre-dimensionamiento Aisladores Elastoméricos

De la figura anterior podemos resumir los siguientes parámetros del dispositivo de aislación definido en el pre-dimensionamiento:

Tabla IV-1: Resumen Aislador Elastomérico

D	100	cm	Diámetro Aislador
d_p	15	cm	Diámetro Núcleo Plomo
H_r	35	cm	Altura de Goma
H	48	cm	Altura Total
n_r	44		Número de láminas de goma
G	6.5	kg/cm ²	Módulo de corte de la goma
K_{axial}	2831	ton/cm	Rigidez Axial
$K_{flexural}$	493498	ton*cm	Rigidez Flexural
K_p	1630	ton/cm	Rigidez lateral post fluencia

Es importante notar que los dispositivos han quedado controlados por las solicitaciones de largo plazo y no por condiciones sísmicas eventuales. Esta situación no resulta sorprendente en estructuras industriales de almacenamiento que cuentan con solicitaciones de operación tan elevadas en relación a las cargas muertas y tan variables como el caso estudiado. Lo anterior debe entenderse de la siguiente forma. En el caso sísmico el nivel de llenado decrece tan fuertemente, en relación al caso operacional común, que las compresiones verticales en los elementos descienden más de lo que el efecto de volcamiento sísmico las eleva por sobre su valor medio (sólo cargas verticales). Recordemos que adicionalmente a la disminución del corte sísmico, los sistemas aislados permiten el descenso de la resultante horizontal que se genera en la superestructura. Este efecto se debe a que a diferencia del caso convencional las aceleraciones no crecen significativamente con la altura.

IV.2 Linealización de los dispositivos

Para la realización del análisis modal espectral, es necesario linealizar los dispositivos de aislación sísmica. Dicho procedimiento debe ser realizado tanto para la deformación de diseño como para la máxima deformación esperada, por lo que se deben generar dos modelos. NCh2745 establece que el procedimiento de linealización debe realizarse de la siguiente forma.

$$k_{eff} = k_2 + \frac{Q}{D_{Ti}} \quad (4.1)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2Q \cdot (D_{Ti} - D_y)}{\pi \cdot D_{Ti}^2 \cdot k_{eff}} \quad (4.2)$$

Con:

- k_{eff} = Rigidez lateral efectiva.
- β_{eff} = Amortiguamiento efectivo
- k_2 = Rigidez lateral post-fluencia.
- Q = Capacidad del Aislador a deformación cero.
- D_y = Desplazamiento de Fluencia.
- D_{Ti} = Desplazamiento Total de diseño o máximo según corresponda.

Gráficamente se tiene lo siguiente:

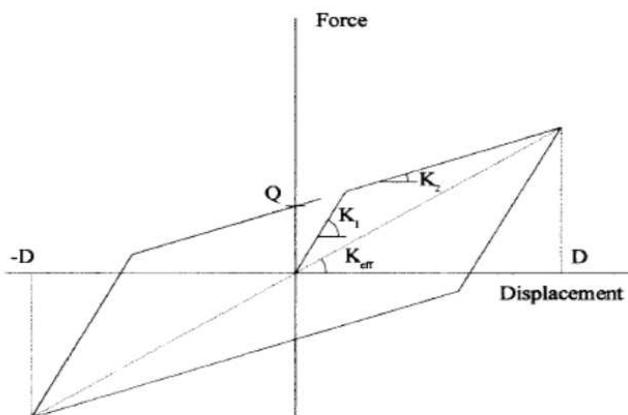


Figura IV.4 Parámetros de linealización

Luego de las iteraciones correspondientes, se obtuvo los siguientes parámetros linealizados de los dispositivos de aislamiento.

Tabla IV-2: Parámetros linealizados para análisis modal espectral

Sismo	D_{Ti} [cm]	k_{eff} [ton/cm]	β_{eff} [%]
Diseño	185	2.586	22
Máximo Esperado	239	2.370	19

Los dispositivos con las propiedades antes indicadas fueron modelados utilizando elementos "link" tipo *Rubber Isolator* tal como se observa en las siguientes figuras.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Elastomerico

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 0.0

Weight: 0.0

Rotational Inertia 1: 0.0

Rotational Inertia 2: 0.0

Rotational Inertia 3: 0.0

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.0

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.0

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters: Advanced...

OK Cancel

Elemento *Rubber isolator*

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomerico

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2831.0

Effective Damping: 0.0

OK Cancel

Rigidez Axial [ton/cm]

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomerico

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.586

Effective Damping: 0.0

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.0

OK Cancel

Rigidez de corte efectiva [ton/cm]

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomerico

Direction: R1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 493498.0

Effective Damping: 0.0

OK Cancel

Rigidez flexural [ton*cm]

Figura IV.5 Modelación de Dispositivos de Aislación para Sismo de Diseño

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Elastomero

Property Notes

Total Mass and Weight

Mass: 0.0 Rotational Inertia 1: 0.0

Weight: 0.0 Rotational Inertia 2: 0.0

Rotational Inertia 3: 0.0

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.0

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.0

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U1..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U2..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U3..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R1..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R2..."/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R3..."/>

P-Delta Parameters

Elemento *Rubber isolator*

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2831.0

Effective Damping: 0.0

Rigidez Axial [ton/cm]

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero

Direction: U3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.370

Effective Damping: 0.0

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.0

Rigidez de corte efectiva [ton/cm]

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero

Direction: R1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 493498.0

Effective Damping: 0.0

Rigidez flexural [ton*cm]

Figura IV.6 Modelación de Dispositivos de Aislación para Sismo Máximo Esperado

IV.3 Análisis Modal Espectral

Tabla IV-3: Periodos y Masas Modales

TABLE: Modal Participating Mass Ratios								
StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	2.35	0.98	0.00	0.00	0.98	0.00	0.24	0.24
2	2.35	0.00	0.98	0.00	0.98	0.98	0.53	0.77
3	1.48	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.21	0.98
4	0.17	0.00	0.00	0.03	0.98	0.98	0.00	0.98
5	0.16	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00	0.98
6	0.15	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00	0.98
7	0.14	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00	0.98
8	0.12	0.00	0.00	0.74	0.98	0.98	0.00	0.98
9	0.08	0.00	0.00	0.11	0.98	0.98	0.00	0.98
10	0.08	0.00	0.00	0.01	0.98	0.98	0.00	0.98
11	0.08	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.00	0.98
12	0.07	0.00	0.00	0.06	0.98	0.98	0.00	0.98

Con:

UX : Traslación en dirección longitudinal

UY : Traslación en dirección transversal

UZ : Traslación en dirección vertical

RZ : Rotación respecto a eje vertical

A continuación se muestran las 3 primeras formas modales obtenidas.

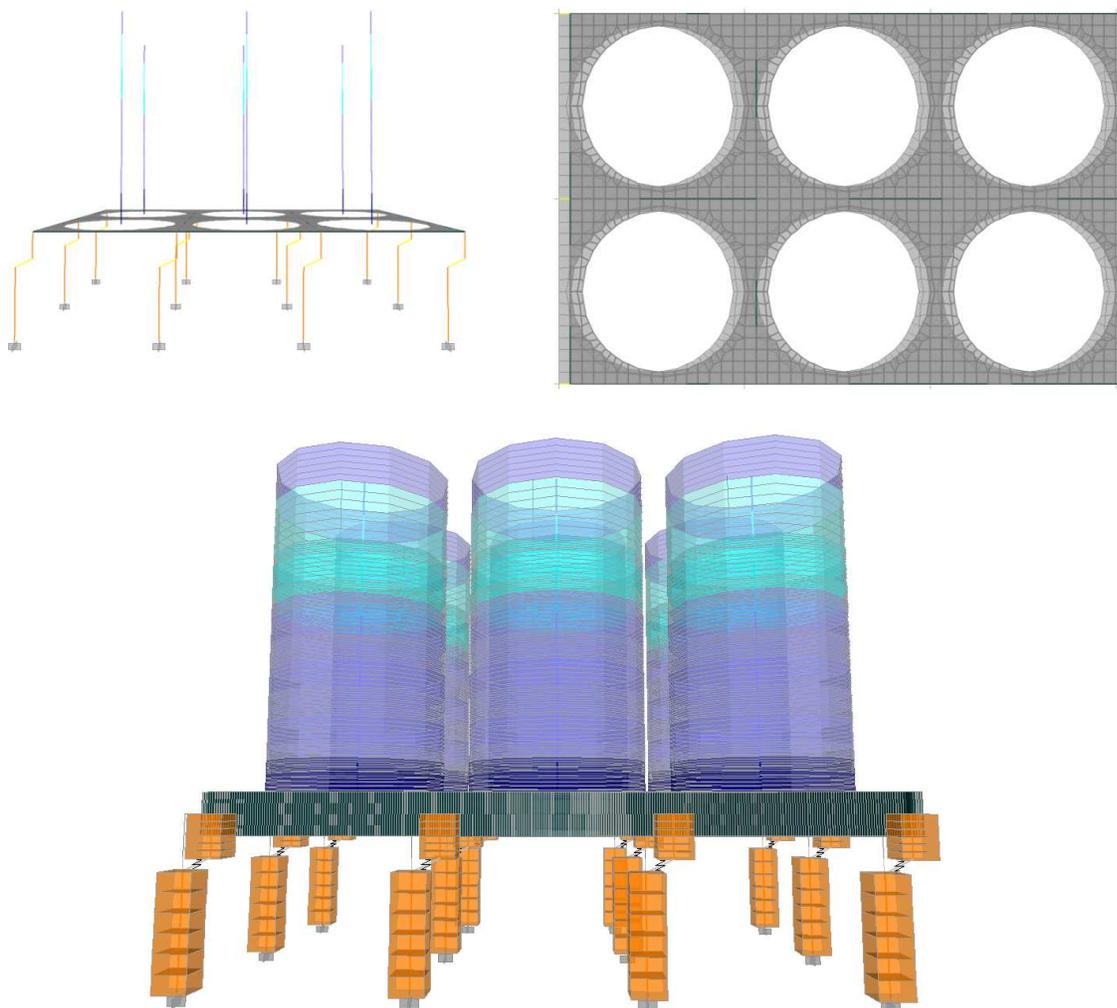


Figura IV.7 Primera forma modal $T_x = 2.35$ seg.

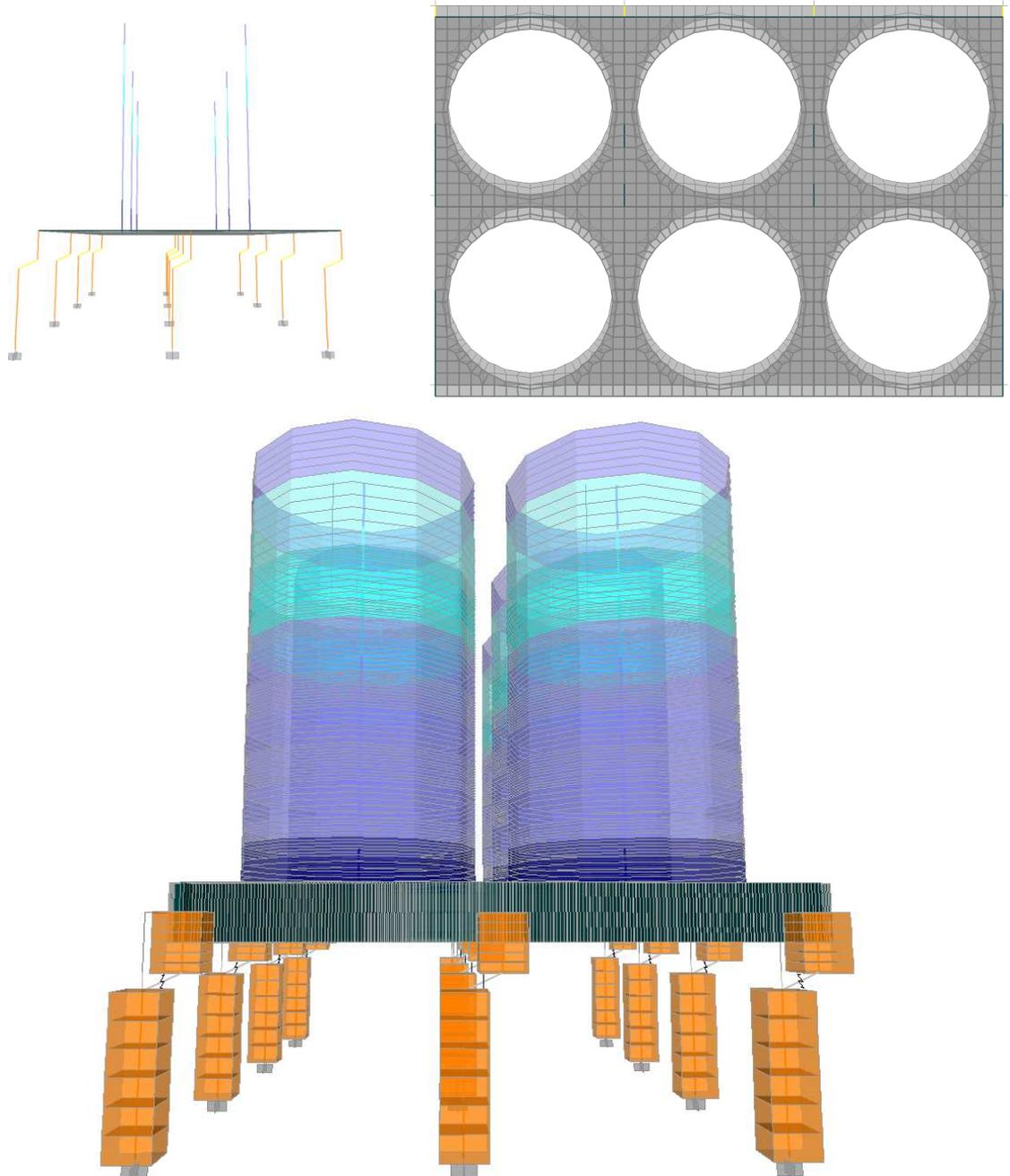


Figura IV.8 Segunda forma modal $T_y = 2.35$ seg.

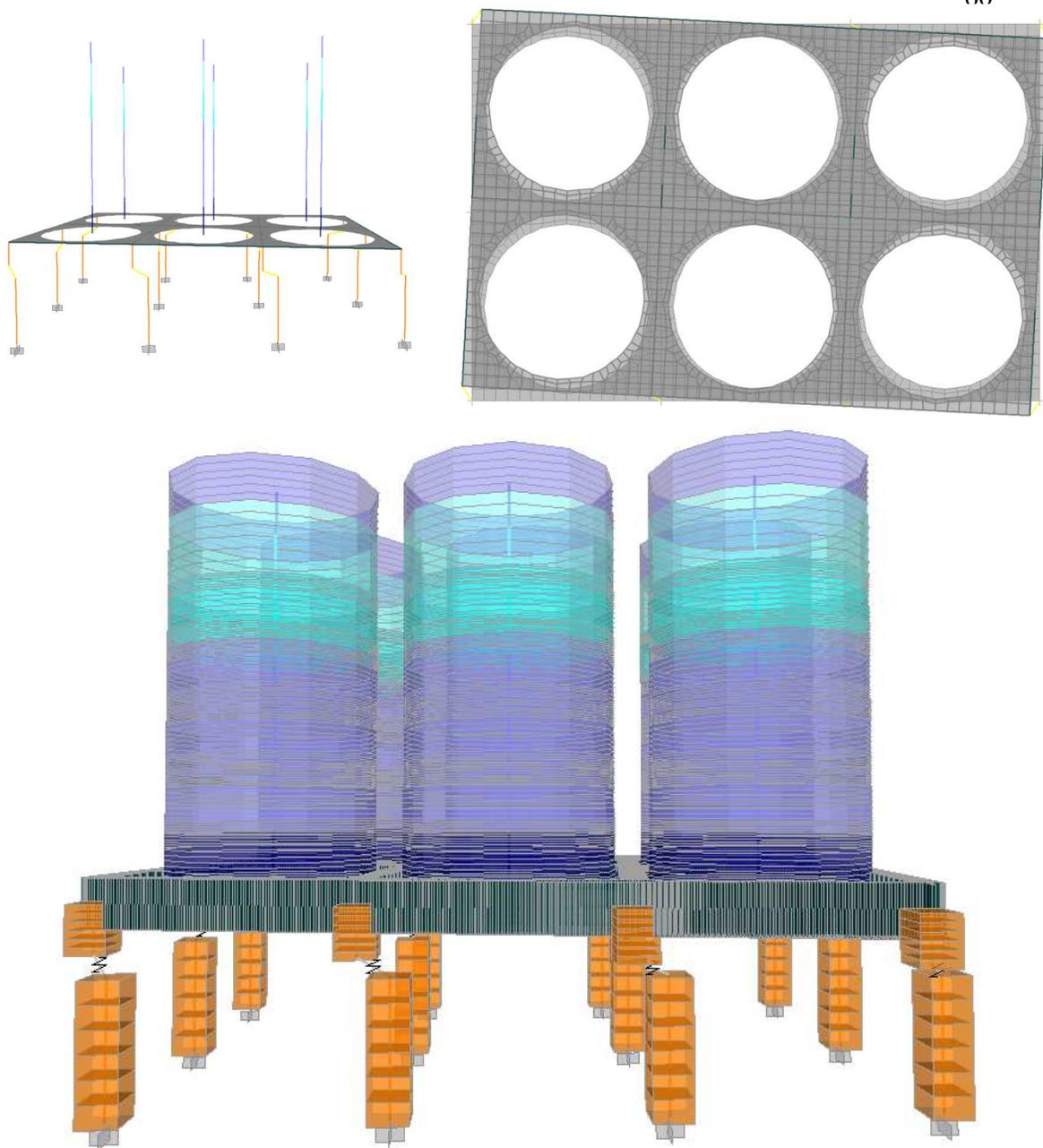


Figura IV.9 Tercera forma modal $\theta_z = 1.48$ seg.

Espectro de Diseño

Es importante mencionar que este espectro, a diferencia del espectro de diseño considerado en la estructuración en base fija, corresponde a un espectro de comportamiento tipo Newmark, generado con la intención de lograr una correcta estimación de desplazamientos, y no corresponde a un espectro calibrado para

obtener niveles de fuerzas “adecuados” para el diseño. Dentro de este contexto puede entenderse como un espectro “predictivo”.

De acuerdo al sistema estructural se consideró lo siguiente:

Tabla IV-4: Parámetros Sísmicos para Espectro de Diseño de acuerdo con NCh2745.

Categoría	I	1	Clasifica como categoría A
Aceleración efectiva	A_o/g	0.40	
Zona Sísmica III	Z	1.25	Factor de zona
Suelo	T_s	II	Tipo de Suelo
	T_a'	0.03	Seg.
	T_b'	0.20	Seg.
	T_c'	0.54	Seg.
	T_d'	2.00	Seg.
	T_e'	10.00	Seg.
Amortiguamiento	ξ	0.05	Estructura de HA
	ξ_b	0.22	Dispositivos de aislación
F. Reducción de Resp.	R	2	Estructuras de Marcos

Respecto a la acción sísmica vertical se consideró lo dispuesto en el punto 5.5.1 b) de la normativa NCh2369 considerando un coeficiente sísmico vertical igual a $2/3(A_o/g)$, equivalente a 0.27.

El amortiguamiento adicional en los modos aislados que provee el sistema incorporado es modelado a través de una disminución de la demanda espectral. Como metodología de simplificación del diseño se incorpora dicha disminución exclusivamente en la zona de periodos aislados, de forma de no sobre-amortiguar aquellos modos superiores que no movilizan mayormente la interfaz de aislamiento. Lo anterior genera una discontinuidad en la demanda espectral aproximadamente en el periodo 1.2 seg (80% del periodo aislado mínimo).

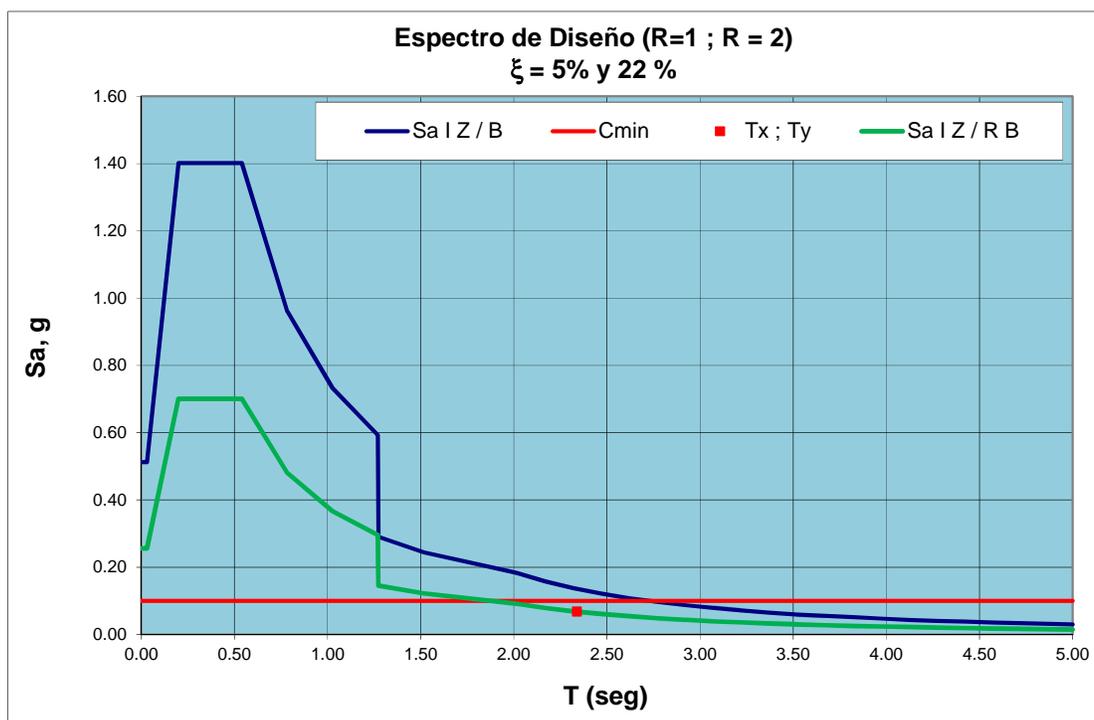


Figura IV.10 Espectro de Diseño de pseudo-aceleraciones NCh2745

Respecto a la demanda espectral de desplazamientos se tiene lo siguiente:

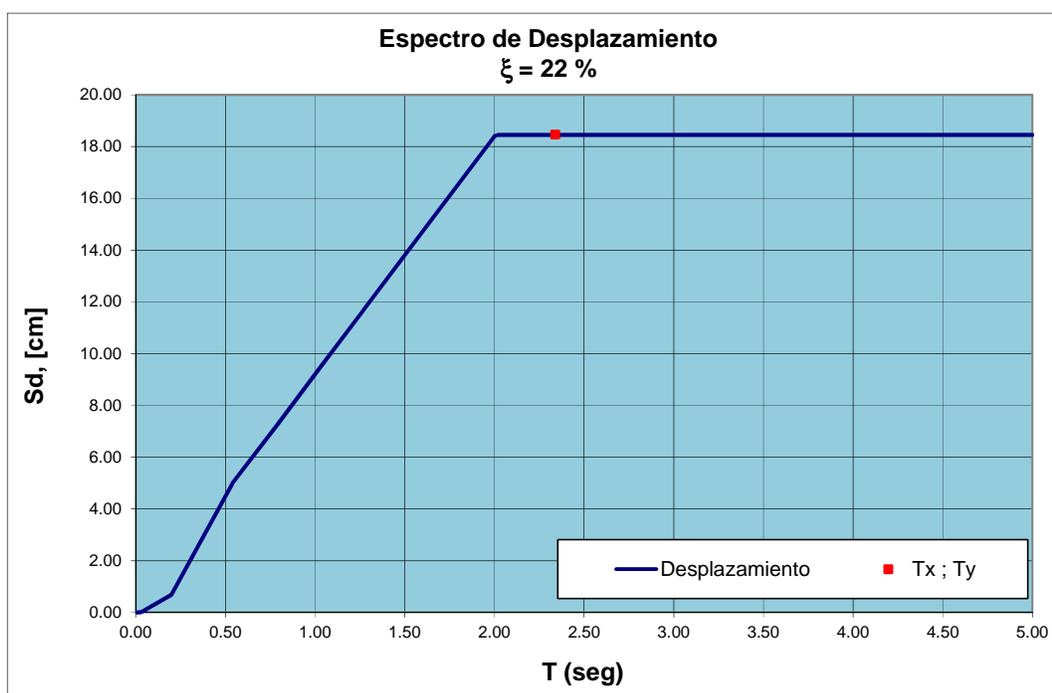
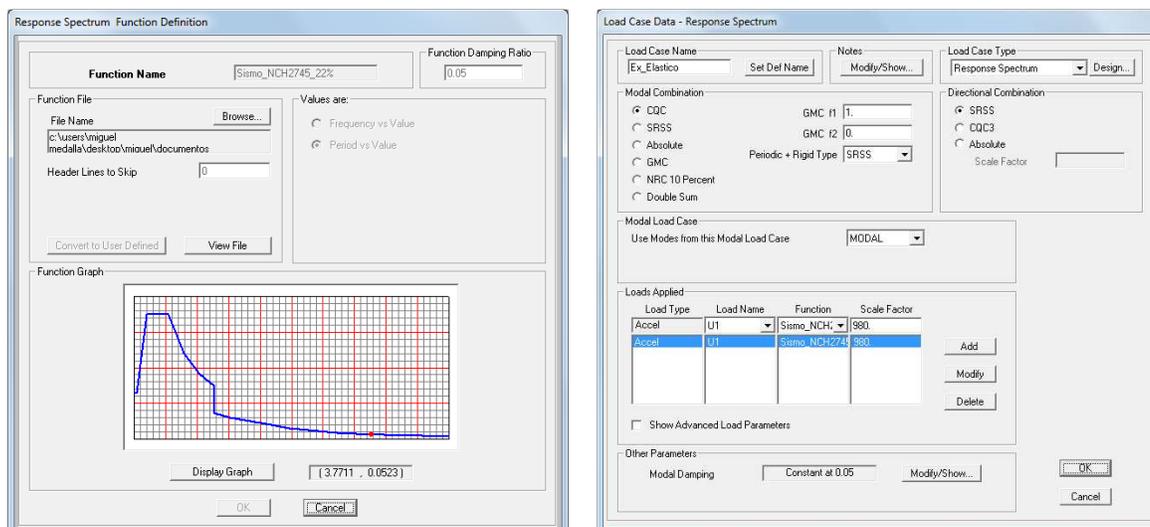


Figura IV.11 Espectro de Diseño de desplazamientos NCh2745

Desde el punto de vista de la modelación computacional tenemos lo siguiente:



Modelación de Espectro de diseño

Excitación sísmica Elástica,
Dirección Longitudinal

Figura IV.12 Modelación de Análisis Espectral

Es importante mencionar que la demanda sísmica indicada en la figura corresponde al nivel elástico, esto es, debe modificarse de acuerdo a las distintas necesidades del diseño, por un factor de reducción de respuesta $R=2$ para la determinación de solicitaciones en la superestructura y $R=1.5$ para la determinación de las solicitaciones en la subestructura. Para el diseño del dispositivo de aislación en cambio, debe amplificarse la demanda de acuerdo a los factores indicados (Sismo máximo creíble), pero generando una modelación independiente con las propiedades linealizadas para este efecto.

IV.4 Reacciones Basales

Tabla IV-5: Reacciones Basales

Reacciones Basales				
Estado de Carga	Tipo de Carga	FX	FY	FZ
		T	T	t
PP _{HA}	Estática	0	0	971
PP _{mat}	Estática	0	0	3062
PP _{Eq}	Estática	0	0	77
PP _{Silo}	Estática	0	0	225
Ex_Elástico	Espectral	561	0	0
Ey_Elástico	Espectral	0	561	0
Ev	Estática	0	0	1170
Peso Sísmico [t]				4335
Corte mínimo normativo [t]				434

Vemos en la tabla anterior que el uso de los valores R que la normativa permite para el diseño no pueden ser aplicados en el caso en estudio. Lo anterior se debe a que al aplicar dichos valores el corte sísmico de diseño queda por debajo del mínimo definido. En consecuencia, sólo pueden utilizarse los siguientes valores máximos del factor de reducción.

$R_{\text{eff}_y} = 1.29$ Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección x para diseño de súper y subestructura.

$R_{\text{eff}_y} = 1.29$ Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección y para diseño de súper y subestructura.

Lo anterior establece que si el diseño del sistema estructural resulta ajustado desde el punto de vista de resistencia, ante un evento sísmico severo la estructura permanecerá, por lo menos desde el punto de vista de diseño, 100% elástica,

evitando todo daño estructural. Básicamente el factor $R=1.29$ indica que los niveles de carga ni siquiera demandarán la totalidad de la sobre-resistencia propia del sistema estructural.

IV.5 Diseño Dispositivo de Aislación

Finalmente las demandas y condiciones de diseño finales para el dispositivo de aislación son las siguientes:

Compresión de Largo Plazo [P_{LP}]	:	936 t
Compresión de Corto Plazo [P_{CP}]	:	878 t
Compresión Mínima [P_{min}]	:	110 t
Peso Sísmico sobre Aislador [W]	:	698 t
Desplazamiento de Diseño [D_{TD}]	:	185 mm
Desplazamiento de Máximo [D_{TM}]	:	239 mm
ξ Diseño	:	22%
ξ Máximo	:	19%

AISLADOR ELASTOMERICO CIRCULAR CON NUCLEO DE PLOMO

Diseño Final Dispositivos

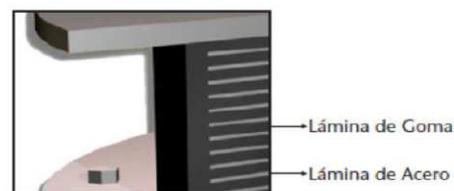
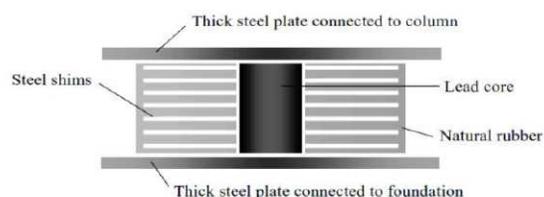
Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	185 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	239 mm

Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	936.0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	878.0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	110.0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	698.0 tonf

Características de los aisladores

Diámetro del aislador	D	100 cm
Diámetro del núcleo de plomo	d_p	15 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0.8 cm
Numero laminas de goma	n_r	44
Altura total de goma	H_r	35.2 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0.3 cm
Altura total del aislador	h	48.1 cm
Módulo de corte de la goma	G	6.5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	7677 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	251 cm ²
Primer factor de forma	S	30.5
Inercia sección bruta	I	4906253 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	10622 kgf/cm ²
	$(EI)_{ef}$	1.74E+10 kgf cm ²
Rigidez al corte postfluencia	k_p	1630 kgf/cm
Rigidez axial	K_{axial}	2831 tonf/cm
Rigidez flexural	$K_{flexural}$	493498 tonf cm

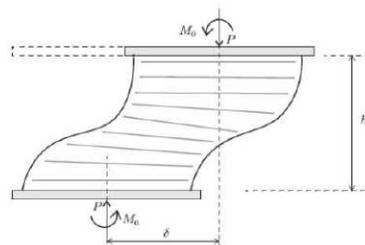


Carga crítica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	70 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	101261 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	2623 tonf
Tensión de pandeo	P_{cr}	342 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	878 tonf
Área de corte efectiva	A_s	10491 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	1285 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_h	1630 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	346 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	21.21 %



Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	$\sigma_{ADM LP}$	130.0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	121.9 kg/cm ²
	FU	0.94 OK

Considera FS = 1.67

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Área de superposición	A_r	5487 cm ²
	A_r/A_c	0.71 OK
Carga de colapso	$A_r p_{cr}$	1875 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	878 tonf
	FU	0.47 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	160 kg/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	1822 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	58.38 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	18.50 cm
	FS	3.16

Deformación angular total máxima

Deformación angular por corte	γ_s	0.68
Deformación angular por flexión	γ_b	0.00
Área efectiva de compresión	A_r	5487 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	160.0 kgf/cm ²
	E_0	35.0 kgf/cm ²
	k	1.0
	ϵ_c	2.449 x10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	0.45
Deformación angular total	γ_0	1.13
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5.5
Deformación angular total limite	$\gamma_0 \text{ lim}$	4.68
Factor de seguridad	FS	4.15

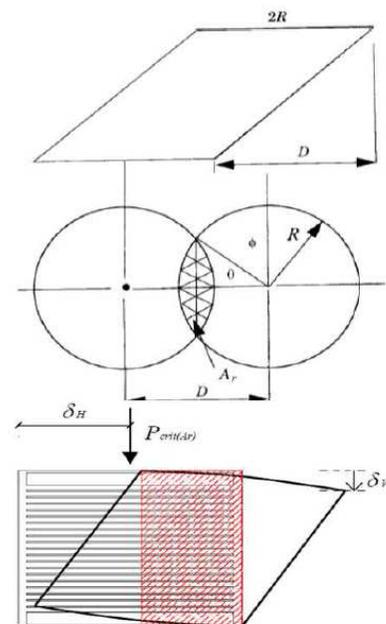
Frecuencia vertical

Periodo vertical	T_v	0.10 seg
Frecuencia vertical	f_v	10.0 Hz
Frecuencia vertical mínima	$f_{v \text{ min}}$	10.0 Hz

Placas de acero

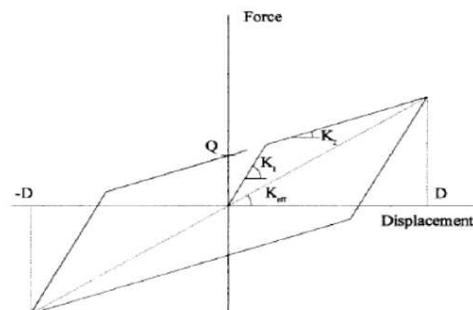
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	160.0 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	121.9 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	σ_{tCP}	0.569 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	σ_{tLP}	0.433 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2.400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	F_{tCP}	1.911 tonf/cm ²
Tracción admisible Largo Plazo	F_{tLP}	1.437 tonf/cm ²

F_{UCP}	0.30 OK
F_{ULP}	0.30 OK



Propiedades linealizadas (W_p) - Sismo Diseño -

Deformación de corte de diseño	γ	0.53
Modulo de Corte efectivo	$G (\gamma)$	6.50 kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0 kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	17.7 tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p (k_2)$	1630 kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i (k_1)$	16303 kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2586 kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1.20 cm
Fuerza de fluencia	F_y	19.6 tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	3.30 seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.22



Propiedades linealizadas (W_M) - Sismo Máximo -

Deformación de corte máxima	γ	0.68
Modulo de Corte efectivo	$G (\gamma)$	6.50 kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0 kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	17.7 tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p (k_2)$	1630 kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i (k_1)$	16303 kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2370 kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1.20 cm
Fuerza de fluencia	F_y	19.6 tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	3.44 seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.19

Figura IV.13 Verificación Final Aisladores Elastoméricos

IV.6 Solicitaciones en Silo de Acero

Dado que la respuesta de los sistemas estructurales aislados permanece dentro del rango elástico (al menos desde el punto de vista teórico), es que en esta etapa no se debe hacer corrección alguna para la evaluación de las solicitaciones de diseño de los silos de acero. Con esto, la lectura de los momentos solicitantes es directamente la que el modelo de análisis nos indica para el corte sísmico mínimo definido.

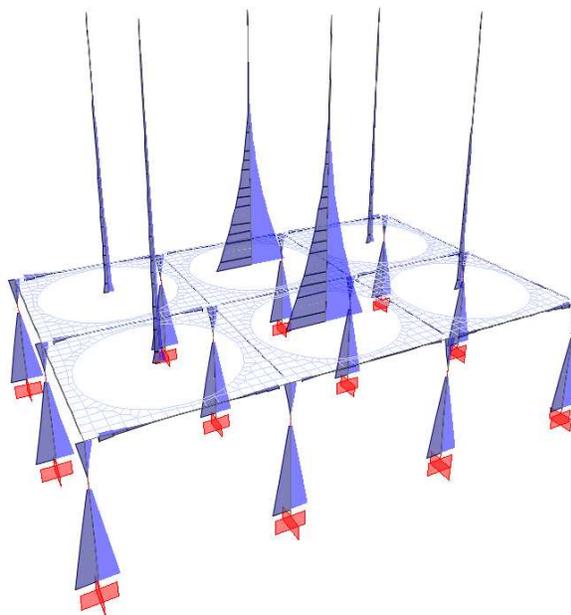


Figura IV.14 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección longitudinal.

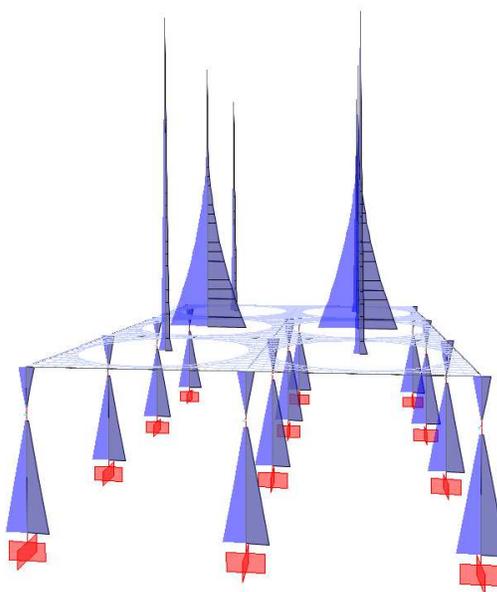


Figura IV.15 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección transversal.

A continuación se muestra la máxima distribución de momento flector registrada en los Silos.

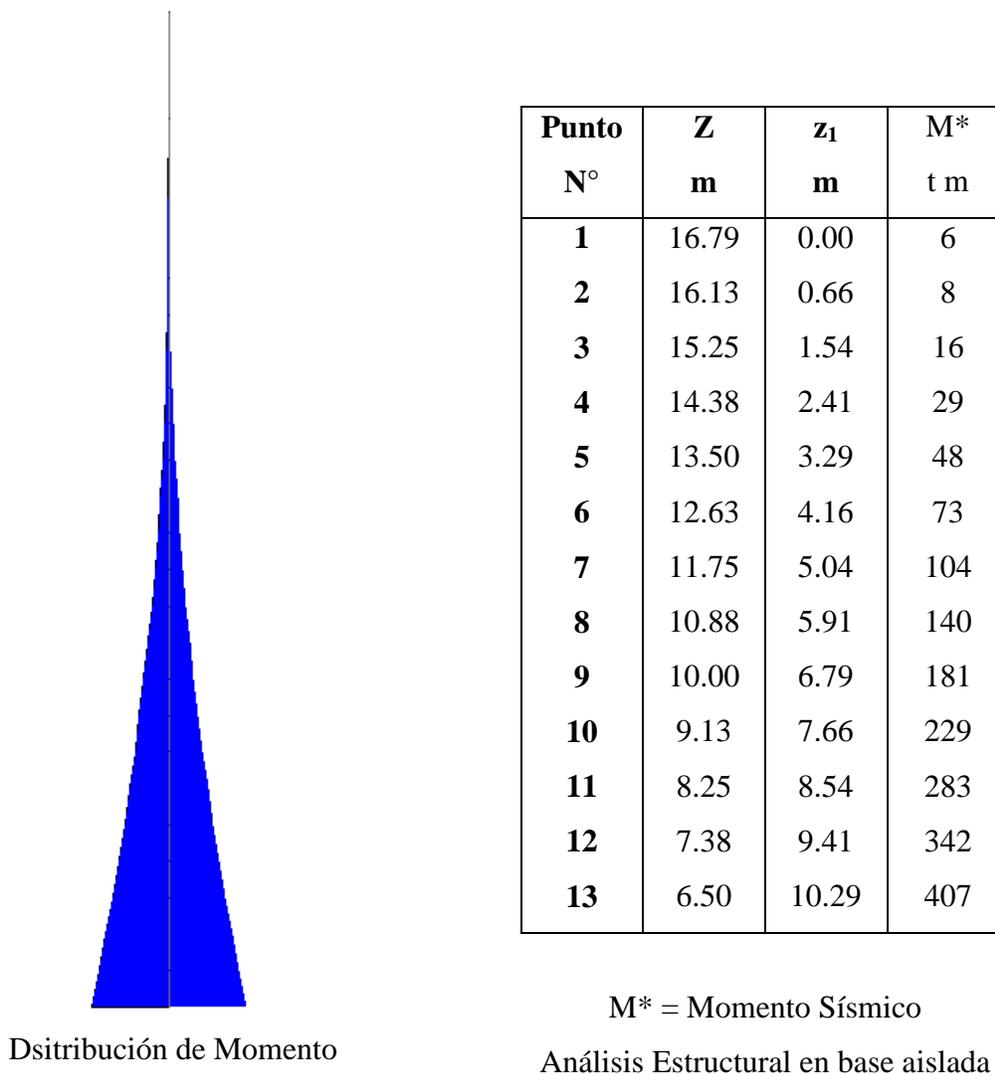


Figura IV.16 Distribución y discretización en altura de Momento flector para máxima acción sísmica

V ANÁLISIS SÍSMICO EXCENTRICO DE ESTRUCTURA AISLADA

El análisis de la condición de distribución excéntrica de la carga almacenada dentro del conjunto de silos corresponde a una corrección del caso presentado en el capítulo anterior. Por tal motivo sólo se registran en el presente capítulo las diferencias principales que este nuevo análisis aporta a la solución del problema.

V.1 Solicitaciones de Diseño

Cargas de Material – Condición Sísmica Excéntrica

Como ya se ha dicho, la condición de llenado probable al momento de producirse el sismo de diseño corresponde, por motivos de proceso, a los silos operando en su conjunto en un nivel de llenado medio. De esta forma, la carga total de material en el edificio no supera a la equivalente de los seis silos operando al 50% de su capacidad volumétrica.

El capítulo anterior da cuenta del caso en el cual los dos silos centrales se encuentran operando en su nivel máximo (80%) mientras los otros cuatro se encuentran operando al 35%. Situación que evita la generación de torsiones en planta significativas para el sistema.

El presente capítulo explora la opción de excentricidades naturales máximas del centro de masas del sistema de almacenamiento. Consecuentemente, se analiza el caso límite en el cual dos silos de un extremo se encuentran operando en su nivel máximo (80%) mientras los otros cuatro se encuentran operando al 35%. De esta forma se espera modelar la máxima torsión que pudiera experimentar el sistema.

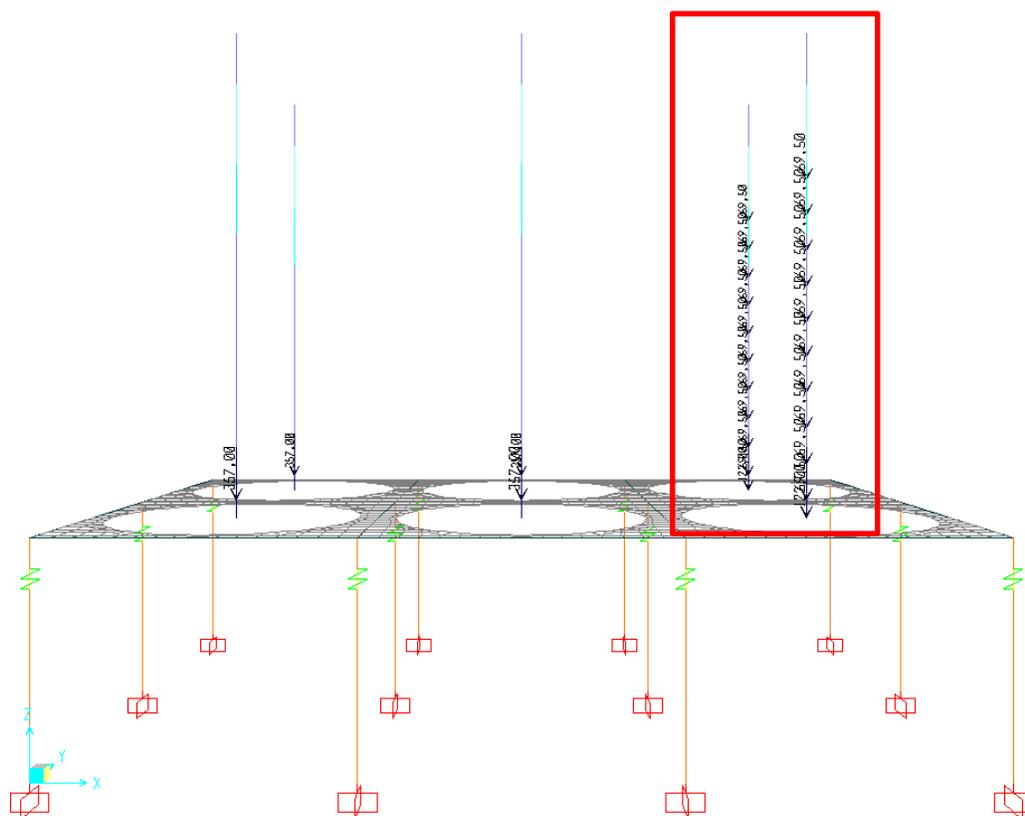


Figura V.1: Modelación de carga de material en condición excéntrica

V.2 Análisis Sísmico

Espectro de Diseño

Inicialmente se considera un espectro de diseño reducido de acuerdo a un amortiguamiento promedio esperado para los modos aislados igual al originalmente considerado, un 22%.

Categoría	B	I	1.0	A_o	0.4 g
Zona	3	Z	1.25	β	22.0 %
Suelo	II	M_M	1.2	B	2.03
<input checked="" type="checkbox"/> Edificio industrial.		T_a	0.03 seg	T_D	2.00 seg
R	Pórticos - Hormigón armado	T_b	0.2 seg	$S_a(T_D)$	0.301 g
		T_c	0.54 seg	$S_a Z / R_1 B$	0.093 g
		T_d	2 seg	C_{min}	0.100
		T_e	10 seg	$C_{diseño}$	0.100
		PGA	0.41 g	$S_d(T_D)$	29.92 cm
		α_A	1100 cm/s ²	S_d / B	14.72 cm
		α_V	94 cm/s	D_D	184.5 mm
		α_D	30 cm	D_M	221.5 mm
		R_1	2.0	$D_{TD min}$	203.0 mm
		T_0	1.60 seg	$D_{TM min}$	243.6 mm

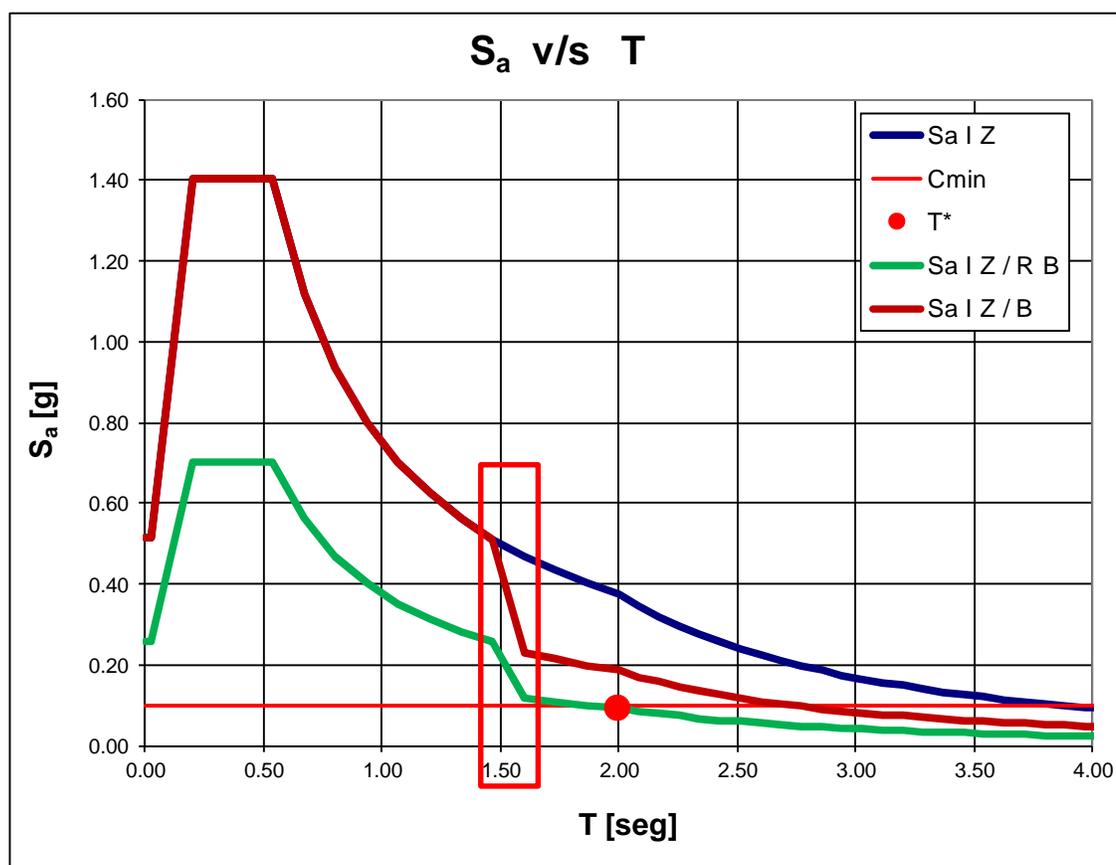


Figura V.2: Espectro de Diseño de pseudo-aceleraciones NCh2745

Análisis Modal

Tabla V-1: Periodos y Masas Modales

StepNum	Period	UX	UY	SumUX	SumUY
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	2.412	0.000	0.927	0.000	0.927
2	2.351	0.977	0.000	0.977	0.927
3	1.681	0.000	0.050	0.977	0.977
4	0.178	0.000	0.000	0.977	0.977
5	0.161	0.000	0.000	0.977	0.977
6	0.155	0.000	0.000	0.977	0.977
7	0.124	0.000	0.000	0.977	0.977
8	0.113	0.000	0.000	0.977	0.977
9	0.090	0.000	0.000	0.977	0.977
10	0.076	0.000	0.000	0.977	0.977

La tabla anterior muestra como la condición de carga excéntrica ha modificado los períodos fundamentales efectivos de la estructura, situación que era de esperarse. Sin embargo, preliminarmente las variaciones no parecen ser tan sustanciales como podría esperarse en un caso de máxima excentricidad posible.

A continuación se adjuntan imágenes de las formas modales obtenidas.

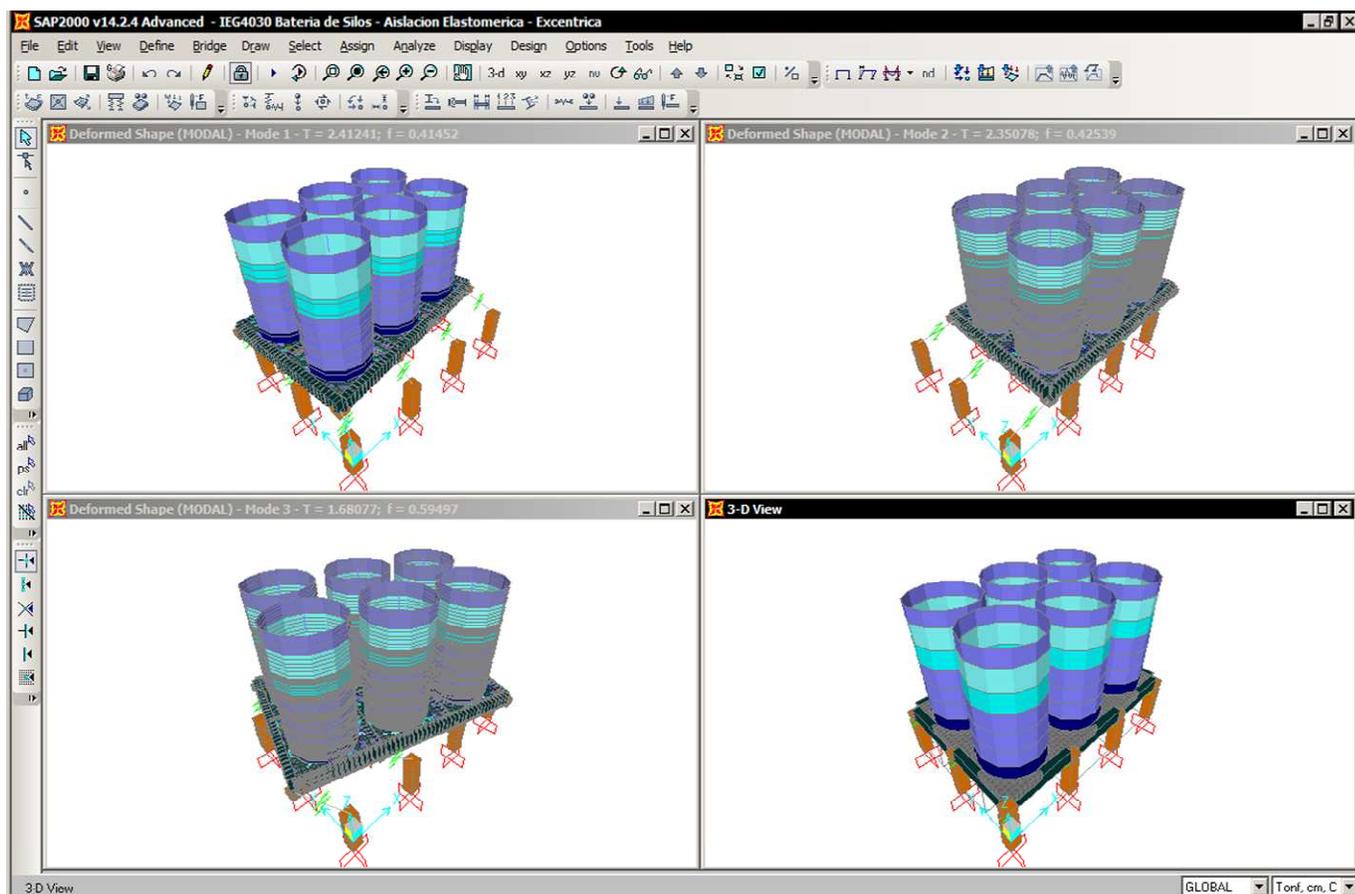


Figura V.3: Formas modales

Resulta claro que la excentricidad de masas en relación al centro de rigidez del conjunto de aisladores causa una torsión en planta acoplada con el modo traslacional transversal. Esta situación puede causar un aumento local sustancial en los desplazamientos que los aisladores deben tolerar.

V.3 Reacciones Basales

Tabla V-2: Reacciones Basales

Reacciones Basales				
Estado de Carga	Tipo de carga	FX t	FY t	FZ t
PP	Estática	0	0	1194
PPeq	Estática	0	0	77
MATsis	Estática	0	0	3062
Ex_Elástico	Espectral	553	0	1
Ey_Elástico	Espectral	0	529	0
Ev	Estática	0	0	1157
Peso Sísmico [t]				4333
Corte mínimo normativo [t]				433

Vemos como similarmente al caso concéntrico las respuestas reducidas quedan bajo los mínimos considerados, situación que obliga a utilizar factores de reducción menores a los estándares que permitiría este tipo de diseños.

$R_{\text{effx}} = 1.28$ Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección x para diseño de súper y subestructura.

$R_{\text{effy}} = 1.22$ Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección y para diseño de súper y subestructura.

$AMP_x = 1.57$ Factor de amplificación del corte reducido en dirección x

$AMP_y = 1.64$ Factor de amplificación del corte reducido en dirección y

V.4 Deformaciones Sísmicas

Tabla V-3: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Interfaz de Aislación

Dirección de deformación	Max cm	Min cm	Prom. cm
Transversal	20.73	15.43	18.08
Longitudinal	18.35	18.35	18.35

De la tabla se puede observar que la linealización original realizada (sin excentricidad) y el amortiguamiento considerado (22%) resultan suficientemente razonables para efectos de diseño práctico. Lo anterior basándonos en que el valor de diseño original es 18.5 cm, mientras que el promedio en la dirección transversal para la nueva condición resultó ser 18.1 cm.

Si bien a nivel de interfaz los valores no han variado sustancialmente, sí lo ha hecho la distribución de los mismos. Este tema se revisa en detalle al realizar las verificaciones del aislador más exigido.

Tabla V-4: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Techo

Dirección de deformación	Max cm	Min cm	Prom. cm
Transversal	19.73	16.02	17.88
Longitudinal	18.54	18.34	18.44

De acuerdo a la norma NCh2369, se tiene que la deformación máxima admisible corresponde a:

Altura de techo	19.65	m
Def. límite	29.48	cm

La verificación de la deformación total de techo de acuerdo a la normativa tradicional utilizada para la aceptación de estructuras no aisladas obedece al siguiente criterio.

Mientras esta deformación se encuentre dentro del límite considerado, podremos asumir que la llegada de los equipos que vienen desde el exterior de la estructura hasta el nivel de techo de los silos, no requerirán de ingeniería adicional o soluciones de mayor costo y complejidad con el fin de tolerar o adecuar desplazamientos mayores a las usuales originados por el uso del sistema de aislación. Los posibles equipos a los que nos referimos corresponden a sistemas de correas transportadoras que realizan el llenado de los silos, u otros sistemas afines. Si no se deseaba que estos equipos acoplaran sistemas estructurales antes de la incorporación del sistema de aislamiento, que es la situación más común, debían ser capaces de absorber deformaciones mayores que las que se exigen luego de la aplicación del aislamiento sísmico.

V.5 Verificación Dispositivo de Aislación

Como ya se ha dicho, debido a la diferencia de niveles de llenado de los silos entre la condición de operación normal y la condición sísmica, la compresión máxima en los aisladores se produce en el largo plazo (condición estática), en lugar del corto plazo (condición sísmica). Esta situación condiciona el tamaño en planta de los dispositivos.

En la figura siguiente, la cual muestra la ubicación y numeración de los dispositivos de aislamiento, se destaca también la ubicación de los silos que albergan mayor carga para efectos del diseño sismo-resistente.

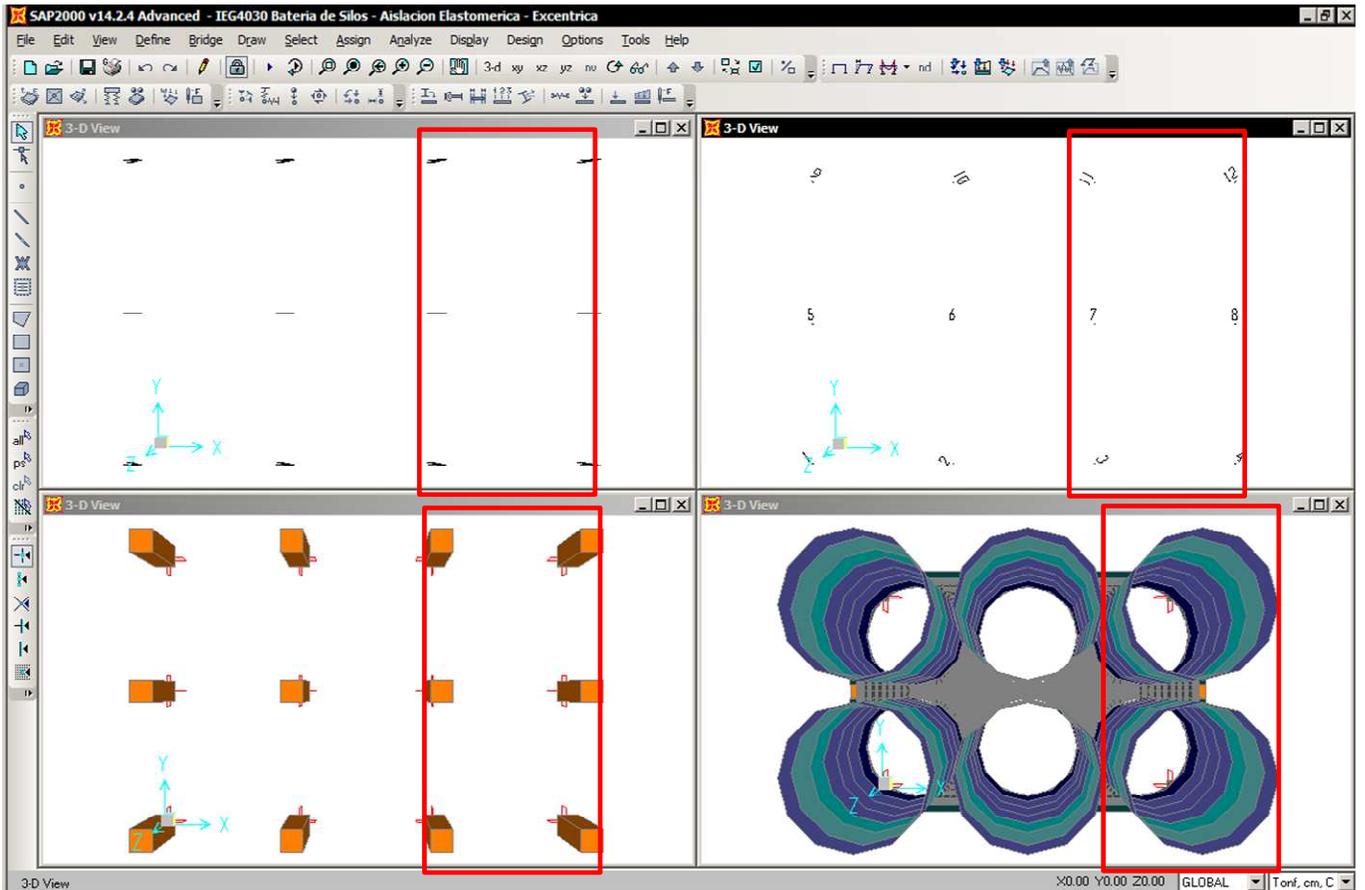


Figura V.4: Numeración de dispositivos y ubicación de Silos a máxima carga

Son los aisladores que rodean los silos destacados aquellos que presentan las mayores exigencias para efectos del diseño, tanto desde el punto de vista de la carga axial como de las deformaciones.

Solicitaciones en aisladores

Tabla V-5: Compresiones de diseño

Aislador	P_{A1}	P_{max Ax}	P_{min Ax}	P_{max Ay}	P_{min Ay}
	ton	ton	ton	Ton	ton
7	934	859	526	831	554
8	531	669	358	616	411
3-11	561	532	319	547	304
4-12	198	306	139	302	143

Compresión mínima en toda la planta: 63ton en aisladores 1-9.

En la tabla anterior puede notarse como varían de gran forma las solicitaciones de compresión de un aislador a otro, por lo que claramente podrían utilizarse dispositivos diferentes. Sin embargo se ha considerado en esta ocasión que por motivos de estandarización todos los dispositivos deben ser idénticos. En este escenario, es el aislador que concentre las mayores demandas el que defina la aceptación de los dispositivos.

Por otra parte, se aprecia también que en el caso en estudio, es en general la condición estática la que entrega las mayores compresiones sobre los dispositivos, a excepción del aislador tipo 8, que presenta un notable aumento de compresión debido al momento volcante sísmico de los silos más cargados.

Deformaciones de diseño

Tabla V-6: Deformaciones de diseño

Aislador	d_{max Ax}	d_{max Ay}
	cm	cm
7	17.8	18.0
8	17.9	20.1
3-11	17.8	18.3
4-12	17.9	20.4

En la tabla anterior puede notarse como los desplazamientos en la dirección longitudinal no presentan variaciones considerables, esto debido a la inexistencia de excentricidades para esta dirección. Sin embargo en la dirección transversal la variación resulta notoria.

Considerando conjuntamente las solicitaciones de compresión y de desplazamiento podemos notar que deben ser verificados los aisladores tipo 7 (máxima compresión) y tipo 8 (máximo desplazamiento). Por simplicidad se decide usar coincidentemente la mayor compresión y desplazamiento. Lo anterior, atendiendo al requisito de desplazamiento total mínimo de diseño que establece NCh2745, el cual se activa para el caso del aislador tipo 7.

$$D_{TD \min}: 20.3\text{cm}$$

Los dispositivos específicos a verificar corresponden al estándar que provee la empresa VULCO (proveedor nacional típico), los cuales son similares a lo que se muestra en la siguiente figura.

VULCO

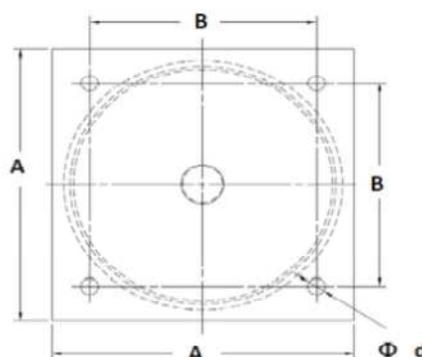
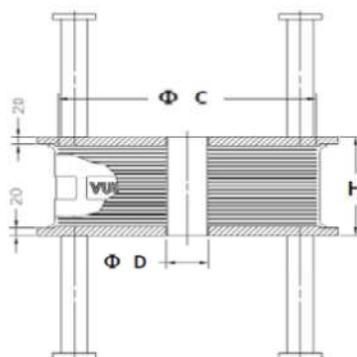
RUBBER SEISMIC ISOLATORS

MECHANICAL PROPERTIES

Vertical Stiffness : 150 Kg / cm²
 Horizontal Stiffness : 4 @ 9 Kg / cm²
 Damping - Without Lead : 8 @ 15 %
 Damping - With Lead : < 25 %
 Tensile Strength : 110 @ 220 Kg / cm²
 Horizontal Deformation : 400 %

GENERAL MATERIALS

Top Plate : Steel ASTM A36
 Bottom Plate : Steel ASTM A36
 Metal Reinforcement : Steel ASTM A36
 Lead Core : 99.9 % Pb
 Elastomer : Special Natural Rubber
 Painting : Epoxy



GENERAL DIMENSIONS				
Diameter (C) (mm)	Diameter (D) (mm)	Height (H) (mm)	Square - Side (A) (mm)	Diameter (d) (mm)
400	TO BE DEFINED BY CUSTOMER	TO BE DEFINED BY CUSTOMER	500	TO BE DEFINED BY CUSTOMER
450			550	
500			600	
550			650	
600			700	
650			750	
700			800	
750			850	
800			900	
850			950	
900			1000	
950			1050	
1000			1100	

Note : If you need a special dimension please contact us

Vulco S.A
 Weir Minerals Chile
 Av. San José 0815
 San Bernardo ,
 Santiago - Chile
 Phone : + 56 (2) 754 2200
 e-mail : ventas@weirminerals.cl



Figura V.5: Datos generales para diseño. Proveedor VULCO.

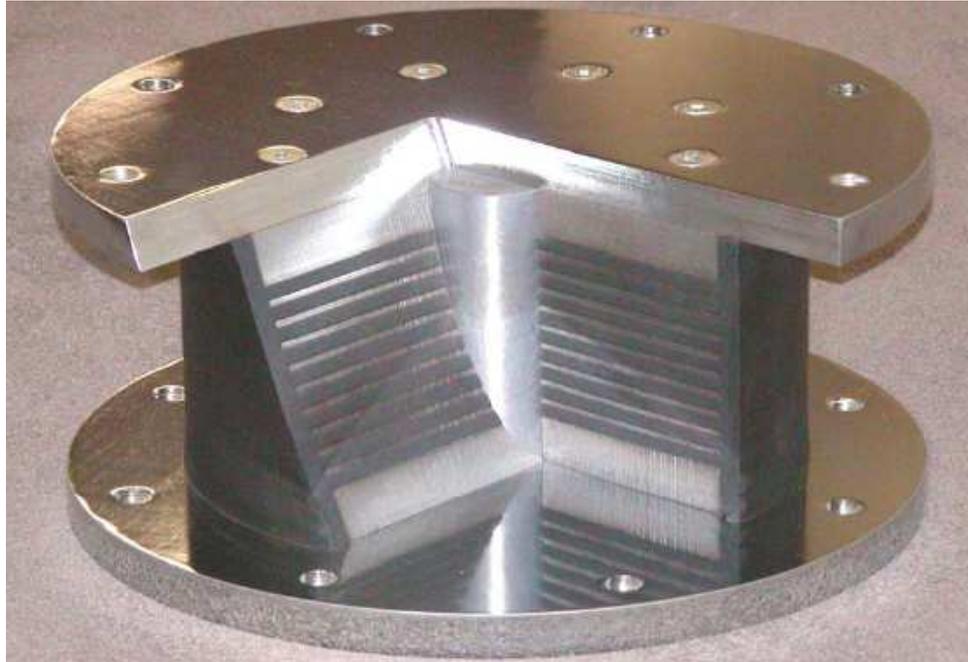


Figura V.6: Aislador elastomérico con corazón de plomo

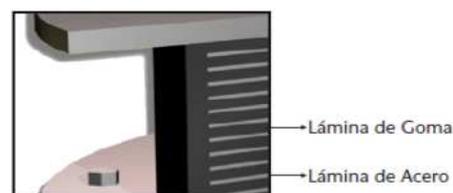
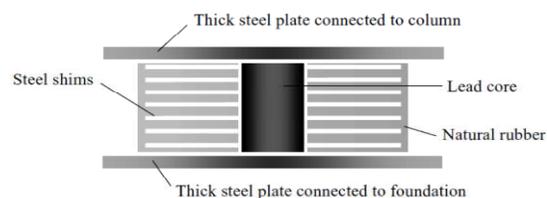
A continuación se entrega la verificación formal del dispositivo de aislación utilizado.

Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	203 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	244 mm
Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	940,0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	860,0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	65,0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	350,0 tonf

Características de los aisladores

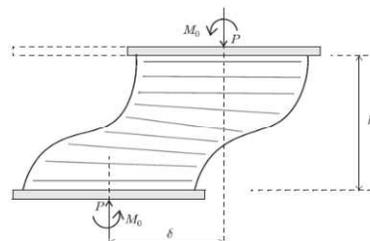
Diámetro del aislador	D	100 cm
Diámetro del núcleo de plomo	d_p	15 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0,8 cm
Numero laminas de goma	n_r	44
Altura total de goma	H_r	35,2 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0,3 cm
Altura total del aislador	h	48,1 cm
Módulo de corte de la goma	G	6,5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	7677 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	251 cm ²
Primer factor de forma	S	30,5
Inercia sección bruta	I	4906253 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	10622 kgf/cm ²
	$(E)_{ef}$	1,74E+10 kgf/cm ²
Rigidez al corte postfluencia	k_p	1630 kgf/cm
Rigidez axial	k_{axial}	2831 tonf/cm
Rigidez flexural	$k_{flexural}$	493498 tonf cm

Carga crítica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	70 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	101261 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	2623 tonf
Tensión de pandeo	p_{cr}	342 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	860 tonf
Área de corte efectiva	A_s	10491 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	1290 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_{h0}	1630 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	340 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	20,87 %

Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	$\sigma_{ADM LP}$	130,0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	122,4 kg/cm ²
	FU	0,94 OK

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Área de superposición	A_r	5438 cm ²
	A_r/A_c	0,71 OK
Carga de colapso	$A_r p_{cr}$	1858 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	860 tonf
	FU	0,46 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	158 kg/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	1805 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	45,32 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	20,30 cm
	FS	2,23

Deformación angular total máxima

Deformación angular por corte	γ_s	0,69
Deformación angular por flexión	γ_b	0,00
Área efectiva de compresión	A_r	5438 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	158,1 kgf/cm ²
	E_0	35,0 kgf/cm ²
	k	1,0
	ϵ_c	2,420 x 10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	0,44
Deformación angular total	γ_0	1,14
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5,5
Deformación angular total límite	$\gamma_{0 lim}$	4,68
Factor de seguridad	FS	4,11

Frecuencia vertical

Periodo vertical	T_v	0,07 seg
Frecuencia vertical	f_v	14,2 Hz
Frecuencia vertical mínima	$f_{v min}$	10,0 Hz

Placas de acero

Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	158,1 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	122,4 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	$\sigma_{t CP}$	0,562 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	$\sigma_{t LP}$	0,435 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2,400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	$F_{t CP}$	1,911 tonf/cm ²
Tracción admisible Largo Plazo	$F_{t LP}$	1,437 tonf/cm ²

FU_{CP} **0,29 OK**
FU_{LP} **0,30 OK**

Propiedades linealizadas (W)

	Diseño	Máximo	
Deformación de corte	γ	0,58	0,69
Modulo de Corte efectivo	$G(\gamma)$	6,50	6,50 kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100,0	100,0 kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	17,7	17,7 tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p(k_2)$	1630	1630 kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i(k_1)$	16303	16303 kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2501	2355 kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1,20	1,20 cm
Fuerza de fluencia	F_y	19,6	19,6 tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	2,37	2,45 seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0,21	0,19

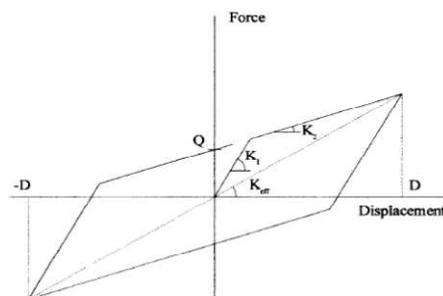
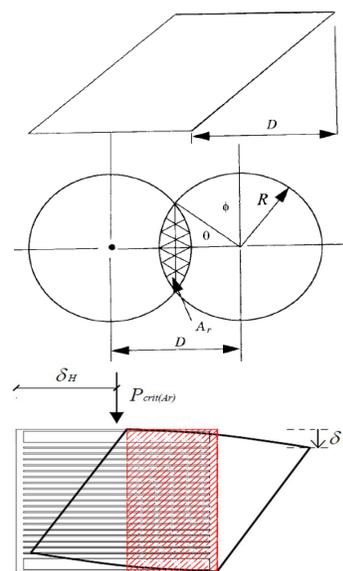


Figura V.7 Verificación Final Aisladores Elastoméricos

De la validación anterior resulta claro que las cargas gravitacionales de largo plazo controlan el diseño, lo que define inmediatamente la superficie mínima de goma a utilizar. En relación a la altura y corazón de plomo. Al tener definidos los desplazamientos mínimos que debe tolerar el aislador y el nivel de amortiguamiento deseado, el periodo efectivo de la superestructura resulta sólo una consecuencia. Recordar que en todos los casos nos encontramos gobernados en superestructura y subestructura por el corte mínimo.

Un punto importante de notar es la amplia reserva de deformación lateral que pueden proveer los dispositivos. Debido al tamaño de los aisladores las deformaciones de diseño no resultan una exigencia mayor para los aisladores, situación que es deseable en la medida que estas deformaciones puedan crecer por motivos inesperados.

Vale la pena detenerse un momento en este concepto de “reserva” de capacidad. En el caso de las estructuras industriales es común realizar actualizaciones en los sistemas productivos, situación que modifica las solicitaciones en las estructuras y exige la realización de revisiones y reacondicionamiento a las mismas. En el caso de los dispositivos de aislamiento la posibilidad de refuerzo o reparación podría considerarse nula para efectos prácticos, por lo que sólo resulta viable el recambio del elemento. En un escenario como este, es deseable que el recambio no se ejecute en la totalidad de los dispositivos, sino sólo en aquellos que puedan desarrollar trabajos más allá de su zona segura.

V.6 Solicitaciones en Silo de Acero

Al igual que en el caso centrado, la respuesta de los sistemas estructurales permanece dentro del rango elástico, por lo que no es necesario hacer corrección alguna para la evaluación de las solicitaciones de diseño de los silos de acero.

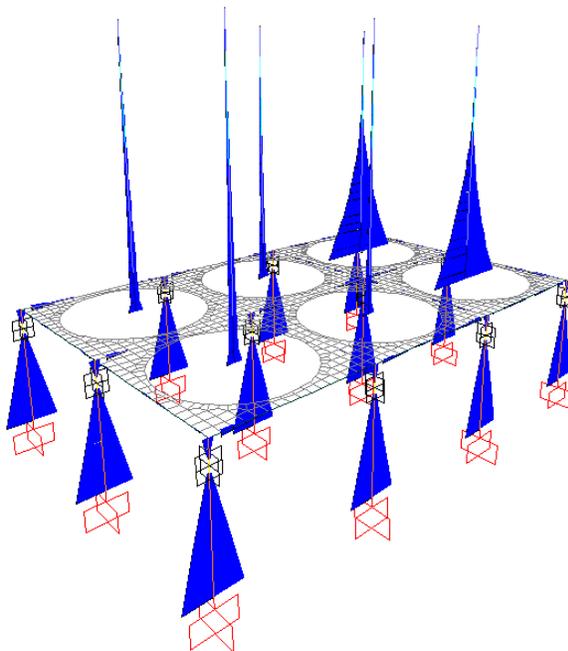


Figura V.8 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección longitudinal.

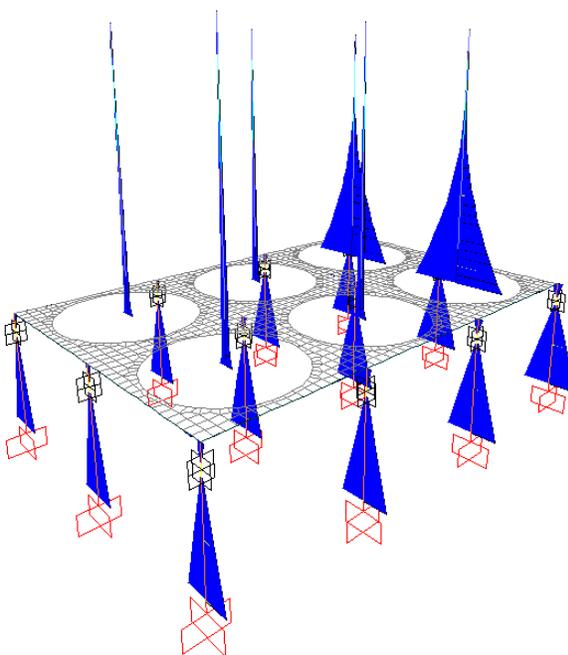


Figura V.9 Distribución de Momento flector para acción sísmica en dirección transversal.

Luego de realizadas las lecturas para las condiciones mostradas en las figuras anteriores, se concluye que efectivamente controla la dirección transversal-excéntrica. Sin embargo, los valores de los momentos volcantes en la altura de los silos no presentan un aumento (tampoco un descenso) en relación al caso centrado.

Lo anterior puede justificarse al pensar que la carga excéntrica si bien ha exigido de mayor forma al sector en donde se encuentran los silos más cargados, también ha flexibilizado el sistema en su dirección transversal, efectos que tienden a compensarse.

VI ANÁLISIS SÍSMICO OPTIMIZADO DE ESTRUCTURA AISLADA

En el presente capítulo se propone un sistema de aislación elastomérico "optimizado", en comparación al uso de un solo tipo de aislador.

La definición de "sistema óptimo" conlleva el cumplimiento de criterios que en principio pueden ser considerados arbitrarios. Sin embargo, en esta ocasión se ha definido como mejora al sistema propuesto originalmente (aisladores idénticos) la disminución del consumo de goma y plomo. Por lo cual, el estudio se centra en el uso de aisladores más pequeños en aquellos apoyos en que sea posible y en la distribución del plomo en el sector perimetral de la estructura. Esto último con la intención de controlar mejor la respuesta torsional natural de la superestructura.

Cabe aclarar que la solución que se propone en el presente capítulo se encuentra diseñada para tolerar las demandas de la condición de carga excéntrica, que es el foco del presente documento, además de las otras cargas de diseño que aplican y que han sido descritas en capítulos anteriores.

VI.1 Pre-diseño Sistema de Aislación Optimizado

Como punto de partida, se decide diseñar los nuevos aisladores en base a las solicitaciones de diseño que corresponden al caso centrado original. Es decir, al caso en que se utilizan aisladores idénticos en cada punto de apoyo.

Posteriormente, se valida el uso de estos aisladores con los resultados del análisis modal espectral. En caso que algún dispositivo no cumpla con los requerimientos de diseño, se procede a realizar una nueva proposición y verificación.

La figura siguiente entrega la numeración de los dispositivos y la ubicación de los silos más cargados en condición sísmica.

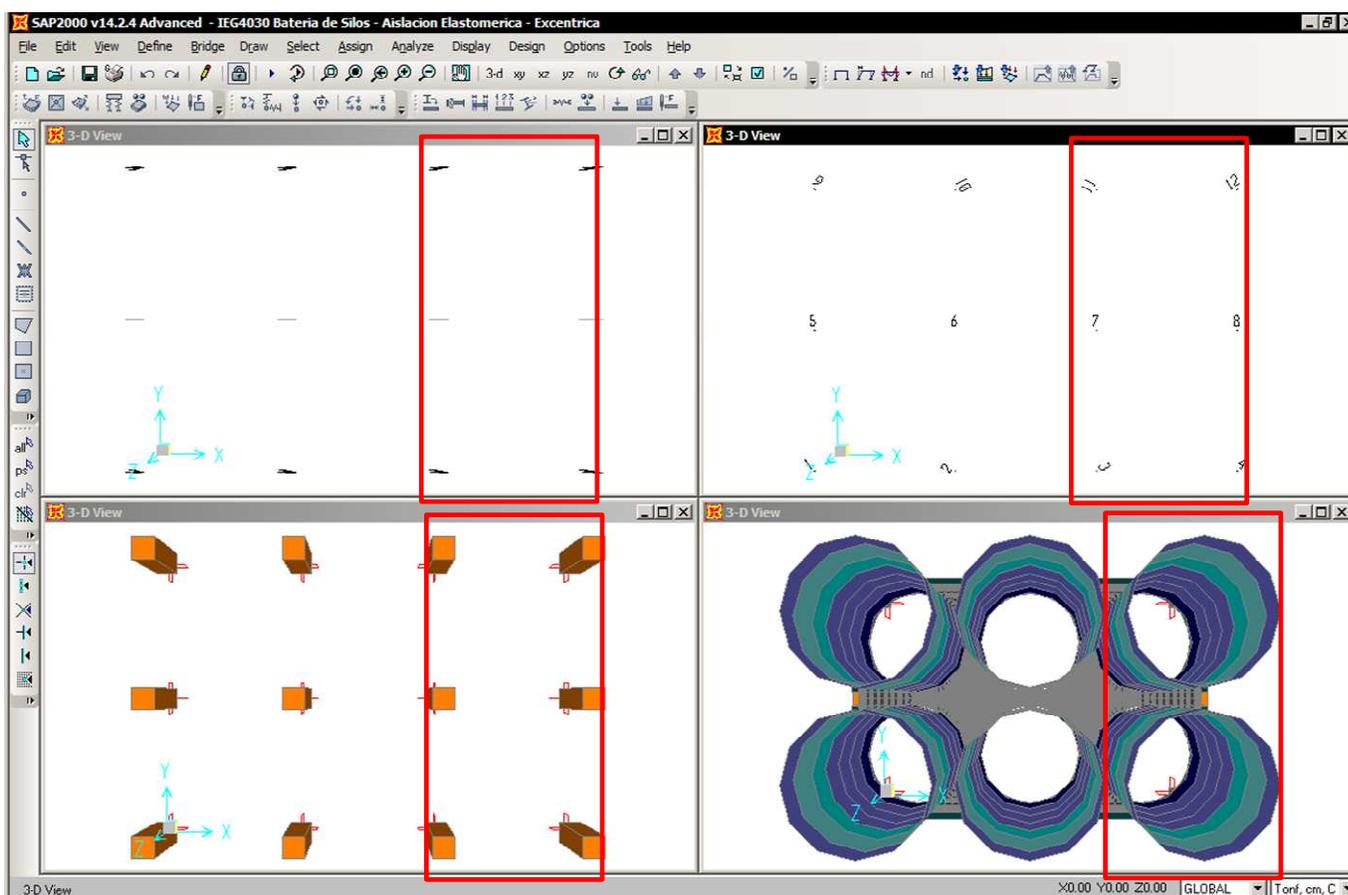


Figura VI.1: Numeración de dispositivos y ubicación de Silos a máxima carga

Solicitaciones en Aisladores

A continuación se presentan los valores preliminares para el diseño de cada uno de los aisladores.

Como se puede ver en las tablas y figuras siguientes, se han definido grupos de aisladores en base a la posición en que estos se incorporan en la interfaz de apoyo. Se debe notar que los aisladores analizados corresponden a una mitad de la estructura debido a que por simetría del problema los aisladores opuestos serán del mismo tipo.

Como decisión de diseño se adopta el uso de aisladores sin corazón de plomo en las posiciones 6 y 7 (centrales).

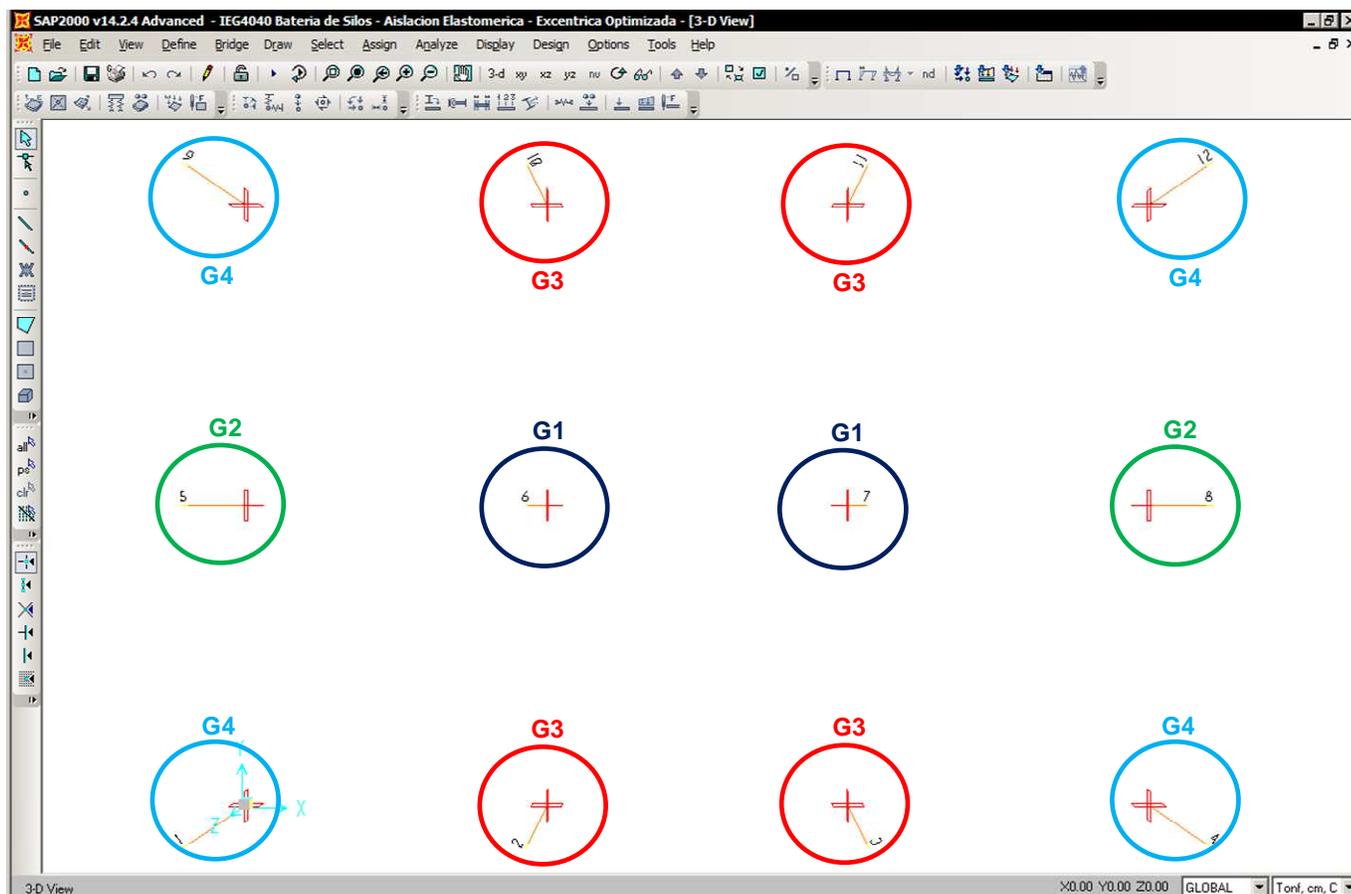


Figura VI.2: Definición de grupos de aisladores

Tabla VI-1: Compresiones de Diseño

Grupo	Aislador	P_{A1} T	$P_{\max Ax}$ T	$P_{\min Ax}$ t	$P_{\max Ay}$ t	$P_{\min Ay}$ t
1	7	934	859	526	831	554
2	8	531	669	358	616	411
3	3-11	561	532	319	547	304
4	4-12	198	306	139	302	143

Compresión mínima en toda la planta 63 t en aisladores 1-9

Atendiendo al requisito de desplazamiento total mínimo de diseño que establece NCh2745, tenemos lo siguiente: $D_{TD \text{ min}}: 20.3\text{cm}$

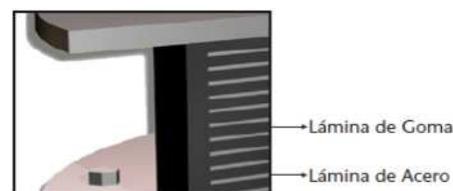
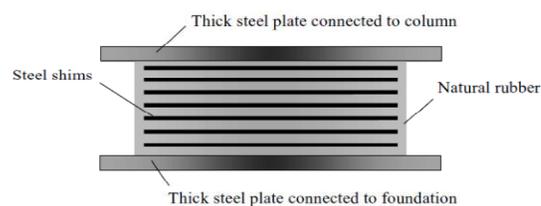
Aislador Preliminar Tipo 1

Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	203 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	244 mm
Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	940.0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	860.0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	65.0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	350.0 tonf

Características de los aisladores

Diámetro del aislador	D	100 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0.8 cm
Numero laminas de goma	n_r	44
Altura total de goma	H_r	35.2 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0.3 cm
Altura total del aislador	h	48.1 cm
Módulo de corte de la goma	G	6.5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	7854 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	251 cm ²
Primer factor de forma	S	31.3
Inercia sección bruta	I	4908739 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	10762 kgf/cm ²
	$(E)_{\text{ef}}$	1.76E+10 kgf/cm ²
Rigidez al corte	k_{corte}	1450 kgf/cm
Rigidez axial	k_{axial}	2401 tonf/cm
Rigidez flexural	k_{flexural}	500245 tonf/cm



Periodo aislado

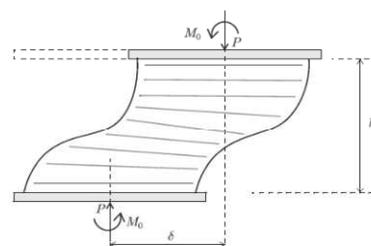
Deformación de corte de diseño	γ	0.58
Modulo de Corte efectivo	$G_{\text{eff}}(\gamma)$	6.50 kgf/cm ²
Amortiguamiento efectivo	$\xi_{\text{eff}}(\gamma)$	0.05
Rigidez lateral efectiva	$k_{\text{h aislador}}$	1.450 tonf/cm
Periodo aislado de diseño	T_D	3.12 seg

Carga crítica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	70 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	102645 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	2641 tonf
Tensión de pandeo	p_{cr}	336 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	860 tonf
Área de corte efectiva	A_s	10732 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	1322 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_h	1450 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	129 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	8.88 %



Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	σ_{ADMPLP}	130.0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	119.7 kg/cm ²
	FU	0.92 OK

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Desplazamiento total máximo	D_{TM}	24.40 cm
	$\cos \theta$	0.244
	θ	1.324 rad
Área de superposición	A_r	5438 cm ²
	A_r/A_c	0.69 OK
Carga de colapso	$A_r P_{cr}$	1829 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	860 tonf
	FU	0.47 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	158 kg/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	1862 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	48.23 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	20.30 cm
	FS	2.38

Deformación angular total máxima

Deformación angular por corte	γ_s	0.69
Deformación angular por flexión	γ_b	0.00
Área efectiva de compresión	A_r	5438 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	158.1 kgf/cm ²
	E_d	35.0 kgf/cm ²
	k	1.0
	ϵ_c	2.312 x 10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	0.43
Deformación angular total	γ_0	1.13
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5.5
Deformación angular total limite	γ_{0lim}	4.68
Factor de seguridad	FS	4.15

Frecuencia vertical

Rigidez vertical aislador	k_v	2401 tonf/cm
Período vertical	T_v	0.08 seg
Frecuencia vertical	f_v	13.1 Hz
Frecuencia vertical mínima	f_{vmin}	10.0 Hz

Placas de acero

Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	158.1 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	119.7 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	σ_{1CP}	0.562 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	σ_{1LP}	0.426 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2.400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	F_{1CP}	1.911 tonf/cm ²
	FU _{CP}	0.29 OK
Tracción admisible Largo Plazo	F_{1LP}	1.437 tonf/cm ²
	FU _{LP}	0.30 OK

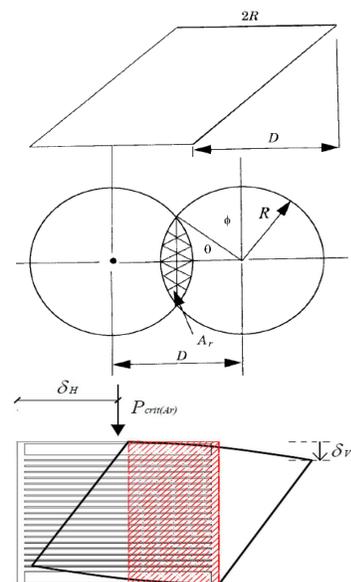


Figura VI.3: Pre-diseño Aisladores Grupo 1

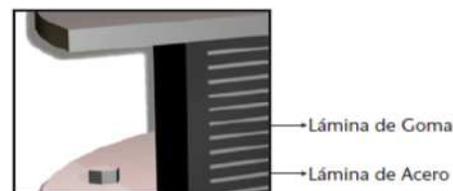
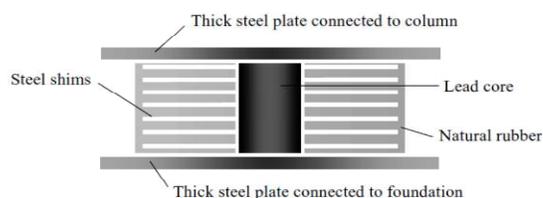
Aislador Preliminar Tipo 2

Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	203 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	244 mm
Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	530.0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	670.0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	65.0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	350.0 tonf

Características de los aisladores

Diámetro del aislador	D	80 cm
Diámetro del núcleo de plomo	d_p	20 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0.8 cm
Numero laminas de goma	n_r	44
Altura total de goma	H_r	35.2 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0.3 cm
Altura total del aislador	h	48.1 cm
Módulo de corte de la goma	G	6.5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	4712 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	201 cm ²
Primer factor de forma	S	23.4
Inercia sección bruta	I	2002765 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	8823 kgf/cm ²
	$(E)_{ef}$	5.89E+09 kgf/cm ²
Rigidez al corte postfluencia	k_p	1001 kgf/cm
Rigidez axial	k_{axial}	2096 tonf/cm
Rigidez flexural	$k_{flexural}$	167327 tonf/cm

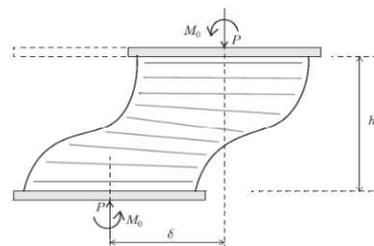


Carga crítica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	45 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	34334 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	1216 tonf
Tensión de pandeo	p_{cr}	258 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	670 tonf
Área de corte efectiva	A_s	6439 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	641 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_{h_i}	1001 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	360 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	35.92 %



Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	$\sigma_{ADM LP}$	130.0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	112.5 kg/cm ²
	FU	0.87 OK

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Área de superposición	A_r	3105 cm ²
	A_r/A_c	0.66 OK
Carga de colapso	$A_r P_{cr}$	801 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	670 tonf
	FU	0.84 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	216 kg/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	828 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	45.96 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	20.30 cm
	FS	2.26

Deformación angular total máxima

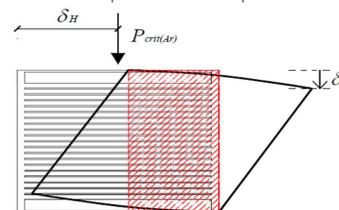
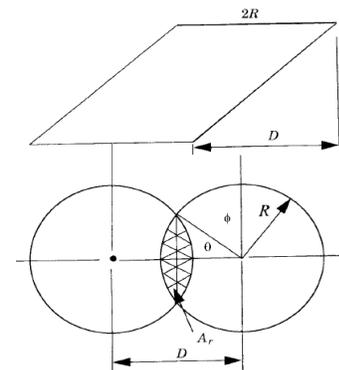
Deformación angular por corte	γ_s	0.69
Deformación angular por flexión	γ_b	0.00
Área efectiva de compresión	A_r	3105 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	215.8 kgf/cm ²
	E_0	35.0 kgf/cm ²
	k	1.0
	ϵ_c	5.606 x10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	0.79
Deformación angular total	γ_0	1.48
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5.5
Deformación angular total límite	$\gamma_{0\ lim}$	4.68
Factor de seguridad	FS	3.16

Frecuencia vertical

Periodo vertical	T_v	0.08 seg
Frecuencia vertical	f_v	12.2 Hz
Frecuencia vertical mínima	$f_{v\ min}$	10.0 Hz

Placas de acero

Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	215.8 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	112.5 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	$\sigma_{1\ CP}$	0.767 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	$\sigma_{1\ LP}$	0.400 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2.400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	$F_{1\ CP}$	1.911 tonf/cm ²
Tracción admisible Largo Plazo	$F_{1\ LP}$	1.437 tonf/cm ²



FU_{CP}	0.40 OK
FU_{LP}	0.28 OK

Propiedades linealizadas (W)

	Diseño	Máximo	
Deformación de corte	γ	0.58	0.69
Modulo de Corte efectivo	$G(\gamma)$	6.50	6.50 kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0	100.0 kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	31.4	31.4 tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p(k_2)$	1001	1001 kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i(k_1)$	10007	10007 kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2548	2288 kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	3.49	3.49 cm
Fuerza de fluencia	F_y	34.9	34.9 tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	2.35	2.48 seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.32	0.31

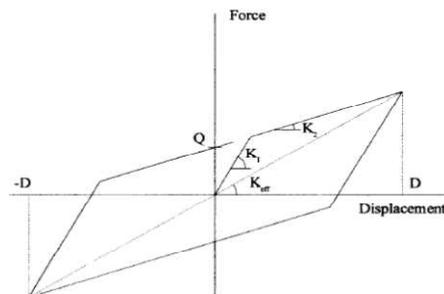


Figura VI.4: Pre-diseño Aisladores Grupo 2

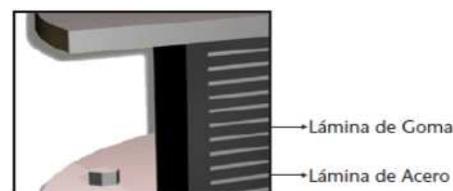
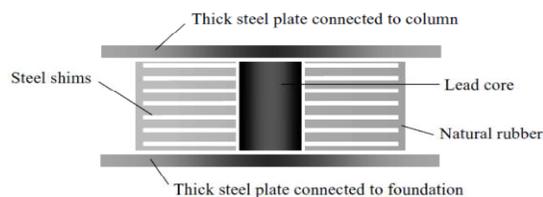
Aislador Preliminar Tipo 3

Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	203 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	244 mm
Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	560.0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	550.0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	65.0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	350.0 tonf

Características de los aisladores

Diámetro del aislador	D	80 cm
Diámetro del núcleo de plomo	d_p	20 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0.8 cm
Numero laminas de goma	n_r	44
Altura total de goma	H_r	35.2 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0.3 cm
Altura total del aislador	h	48.1 cm
Módulo de corte de la goma	G	6.5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	4712 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	201 cm ²
Primer factor de forma	S	23.4
Inercia sección bruta	I	2002765 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	8823 kgf/cm ²
	$(E)_{ef}$	5.89E+09 kgf cm ²
Rigidez al corte postfluencia	k_p	1001 kgf/cm
Rigidez axial	k_{axial}	2096 tonf/cm
Rigidez flexural	$k_{flexural}$	167327 tonf cm

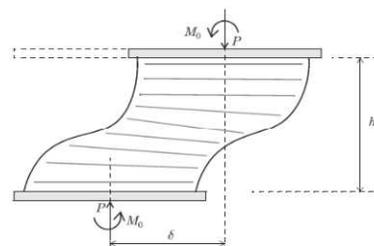


Carga crítica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	45 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	34334 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	1216 tonf
Tensión de pandeo	p_{cr}	258 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	550 tonf
Área de corte efectiva	A_s	6439 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	719 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_h	1001 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	282 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	28.19 %



Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	σ_{ADMPLP}	130.0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	118.8 kg/cm ²
	FU	0.91 OK

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Área de superposición	A_r	3105 cm ²
	A_r/A_c	0.66 OK
Carga de colapso	$A_r P_{cr}$	801 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	550 tonf
	FU	0.69 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	177 kg/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	828 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	45.96 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	20.30 cm
	FS	2.26

Deformación angular total máxima

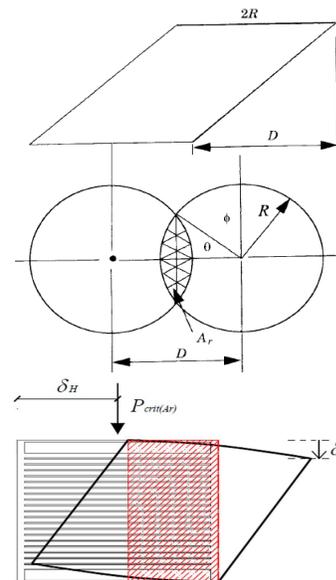
Deformación angular por corte	γ_s	0.69
Deformación angular por flexión	γ_b	0.00
Área efectiva de compresión	A_r	3105 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	177.1 kgf/cm ²
	E_0	35.0 kgf/cm ²
	k	1.0
	ϵ_c	4.602 x10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	0.65
Deformación angular total	γ_0	1.34
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5.5
Deformación angular total limite	γ_{0lim}	4.68
Factor de seguridad	FS	3.49

Frecuencia vertical

Periodo vertical	T_v	0.08 seg
Frecuencia vertical	f_v	12.2 Hz
Frecuencia vertical mínima	f_{vmin}	10.0 Hz

Placas de acero

Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	177.1 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	118.8 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	σ_{1CP}	0.630 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	σ_{1LP}	0.423 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2.400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	F_{1CP}	1.911 tonf/cm ²
Tracción admisible Largo Plazo	F_{1LP}	1.437 tonf/cm ²



FU_{CP} **0.33 OK**
 FU_{LP} **0.29 OK**

Propiedades linealizadas (W)

	Diseño	Máximo	
Deformación de corte	γ	0.58	0.69
Modulo de Corte efectivo	$G(\gamma)$	6.50	6.50 kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0	100.0 kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	31.4	31.4 tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p (k_2)$	1001	1001 kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i (k_1)$	10007	10007 kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2548	2288 kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	3.49	3.49 cm
Fuerza de fluencia	F_y	34.9	34.9 tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	2.35	2.48 seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.32	0.31

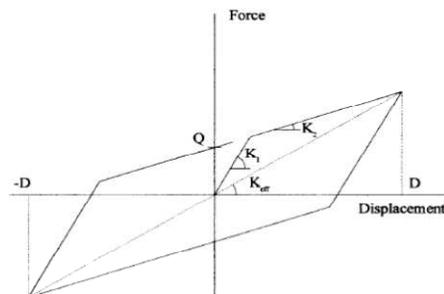


Figura VI.5: Pre-diseño Aisladores Grupo 3

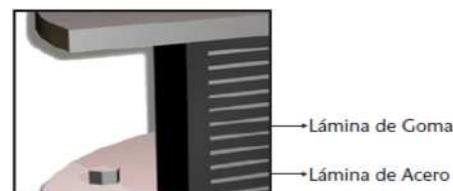
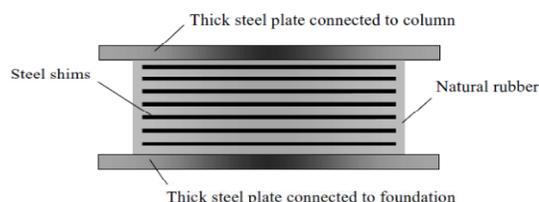
Aislador Preliminar Tipo 4

Desplazamientos y solicitaciones de diseño

Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	203 mm
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	244 mm
Compresión de Largo Plazo	P_{LP}	200.0 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	310.0 tonf
Compresión mínima	P_{min}	65.0 tonf
Peso sísmico sobre aislador	W	350.0 tonf

Características de los aisladores

Diámetro del aislador	D	60 cm
Espesor laminas de goma	t_r	0.8 cm
Numero laminas de goma	n_r	18
Altura total de goma	H_r	14.4 cm
Espesor laminas de acero	t_s	0.3 cm
Altura total del aislador	h	19.5 cm
Módulo de corte de la goma	G	6.5 kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000 kgf/cm ²
Área de compresión del aislador	A_c	2827 cm ²
Área lateral lamina de goma	A_l	151 cm ²
Primer factor de forma	S	18.8
Inercia sección bruta	I	636173 cm ⁴
Modulo de elasticidad aislador	E_c	7163 kgf/cm ²
	$(E)_{ef}$	1.52E+09 kgf/cm ²
Rigidez al corte	k_{corte}	1276 kgf/cm
Rigidez axial	k_{axial}	1407 tonf/cm
Rigidez flexural	$k_{flexural}$	105488 tonf cm



Periodo aislado

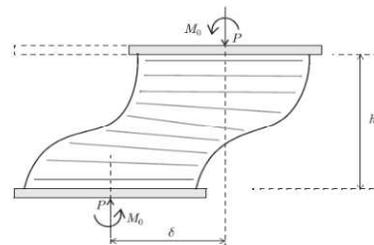
Deformación de corte de diseño	γ	1.41
Modulo de Corte efectivo	$G_{eff}(\gamma)$	6.50 kgf/cm ²
Amortiguamiento efectivo	$\xi_{eff}(\gamma)$	0.05
Rigidez lateral efectiva	$k_{h \text{ aislador}}$	1.276 tonf/cm
Periodo aislado de diseño	T_D	3.32 seg

Carga crítica de Pandeo en aislador

Rigidez de corte efectiva	P_S	25 tonf
Carga de Euler sin def. por corte	P_E	53391 tonf
Carga de pandeo	P_{cr}	1140 tonf
Tensión de pandeo	P_{cr}	403 kgf/cm ²

Influencia de compresión en rigidez lateral

Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	310 tonf
Área de corte efectiva	A_s	3829 cm ²
Rigidez lateral corregida	K_h	1198 kgf/cm
Rigidez lateral inicial	K_h	1276 kgf/cm
Reducción de rigidez	ΔK_h	79 kgf/cm
Porcentaje de reducción	ΔK_h	6.15 %



Compresión de Largo Plazo en aislador

Presión admisible Largo Plazo	σ_{ADMPLP}	130.0 kg/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	70.7 kg/cm ²
	FU	0.54 OK

Estabilidad bajo desplazamiento máximo

Desplazamiento total máximo	D_{TM}	24.40 cm
	$\cos \theta$	0.407
	θ	1.152 rad
Área de superposición	A_r	1405 cm ²
	A_r/A_c	0.50 OK
Carga de colapso	$A_r P_{cr}$	567 tonf
Compresión de Corto Plazo (max)	P_{CP}	310 tonf
	FU	0.55 OK
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	221 kg/cm ²
Rigidez vertical tangente	K_v	780 tonf/cm

Volcamiento

Desplazamiento límite	D_{max}	43.39 cm
Desplazamiento total de diseño	D_{TD}	20.30 cm
	FS	2.14

Deformación angular total máxima

Deformación angular por corte	γ_s	1.69
Deformación angular por flexión	γ_b	0.00
Área efectiva de compresión	A_r	1405 cm ²
Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	220.7 kgf/cm ²
	E_0	35.0 kgf/cm ²
	k	1.0
	ϵ_c	8.954 x 10 ³
Deformación angular por comp.	γ_c	1.01
Deformación angular total	γ_0	2.70
Elongación máxima de la goma	ϵ_b	5.5
Deformación angular total limite	γ_{0lim}	4.68
Factor de seguridad	FS	1.73

Frecuencia vertical

Rigidez vertical aislador	K_v	1407 tonf/cm
Periodo vertical	T_v	0.10 seg
Frecuencia vertical	f_v	10.0 Hz
Frecuencia vertical mínima	f_{vmin}	10.0 Hz

Placas de acero

Presión de trabajo Corto Plazo	P_{CP}/A_r	220.7 kgf/cm ²
Presión de trabajo Largo Plazo	P_{LP}/A_c	70.7 kgf/cm ²
Tracción placas Corto Plazo	σ_{tCP}	0.785 tonf/cm ²
Tracción placas Largo Plazo	σ_{tLP}	0.252 tonf/cm ²
Tensión de fluencia	F_y	2.400 tonf/cm ²
Tracción admisible Corto Plazo	F_{tCP}	1.911 tonf/cm ²
	FU _{CP}	0.41 OK
Tracción admisible Largo Plazo	F_{tLP}	1.437 tonf/cm ²
	FU _{LP}	0.18 OK

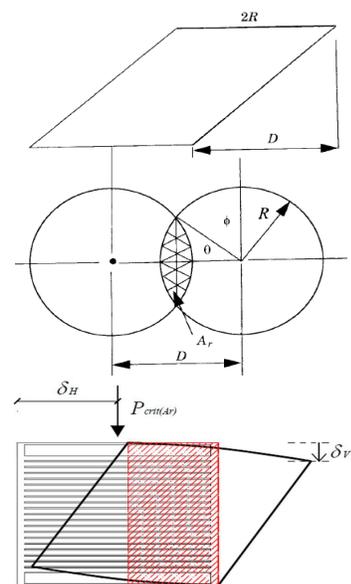


Figura VI.6: Pre-diseño Aisladores Grupo 4

Resumen Características de los Aisladores

A continuación se presenta una tabla resumen con las dimensiones de los aisladores propuestos en el pre-diseño.

Tabla VI-2: Resumen Características Aisladores Propuestos

Grupo	Cantidad	D _{aislador} cm	H _{goma} cm	V _{goma} cm ³	H _{aislador} cm	d _{plomo} cm	V _{plomo} cm ³	V _{totgoma} cm ³	V _{totplomo} cm ³
1	2	100	35.2	276460	48.1	0	0	552920	0
2	2	80	35.2	176934	48.1	20	15111	353869	30222
3	4	80	35.2	176934	48.1	20	15111	707738	60444
4	4	60	14.4	40715	19.5	0	0	162860	0
	12							1777387	90666

De la tabla resumen anterior, se puede observar que el pre-diseño de los aisladores correspondientes a los grupos 2 y 3 ha entregado iguales características para ambos grupos.

A continuación se presentan las características de los aisladores originalmente considerados en el caso centrado.

Tabla VI-3: Resumen Características Aisladores Originales

Grupo	Cantidad	D _{aislador} cm	H _{goma} cm	V _{goma} cm ³	H _{aislador} cm	d _{plomo} cm	V _{plomo} cm ³	V _{totgoma} cm ³	V _{totplomo} cm ³
1	12	100	35.2	276460	48.1	15	8500	3317522	102000

Considerando las características del pre-diseño de los aisladores se obtiene una reducción del volumen total de goma del 46.4 % y una reducción del volumen total de plomo de 11.1% con respecto a las características de la solución centrada.

VI.2 Linealización aproximada de la base aislada

Anteriormente se calcularon las propiedades linealizadas de cada uno de los dispositivos para una deformación de diseño del orden de 20cm. Sin embargo, es necesario establecer un nivel de amortiguamiento representativo de la base aislada completa. Lo anterior con el objetivo de generar un espectro de solicitaciones reducido que sea representativo de toda la estructura y no solo de algunos dispositivos.

Tabla VI-4: Resumen Propiedades Linealizadas de los Aisladores

Grupo	Cantidad	k_h aislador t/cm	β %	k_h tot t/cm	d_{plomo} Cm	A_{tot} plomo cm ²	k_p aislador t/cm	k_p tot t/cm
1	2	1.45	5.0	2.900	0	0	1.45	2.900
2	2	2.548	32.0	5.096	20	628	1.001	2.002
3	4	2.548	32.0	10.192	20	1257	1.001	4.004
4	4	1.276	5.0	5.104	0	0	1.276	5.104
	12			23.292		1885		14.010

Desplazamiento de diseño	D_d	20.3 cm
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0 kgf/cm ²
Capacidad de la base a def. cero	Q	188.5 tf
Rigidez al corte postfluencia	k_p (k_2)	14.010 tf/cm
Rigidez al corte inicial	k_i (k_1)	140.100 tf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	23.295 tf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1.49 cm
Fuerza de fluencia	F_y	209.4 tf
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.24

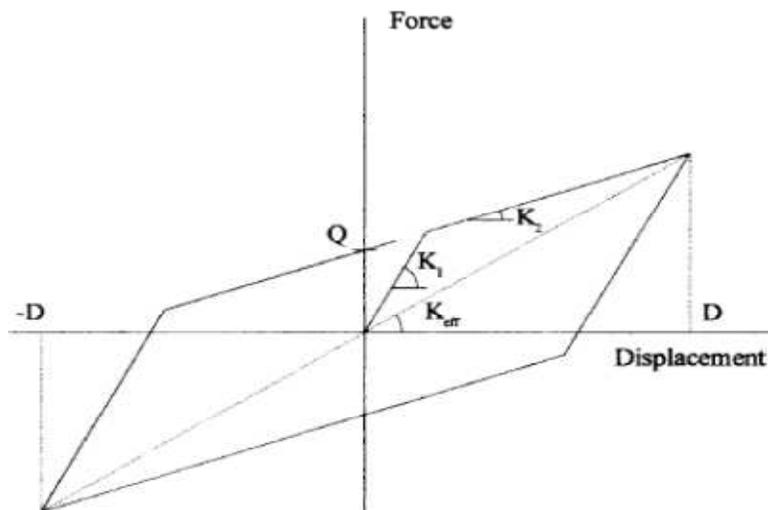


Figura VI.7: Modelo bilineal

De los cálculos anteriores, el nivel de amortiguamiento esperado en la base completa para el nivel de desplazamientos considerado puede alcanzar el 24%. Sin embargo, debido a las imprecisiones propias de las sollicitaciones utilizadas para la verificación inicial de los aisladores, se prefiere no incrementar el amortiguamiento de diseño por sobre el 22% utilizado originalmente.

VI.3 Modelo Computacional

Incorporación de Aisladores

Cabe recordar que a este punto los aisladores de tipo G2 son idénticos a los de tipo G3, y son estos grupos únicamente aquellos que cuentan con corazón de plomo. Por este motivo la disipación de energía o amortiguamiento se concentra en el perímetro de la base aislada.

Para la modelación de los aisladores propuestos se elige utilizar elementos tipo link de dos nodos, los cuales se definen de la manera que se presenta a continuación.

For *two-joint Link/Support* elements the internal deformations are defined as:

- Axial: $d_{u1} = u_{1j} - u_{1i}$
- Shear in the 1-2 plane: $d_{u2} = u_{2j} - u_{2i} - \mathbf{d}j2 r_{3j} - (L - \mathbf{d}j2) r_{3i}$
- Shear in the 1-3 plane: $d_{u3} = u_{3j} - u_{3i} + \mathbf{d}j3 r_{2j} + (L - \mathbf{d}j3) r_{2i}$
- Torsion: $d_{r1} = r_{1j} - r_{1i}$
- Pure bending in the 1-3 plane: $d_{r2} = r_{2i} - r_{2j}$
- Pure bending in the 1-2 plane: $d_{r3} = r_{3j} - r_{3i}$

where:

- $u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}, r_{1i}, r_{2i},$ and r_{3i} are the translations and rotations at joint **I**
- $u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}, r_{1j}, r_{2j},$ and r_{3j} are the translations and rotations at joint **J**
- $\mathbf{d}j2$ is the distance you specify from joint **J** to the location where the shear deformation d_{u2} is measured (the default is zero, meaning at joint **J**)
- $\mathbf{d}j3$ is the distance you specify from joint **J** to the location where the shear deformation d_{u3} is measured (the default is zero, meaning at joint **J**)
- L is the length of the element

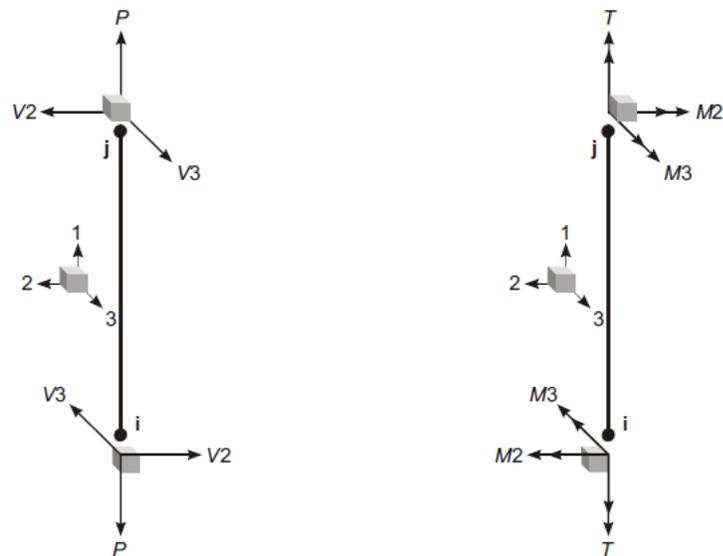


Figure 54

Link/Support Element Internal Forces and Moments, Shown Acting at the Joints

- Axial: $P = f_{u1}$
- Shear in the 1-2 plane: $V2 = f_{u2}, M3_s = (d - \mathbf{d}j2) f_{u2}$
- Shear in the 1-3 plane: $V3 = f_{u3}, M2_s = (d - \mathbf{d}j3) f_{u3}$
- Torsion: $T = f_{r1}$
- Pure bending in the 1-3 plane: $M2_b = f_{r2}$
- Pure bending in the 1-2 plane: $M3_b = f_{r3}$

Figura VI.8: CSI Analysis Reference Manual

Rigidez lateral efectiva U2 = U3

G1	K_{eff}	1.450	t/cm
G2	K_{eff}	2.548	t/cm
G3	K_{eff}	2.548	t/cm
G4	K_{eff}	1.276	t/cm

Rigidez lateral postfluencia U2 = U3

G2	$k_i (k_1)$	10.007	t/cm
G3	$k_i (k_1)$	10.007	t/cm

Resistencia de fluencia U2 = U3

G2	F_y	34.9	t
G3	F_y	34.9	t

Rigidez vertical U1

G1	K_{ax}	2401	t/cm
G2	K_{ax}	2096	t/cm
G3	K_{ax}	2096	t/cm
G4	K_{ax}	1407	t/cm

Rigidez flexural R2 = R3

G1	K_{flex}	500245	t cm
G2	K_{flex}	167327	t cm
G3	K_{flex}	167327	t cm
G4	K_{flex}	105488	t cm

Rigidez torsional R1

G1	No Usar
G2	No Usar
G3	No Usar
G4	No Usar

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Elastomero 1

Property Notes:

Total Mass and Weight

Mass: 0.0 Rotational Inertia 1: 0.0

Weight: 0.0 Rotational Inertia 2: 0.0

Rotational Inertia 3: 0.0

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.0

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.0

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters: Advanced...

Fix All Clear All

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 1

Direction: R2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 500245

Effective Damping: 0.0

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 1

Direction: R3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 500245

Effective Damping: 0.0

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 1

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2401

Effective Damping: 0.0

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomerico 1

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 1.450

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomerico 1

Direction: U3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 1.450

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

OK Cancel

Figura VI.9: Modelación Aisladores Grupo 1

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Elastomerico 2

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 0. Rotational Inertia 1: 0.

Weight: 0. Rotational Inertia 2: 0.

Rotational Inertia 3: 0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters

Advanced...

Fix All Clear All

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomerico 2

Direction: R2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 167327.

Effective Damping: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 2

Direction: R3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 167327.

Effective Damping: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 2

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2096.

Effective Damping: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 2

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.548

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 10.007

Yield Strength: 34.9

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 2

Direction: U3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.548

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 10.007

Yield Strength: 34.9

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

OK Cancel

Figura VI.10: Modelación Aisladores Grupo 2

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Elastomero 3 Set Default Name

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 0. Rotational Inertia 1: 0.

Weight: 0. Rotational Inertia 2: 0.

Rotational Inertia 3: 0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

P-Delta Parameters Advanced...

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 3

Direction: R2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 167327.

Effective Damping: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 3

Direction: R3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 167327.

Effective Damping: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 3

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 2096.

Effective Damping: 0.

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 3

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.548

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 10.007

Yield Strength: 34.9

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 3

Direction: U3

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 2.548

Effective Damping: 0.

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 10.007

Yield Strength: 34.9

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

OK Cancel

Figura VI.11: Modelación Aisladores Grupo 3

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Elastomero 4

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 0. Rotational Inertia 1: 0.

Weight: 0. Rotational Inertia 2: 0.

Rotational Inertia 3: 0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

P-Delta Parameters

Advanced...

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Elastomero 4

Direction: R2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 105488

Effective Damping: 0.

OK Cancel

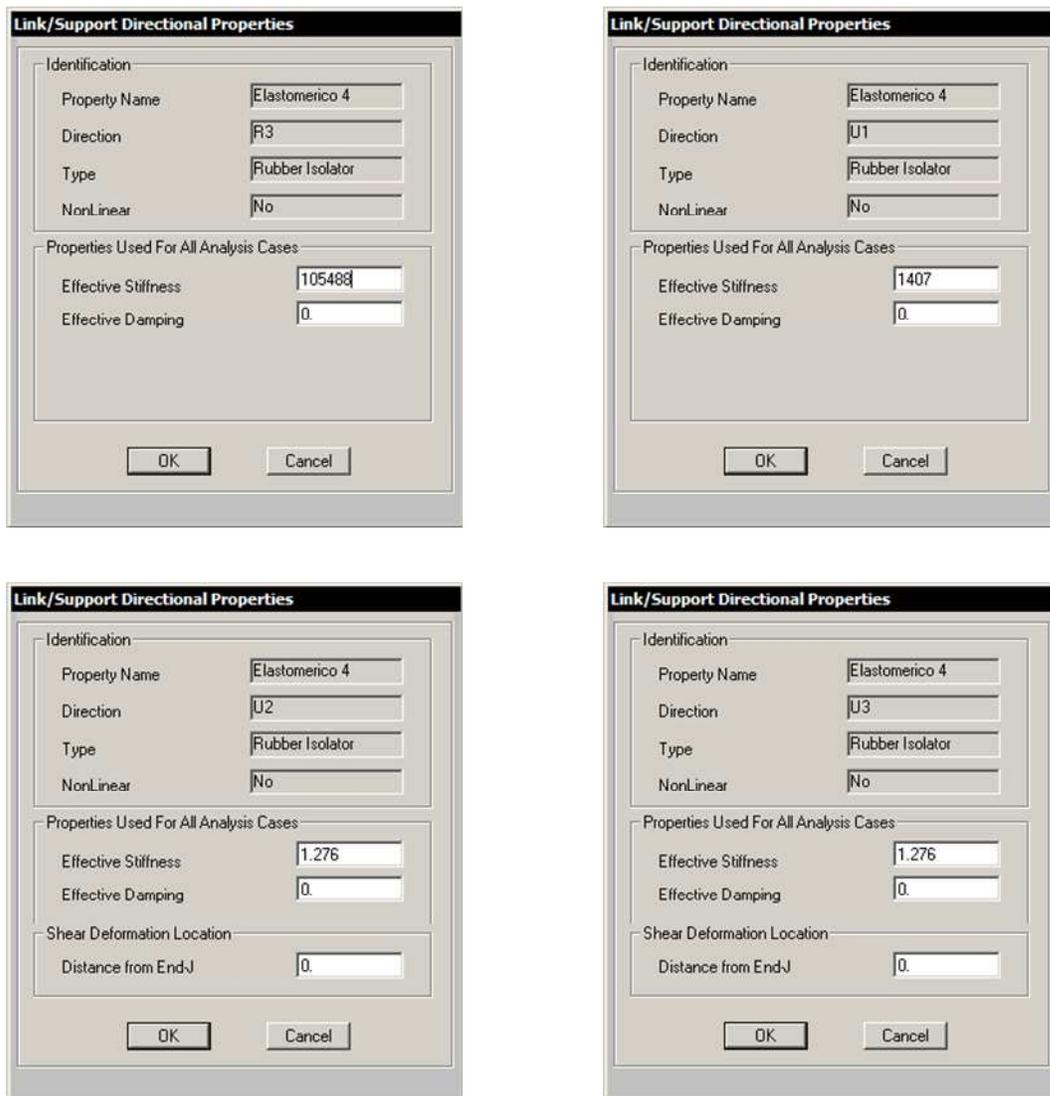


Figura VI.12: Modelación Aisladores Grupo 4

Cabe mencionar que debido a que el diseño se realiza con el uso de linealización equivalente y en un modelo de geometría lineal, el efecto $P\Delta$ de los aisladores sobre las caras de apoyo no será detectado por el modelo. En consecuencia, este efecto debe incorporarse de manera externa al realizar las verificaciones de aceptación que correspondan.

VI.4 Análisis Sísmico

Inicialmente se considera un espectro de diseño reducido de acuerdo a un amortiguamiento promedio esperado para los modos aislados igual al 22%.

Categoría:

Zona:

Suelo:

Edificio industrial.

R:

I	1.0	A _o	0.4 g
Z	1.25	β	22.0 %
M _M	1.2	B	2.03
T _a	0.03 seg	T _D	2.00 seg
T _b	0.2 seg	S _a (T _D)	0.301 g
T _c	0.54 seg	S _a Z I / R ₁ B	0.093 g
T _d	2 seg	C _{min}	0.100
T _e	10 seg	C _{diseño}	0.100
PGA	0.41 g	S _d (T _D)	29.92 cm
α _A A	1100 cm/s ²	S _d /B	14.72 cm
α _V V	94 cm/s	D _D	184.5 mm
α _D D	30 cm	D _M	221.5 mm
R ₁	2.0	D _{TD min}	203.0 mm
T ₀	1.60 seg	D _{TM min}	243.6 mm

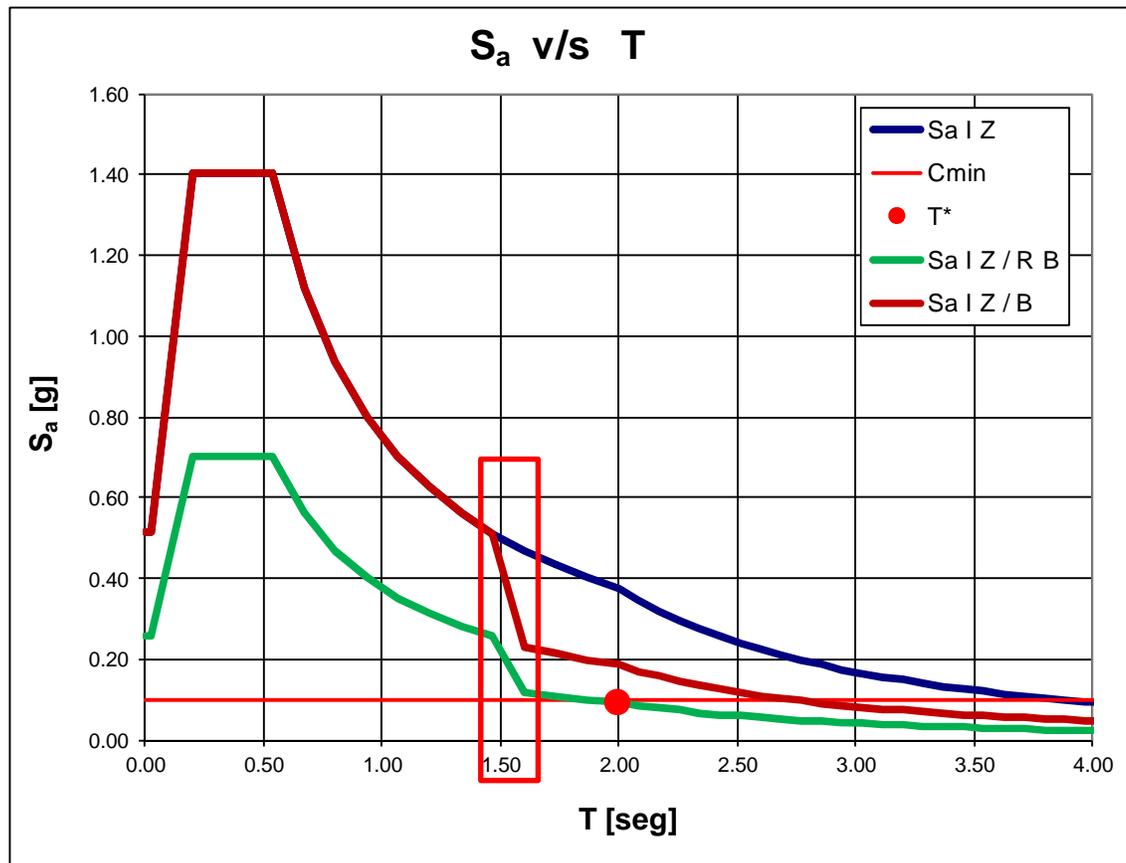


Figura VI.13: Espectro de Diseño de pseudo-aceleraciones NCh2745

Análisis Modal

Tabla VI-5: Periodos y Masas Modales Caso Optimizado

StepNum	Caso Optimizado				
	Period	UX	UY	SumUX	SumUY
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	2.788	0.000	0.913	0.000	0.913
2	2.707	0.977	0.000	0.977	0.913
3	1.998	0.000	0.064	0.977	0.977
4	0.181	0.000	0.000	0.977	0.977
5	0.167	0.000	0.000	0.977	0.977
6	0.158	0.000	0.000	0.977	0.977
7	0.128	0.000	0.000	0.977	0.977
8	0.123	0.000	0.000	0.977	0.977

De acuerdo a los resultados de la tabla anterior, es claro que el nuevo sistema de aislamiento propuesto flexibiliza el sistema. Sin embargo, aún se mantiene bajo los 3seg establecidos como límite por NCh2745.

A continuación se adjuntan imágenes de las formas modales obtenidas.

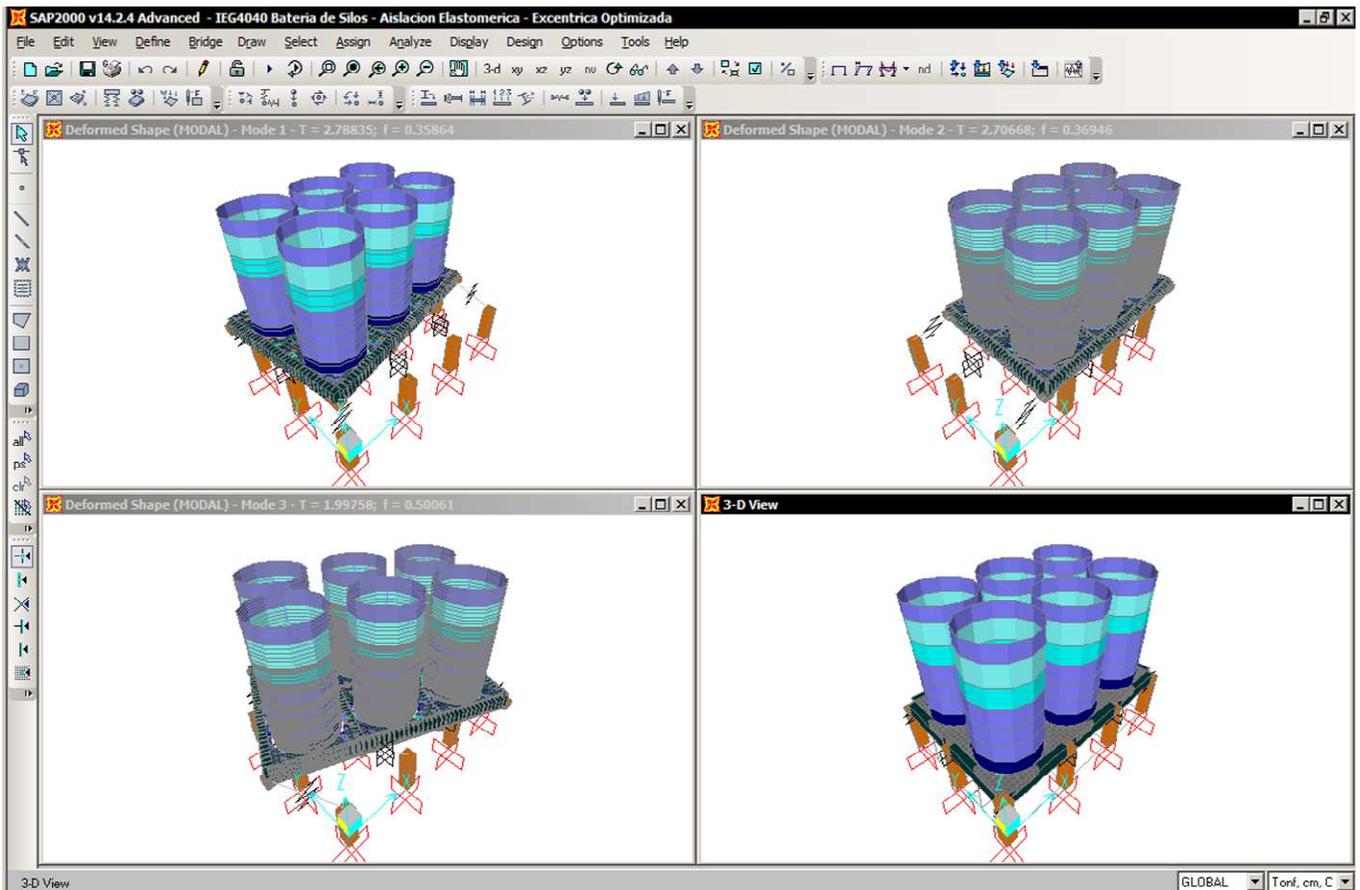


Figura VI.14: Formas modales

De la figura resulta claro que la excentricidad de masas en relación al centro de rigidez del conjunto de aisladores causa una considerable torsión en planta acoplada con el modo traslacional transversal. Esta situación puede causar un aumento local sustancial en los desplazamientos que los aisladores extremos deben tolerar.

VI.5 Reacciones Basales

Tabla VI-6: Reacciones Basales

		Reacciones Basales					
		Caso Original			Caso Optimizado		
Estado de Carga	Tipo de Carga	FX t	FY t	FZ t	FX t	FY t	FZ t
PP	Estática	0	0	1194	0	0	1194
PPeq	Estática	0	0	77	0	0	77
MATsis	Estática	0	0	3062	0	0	3062
Ex_Elástico	Espectral	553	0	1	420	0	1
Ey_Elástico	Espectral	0	529	0	0	403	0
Ev	Estática	0	0	1157	0	0	1157
Peso Sísmico [t]				4333	4333		
Corte mínimo normativo [t]				433	433		

	Caso Original	Caso Optimizado
R_{effx}	1.28	0.97
R_{effy}	1.22	0.93
AMP_x	1.57	2.06
AMP_y	1.64	2.15

R_{effx} Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección x para diseño de súper y subestructura.

R_{effy} Factor de modificación de respuesta efectivo en dirección y para diseño de súper y subestructura.

AMP_x Factor de amplificación del corte reducido en dirección x

AMP_y Factor de amplificación del corte reducido en dirección y

En las tablas anteriores se aprecia como la incorporación del nuevo sistema de aislamiento ha llevado el corte basal elástico (sin reducciones) levemente bajo el mínimo. Esta situación indica que para cumplir con los criterios de diseño tradicionales de manera estricta sería necesario aumentar el corte de diseño hasta el mínimo. Claramente el diseñar con valores de R_{eff} menores que 1.0, o lo que es igual, cortes basales mayores que el elástico, no tiene sentido físico. Por lo anterior, en adelante se asume que el corte de diseño es igual al elástico y que el R_{eff} de la estructura será 1.0.

VI.6 Deformaciones Sísmicas

Tabla VI-7: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Interfaz de Aislación

Dirección de deformación	Caso Original			Caso Optimizado		
	Max cm	Min cm	Prom. cm	Max cm	Min cm	Prom. cm
Transversal	20.73	15.43	18.08	20.48	16.60	18.54
Longitudinal	18.35	18.35	18.35	18.49	18.49	18.49

En la tabla anterior se puede observar como las deformaciones elásticas esperadas crecen de manera muy leve en relación al sistema original. Esto significa que aquellas soluciones que se hayan definido en los sistemas mecánicos para cruzar la interfaz de aislamiento de forma funcional, podrían utilizarse sin variaciones en el nuevo diseño.

Tabla VI-8: Deformaciones Sísmicas a Nivel de Techo

Dirección de Deformación	Caso Original			Optimizado		
	Max cm	Min cm	Prom. cm	Max cm	Min cm	Prom. cm
Transversal	19.73	16.02	17.88	19.53	16.80	18.17
Longitudinal	18.54	18.34	18.44	18.60	18.50	18.55

En relación a las deformaciones de techo, se aprecia un resultado similar al anterior. Si bien han aumentado, los valores se mantienen razonablemente cercanos a los originales.

VII ANÁLISIS DE RESPUESTAS EN EL TIEMPO

En este capítulo se procede a realizar una evaluación del comportamiento del sistema estructural a través de análisis no lineales de respuestas en el tiempo para tres pares de registros sintéticos de aceleraciones compatibles con el espectro correspondiente a niveles de movimiento del terremoto de diseño.

Los análisis son realizados para los tres casos en estudio que corresponden al Caso 1 o Análisis Centrado, Caso 2 o Análisis Excéntrico Original, y Caso 3 o Análisis Excéntrico Optimizado.

VII.1 Modelo Inelástico No-Lineal de Aisladores Elastoméricos

Para la evaluación de la respuesta tiempo-historia de los dispositivos de aislamiento, se utiliza las mismas características del dispositivo que se definieron para los análisis lineales, a excepción del comportamiento en corte. Para esta dirección (corte) se usan las características teóricas del dispositivo sin linealizar, esto es, la idealización bilineal inelástica original.

Propiedades Aisladores Originales – Casos 1 y 2

		Diseño	Máximo	
Deformación de corte	γ	0.58	0.69	
Módulo de Corte efectivo	$G (\gamma)$	6.50	6.50	kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0	100.0	kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	17.7	17.7	tf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p (k_2)$	1630	1630	kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i (k_1)$	16303	16303	kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2501	2355	kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1.20	1.20	cm

Fuerza de fluencia	F_y	19.6	19.6	tf
Periodo efectivo	T_{eff}	2.37	2.45	seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.21	0.19	

Figura VII.1: Modelación no lineal de dispositivos

Propiedades Aisladores Optimizados – Caso 3 (G2 y G3)

Cabe recordar que los aisladores de tipo G2 son idénticos a los de tipo G3, y son estos grupos únicamente aquellos que cuentan con corazón de plomo. Por este motivo la disipación de energía o amortiguamiento se concentra en el perímetro de la base aislada.

		Diseño	Máximo	
Deformación de corte	γ	0.58	0.69	
Módulo de Corte efectivo	$G (\gamma)$	6.50	6.50	kgf/cm ²
Fluencia en corte del plomo	τ_{yp}	100.0	100.0	kgf/cm ²
Capacidad del aislador a def. cero	Q	17.7	31.4	tonf
Rigidez al corte postfluencia	$k_p (k_2)$	1630	1001	kgf/cm
Rigidez al corte inicial	$k_i (k_1)$	10007	10007	kgf/cm
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	2548	2288	kgf/cm
Desplazamiento de fluencia	D_y	1.20	3.49	cm
Fuerza de fluencia	F_y	34.9	34.9	tonf
Periodo efectivo	T_{eff}	2.35	2.48	seg
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	0.32	0.31	

VII.2 Definición de Registros Sísmicos

Para la realización de los análisis tiempo historia que se presentan a continuación, se consideran 3 pares de registros artificiales basados en registros reales correspondientes a las siguientes localidades: Llolleo, Concepción, y Constitución.

Cada uno de los registros es compatible con el espectro elástico definido por NCh2745 para Zona 3, suelo tipo II, y 5% de amortiguamiento. Es importante mencionar que debido a la simultaneidad del uso de pares de registros en dos

direcciones principales (longitudinal y transversal) el espectro ha sido ponderado por $1/\sqrt{2}$.

A continuación se muestran los registros longitudinales y transversales para cada una de las localidades indicadas, además se muestran los espectros respectivos.

Llolleo

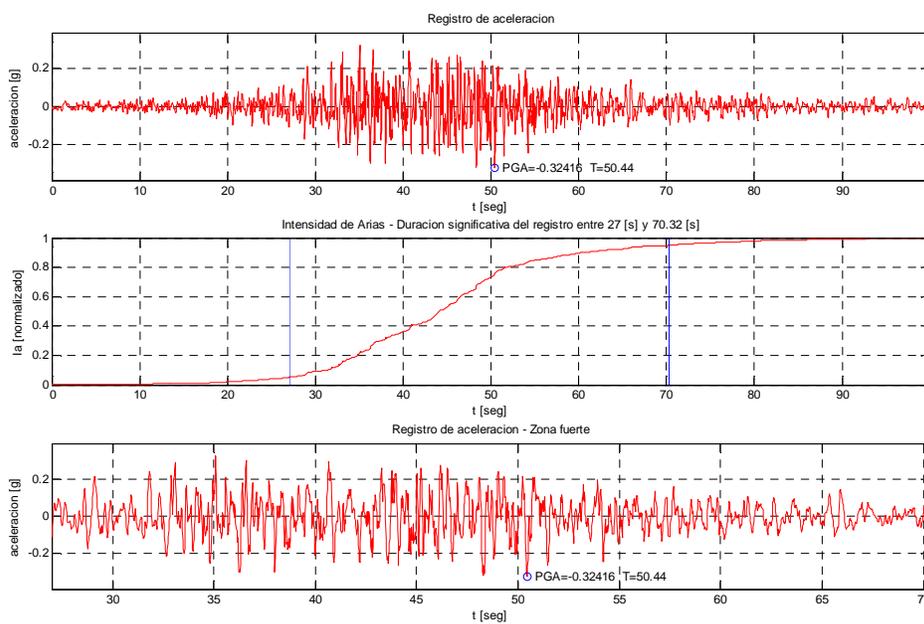


Figura VII.2: Registro longitudinal Llolleo 2010

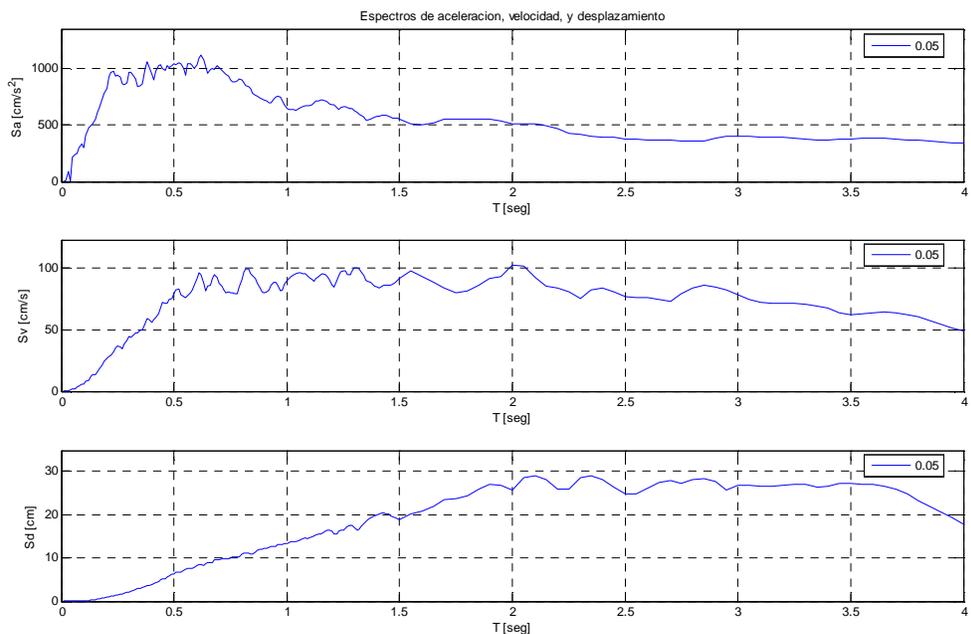


Figura VII.3: Espectros basados en registro longitudinal de Lolloe 2010

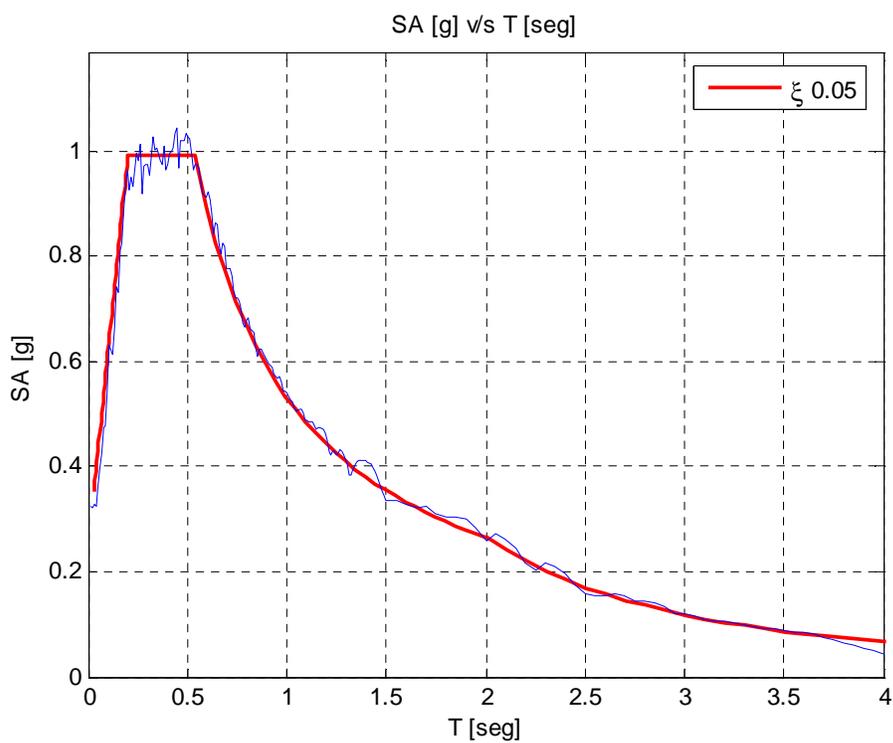


Figura VII.4: Comparación de espectros de pseudoaceleración

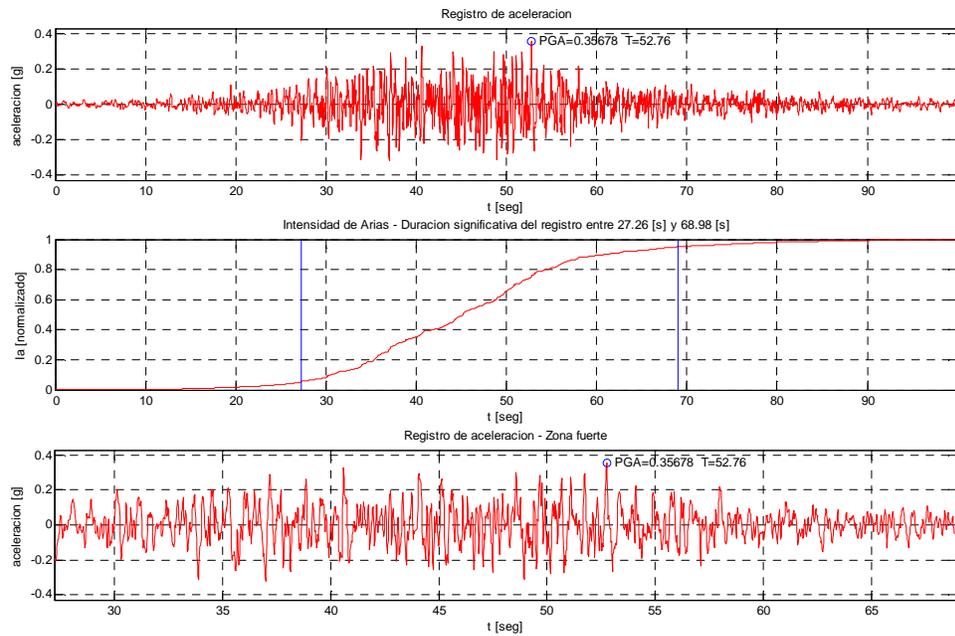


Figura VII.5: Registro Transversal Lolloo 2010

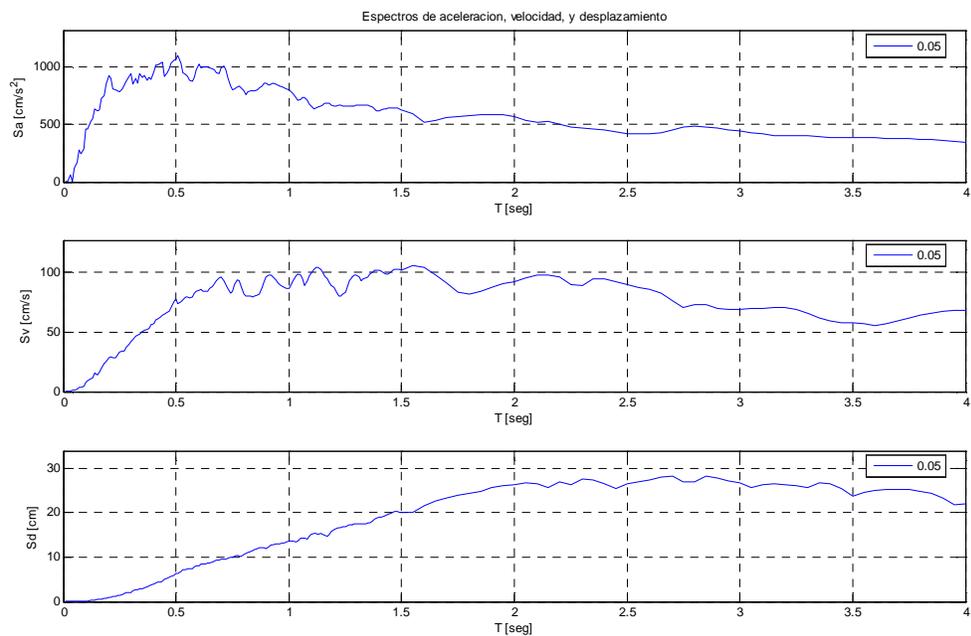


Figura VII.6: Espectros basados en registro transversal de Lolloo 2010

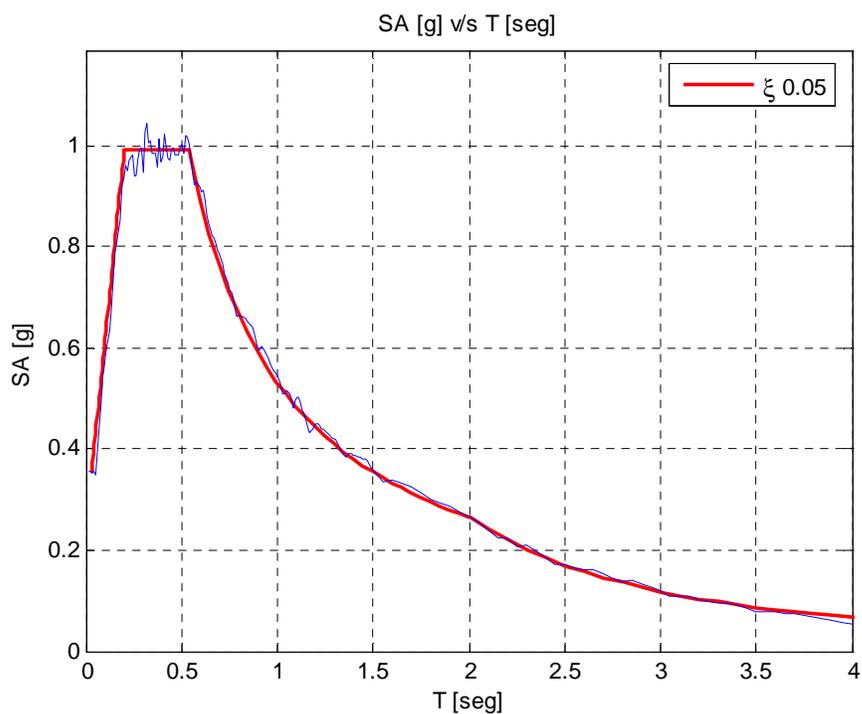


Figura VII.7: Comparación de espectros de pseudoaceleración

Concepción

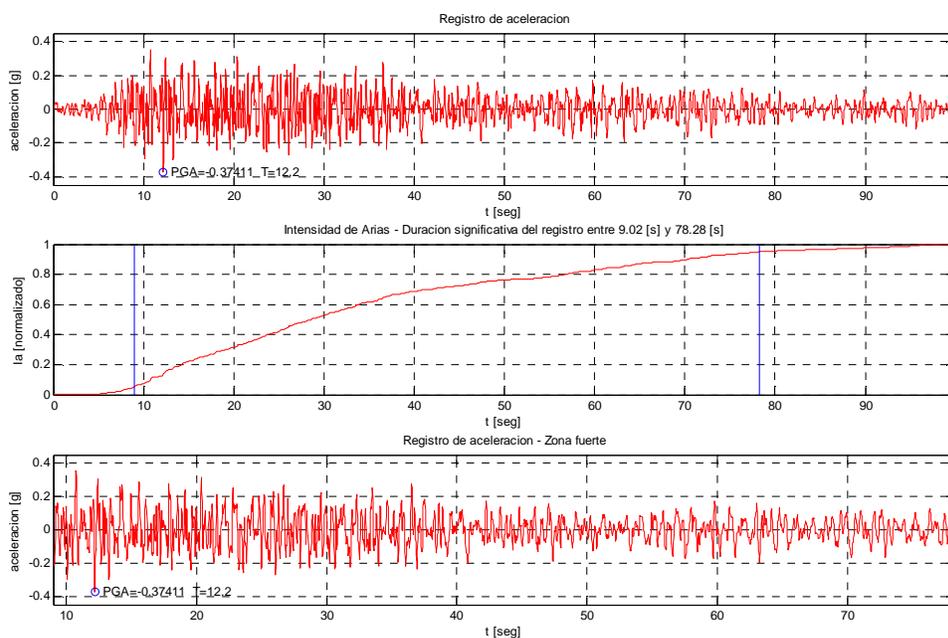


Figura VII.8: Registro longitudinal Concepción 2010

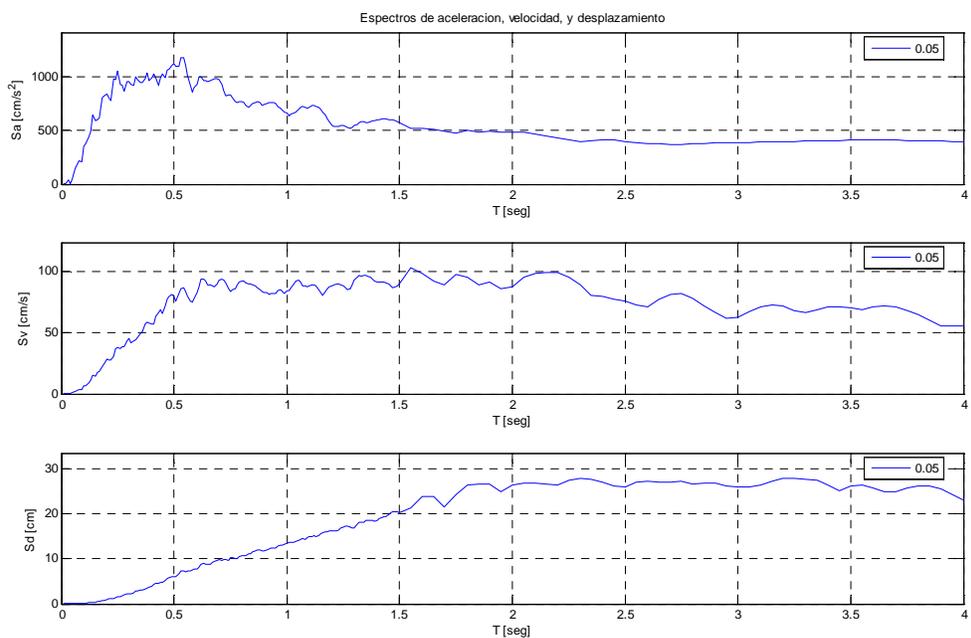


Figura VII.9: Espectros basados en registro longitudinal de Concepción 2010

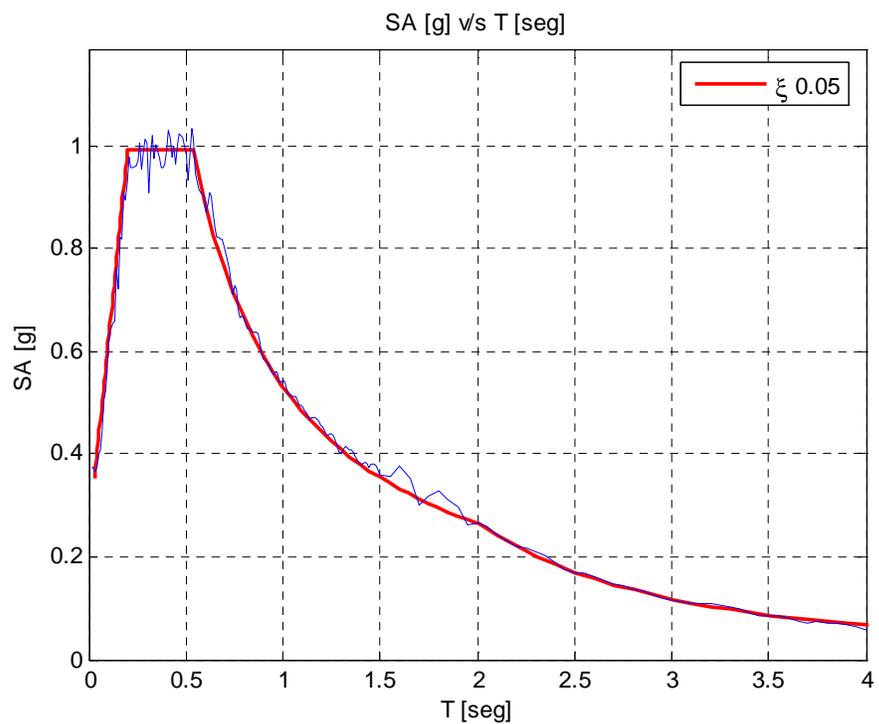


Figura VII.10: Comparación de espectros de pseudoaceleración

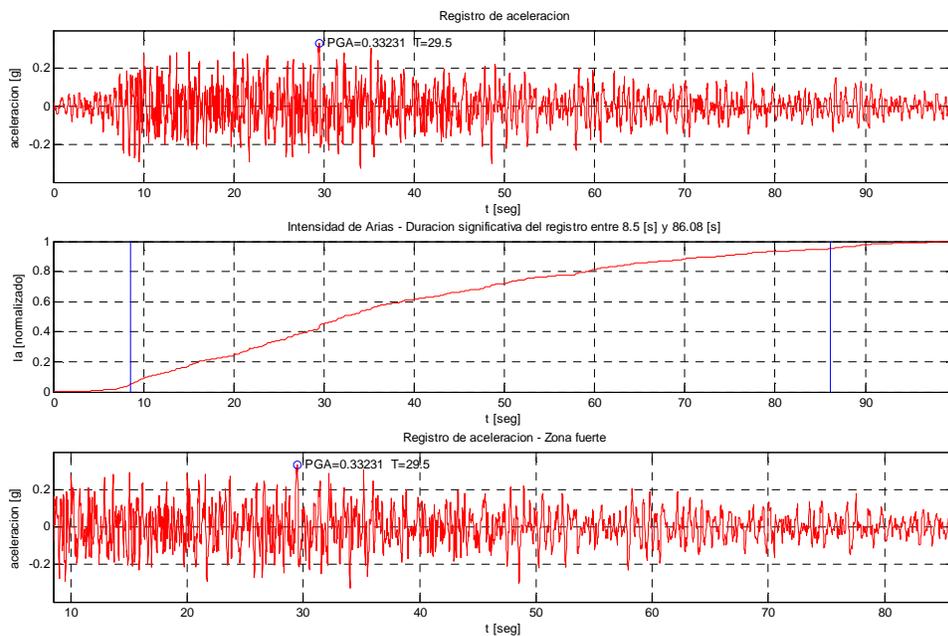


Figura VII.11: Registro Transversal Concepción 2010

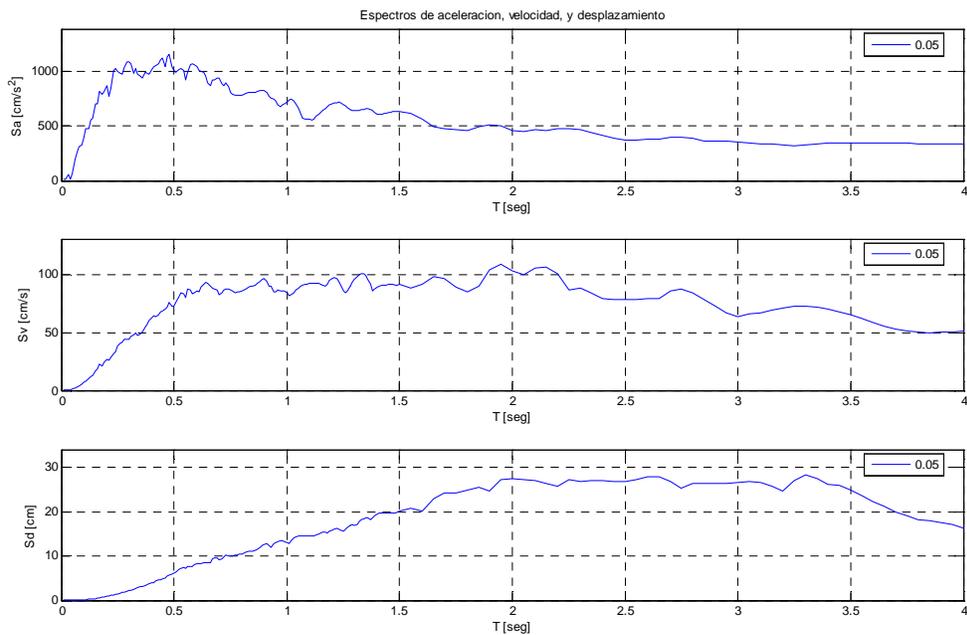


Figura VII.12: Espectros basados en registro transversal de Concepción 2010

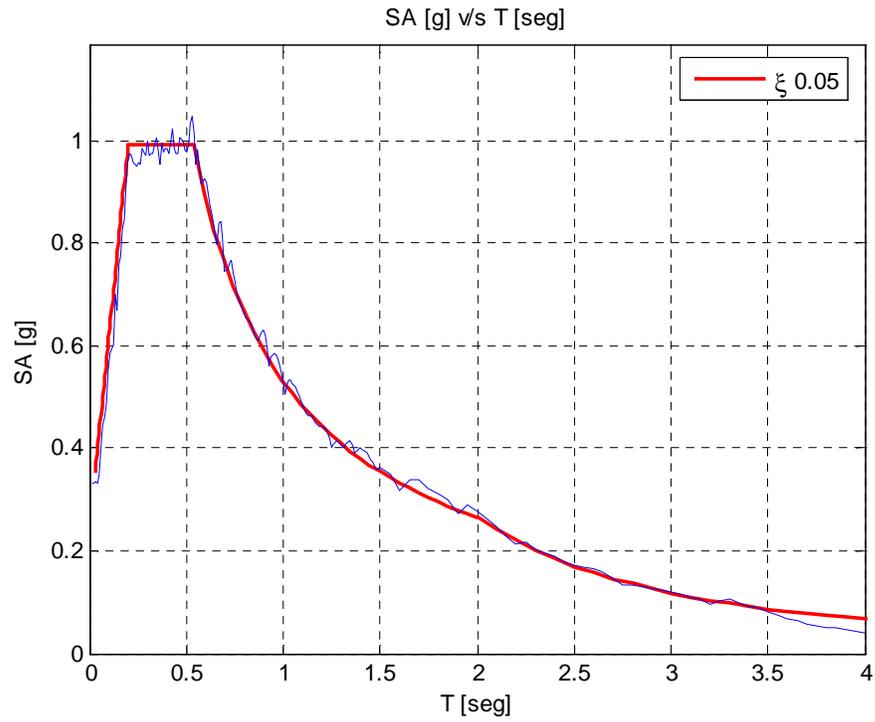


Figura VII.13: Comparación de espectros de pseudoaceleración

Constitución

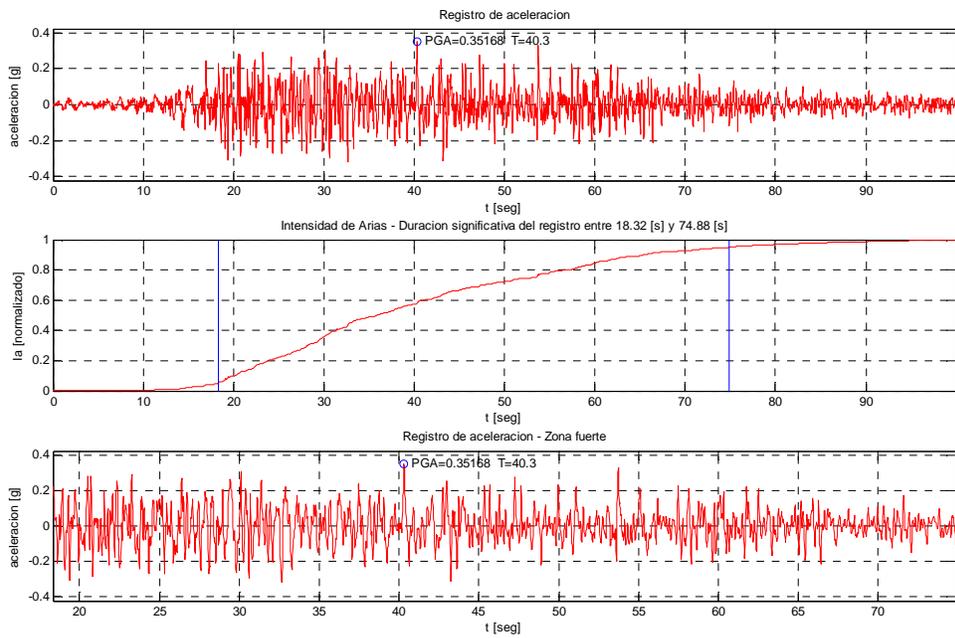


Figura VII.14: Registro longitudinal Constitución 2010

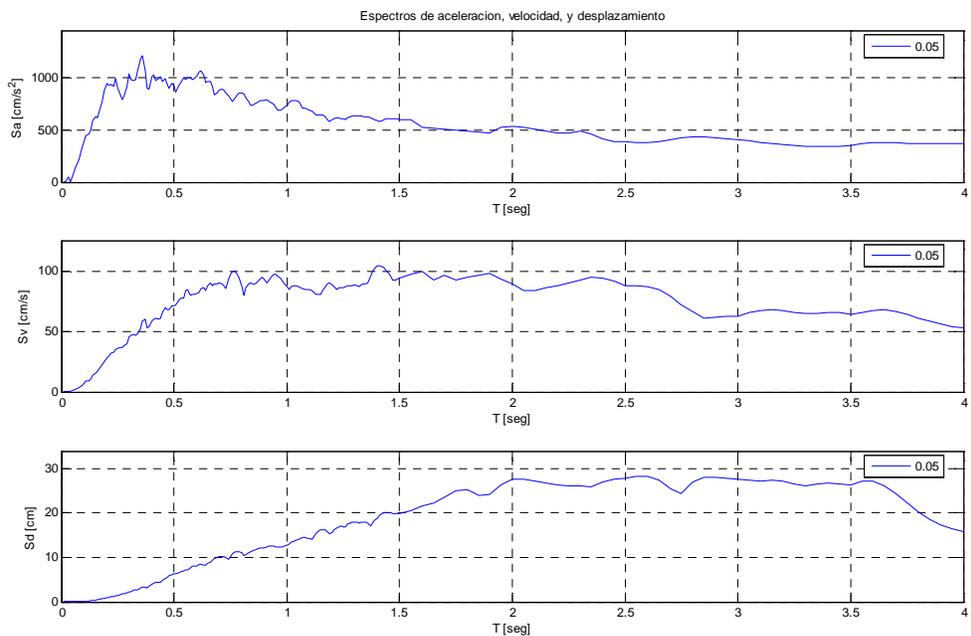


Figura VII.15: Espectros basados en registro longitudinal de Constitución 2010

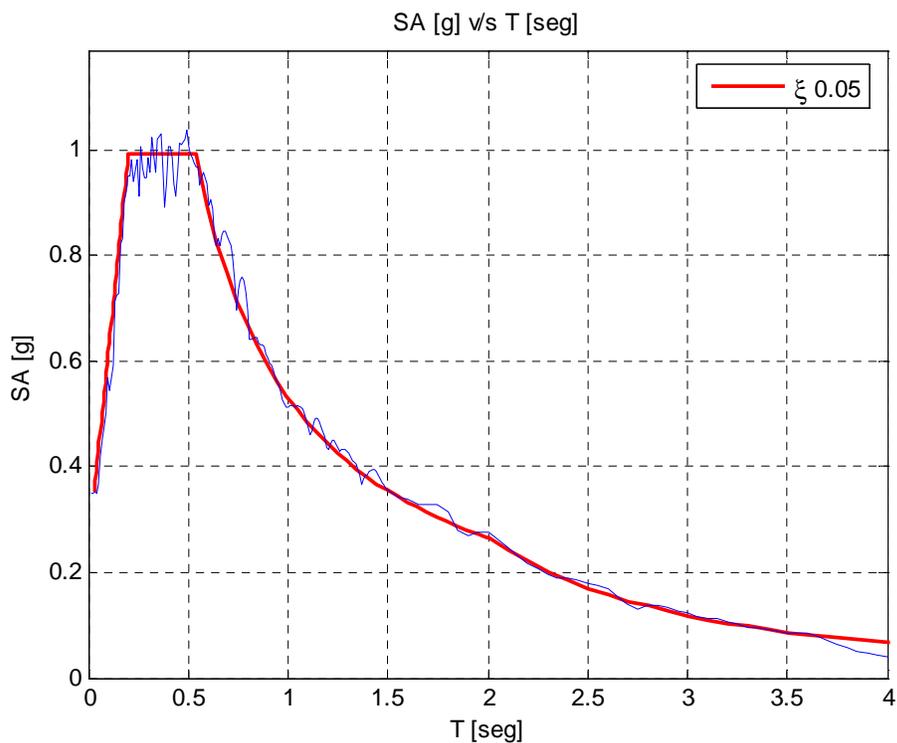


Figura VII.16: Comparación de espectros de pseudoaceleración

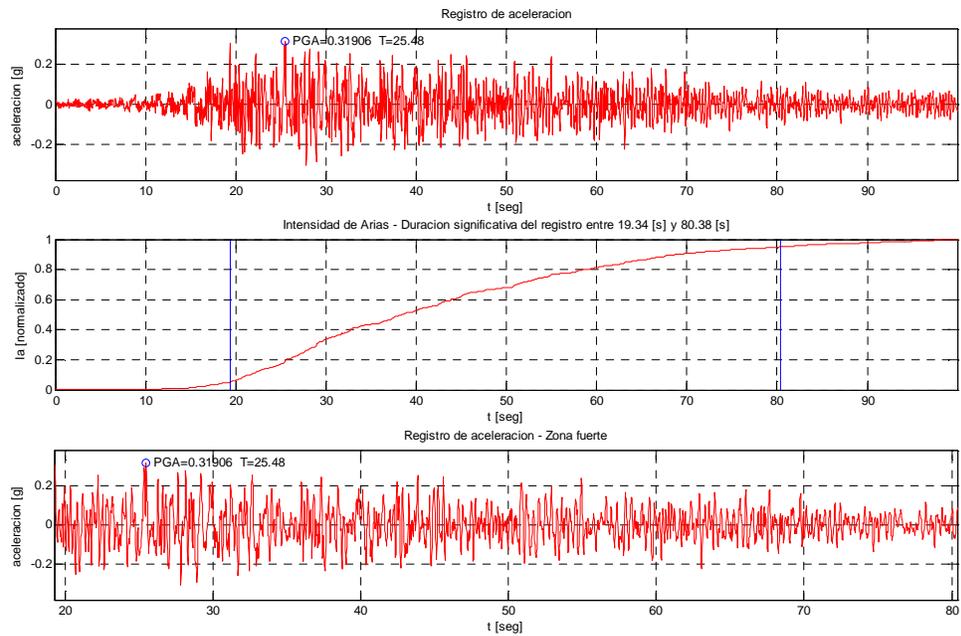


Figura VII.17: Registro Transversal Constitución 2010

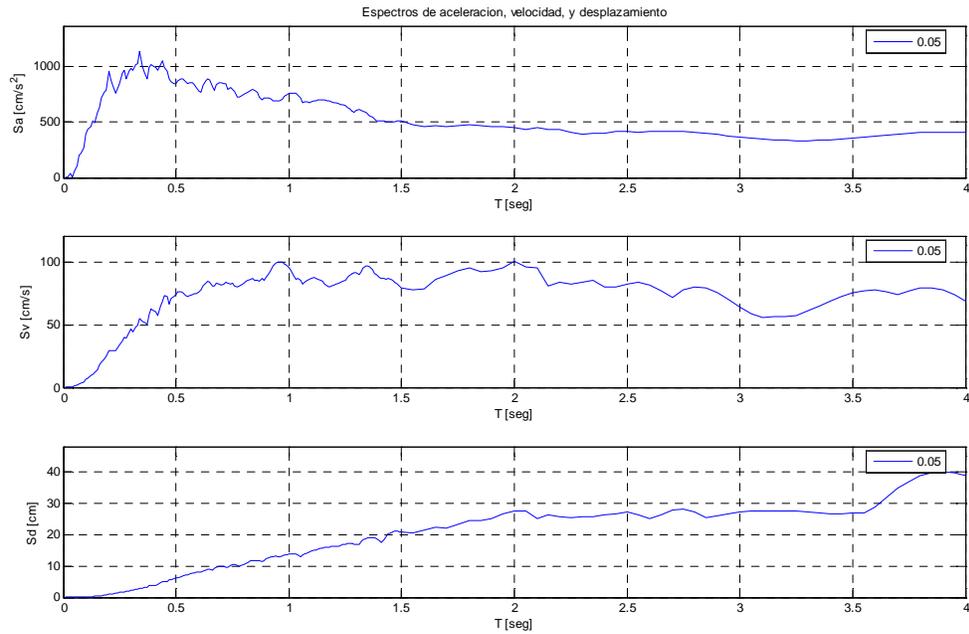


Figura VII.18: Espectros basados en registro transversal de Constitución 2010

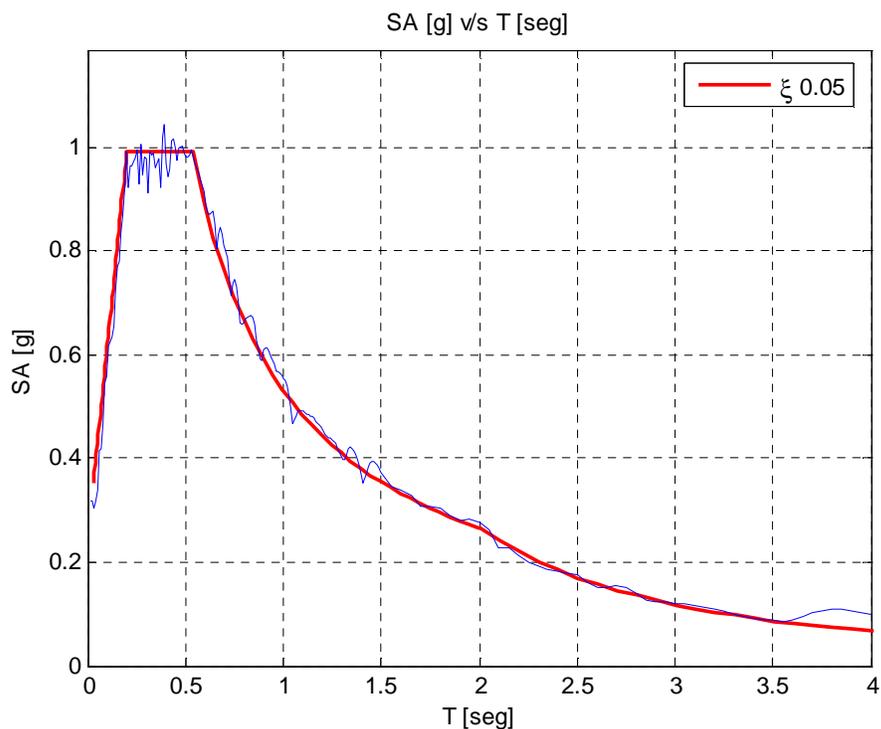


Figura VII.19: Comparación de espectros de pseudoaceleración

Las comparaciones entre los espectros de pseudoaceleración de los registros y el espectro normativo, muestran que se ajustan de buena forma, principalmente en la zona de interés la que corresponde a períodos entre 1 seg y 3 seg.

VII.3 Respuestas en el tiempo

A continuación se entregan gráficamente las historias de respuesta para la estructura y los aisladores para el caso de análisis centrado, caso de análisis excéntrico y caso de análisis optimizado.

Para identificar algunas de las respuestas se presenta el siguiente esquema en donde se establecen los puntos de control.

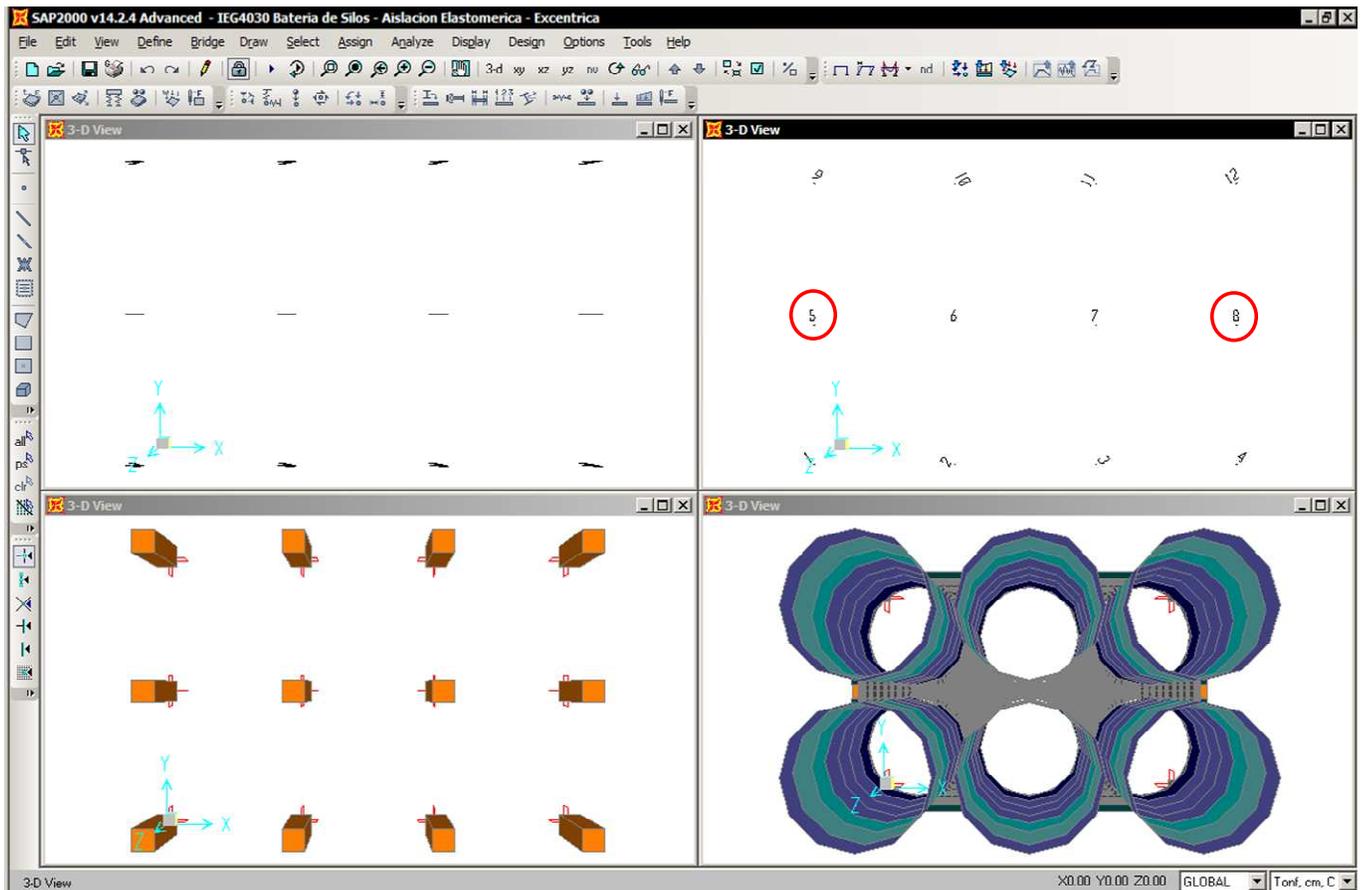


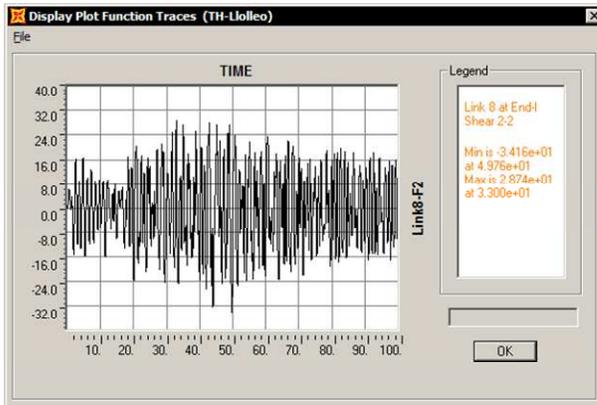
Figura VII.20: Esquema de Puntos de Control

Dirección local 2 ➔ Dirección global X ➔ Dirección longitudinal
 Dirección local 3 ➔ Dirección global Y ➔ Dirección transversal

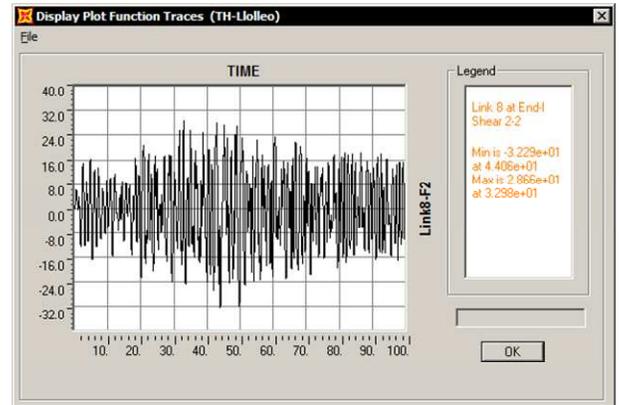
Historia de Esfuerzos de Corte en Aisladores

En las siguientes figuras se muestra gráficamente el esfuerzo de corte obtenido en el tiempo para los aisladores 5 y 8 indicados en la figura anterior para cada uno de los registros.

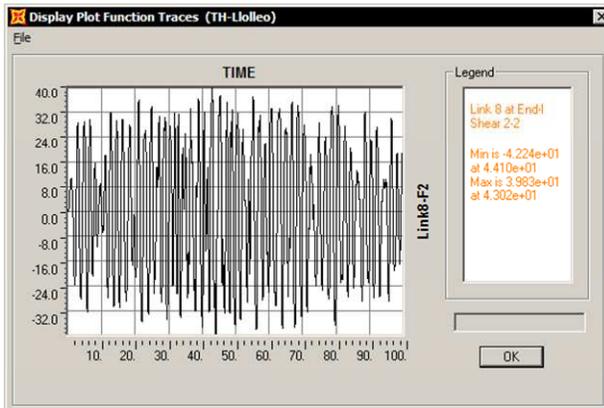
Aislador 8 - Registro Lloleo Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

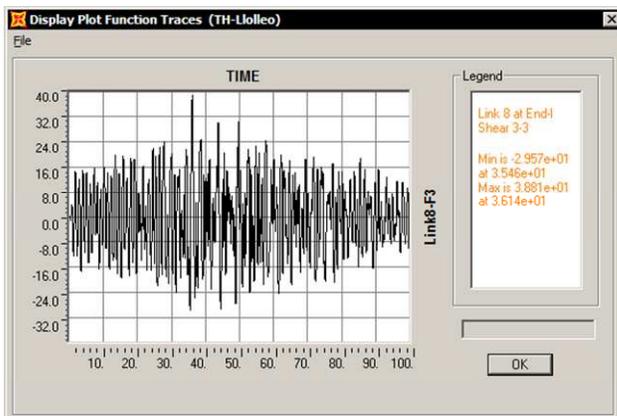


Caso 3: Análisis Optimizado

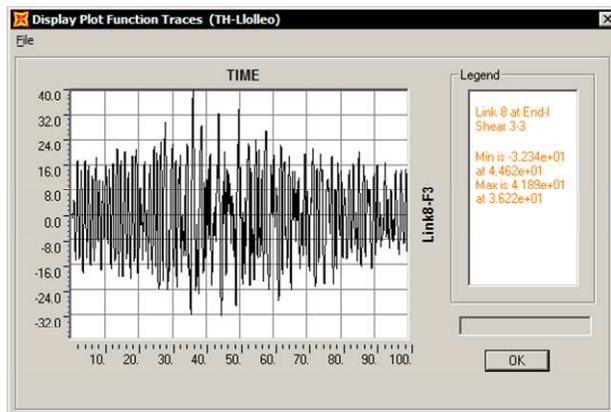
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-34.1	28.7
Análisis Excéntrico	-32.3	28.7
Análisis Optimizado	-42.2	39.8

Figura VII.21: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Lloleo Dirección Longitudinal

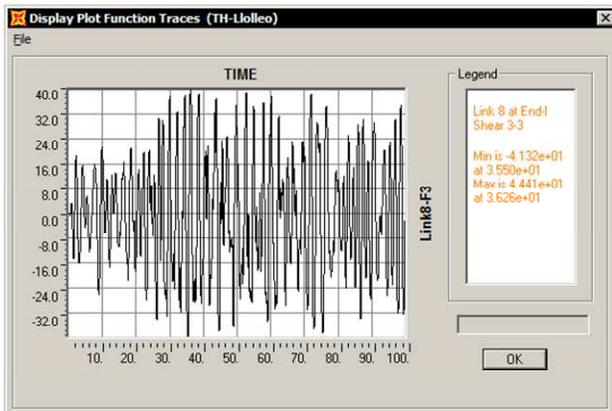
Aislador 8 - Registro Lloleo Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

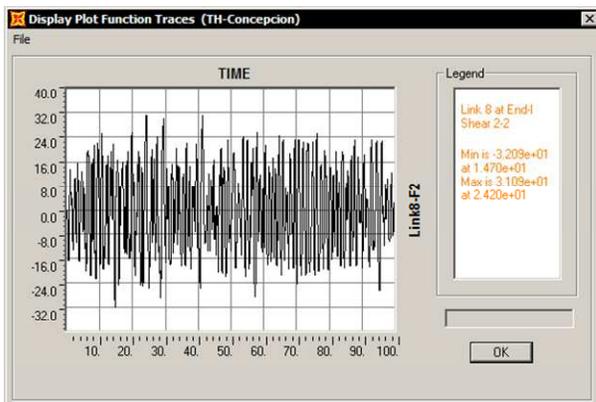


Caso 3: Análisis Optimizado

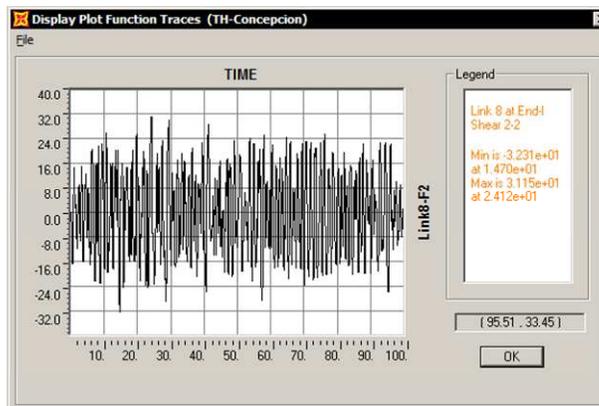
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-29.6	38.8
Análisis Excéntrico	-32.3	41.9
Análisis Optimizado	-41.3	44.4

Figura VII.22: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Lloleo Dirección Transversal

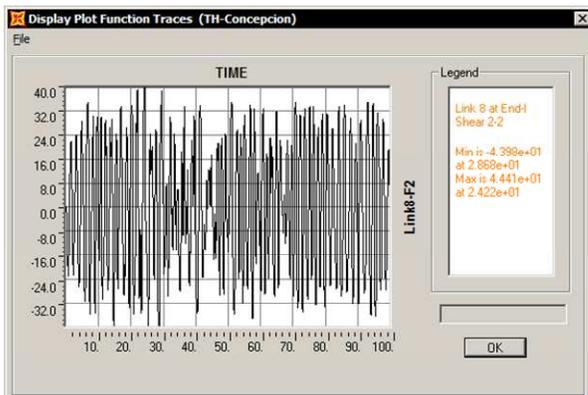
Aislador 8 - Registro Concepción Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

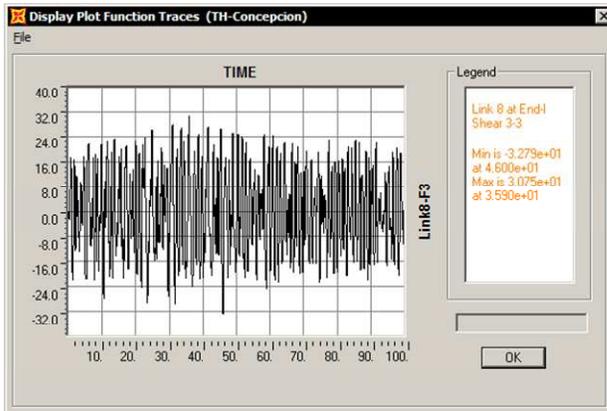


Caso 3: Análisis Optimizado

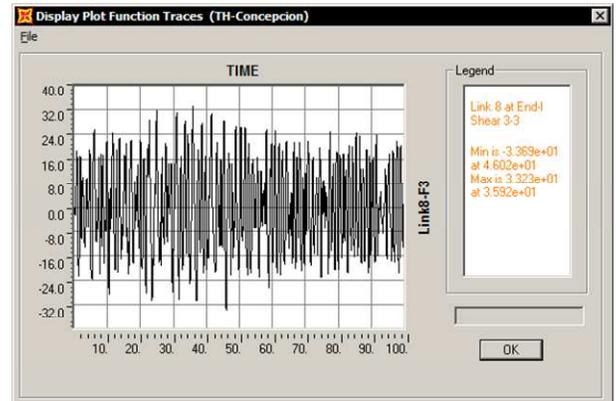
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-32.1	31.1
Análisis Excéntrico	-32.3	31.1
Análisis Optimizado	-44.0	44.4

Figura VII.23: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Longitudinal

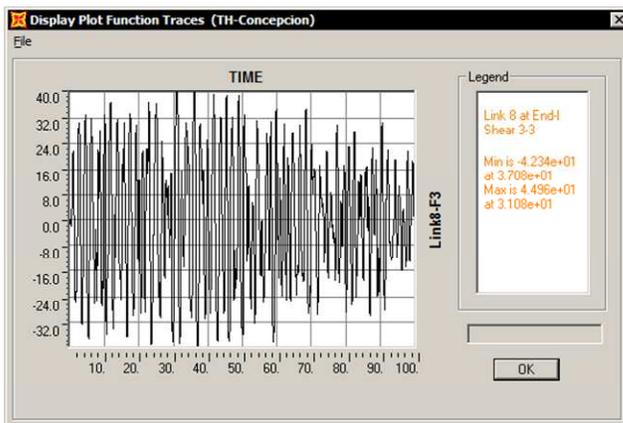
Aislador 8 - Registro Concepción Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

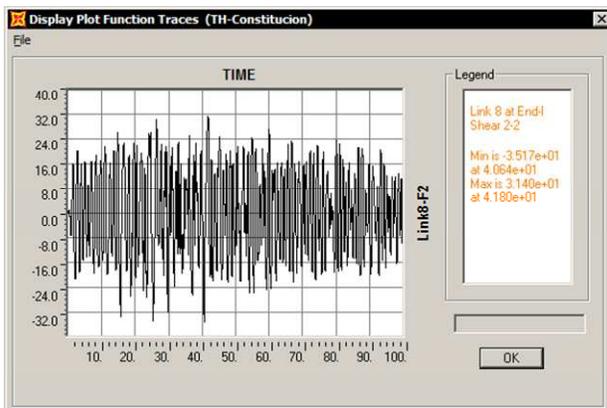


Caso 3: Análisis Optimizado

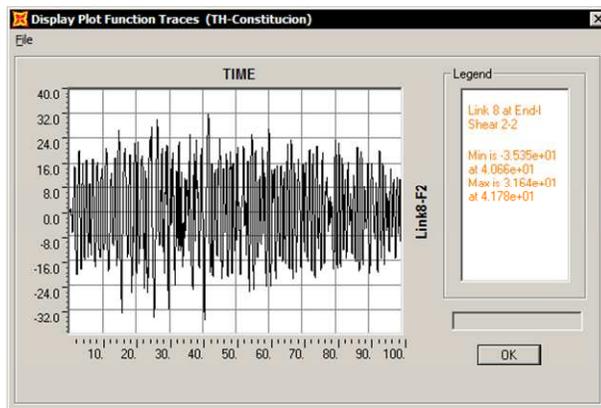
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-32.8	30.8
Análisis Excéntrico	-33.7	33.2
Análisis Optimizado	-42.3	45.0

Figura VII.24: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Transversal

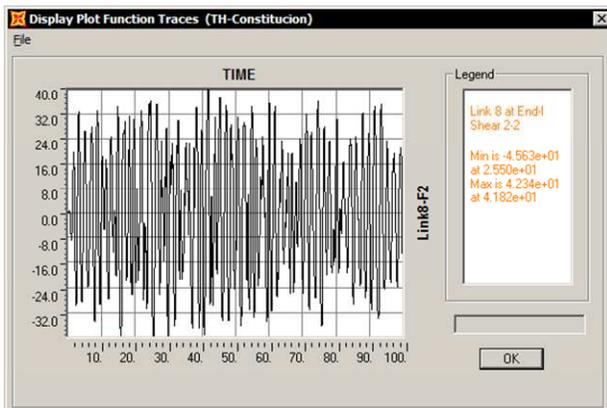
Aislador 8 - Registro Constitución Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

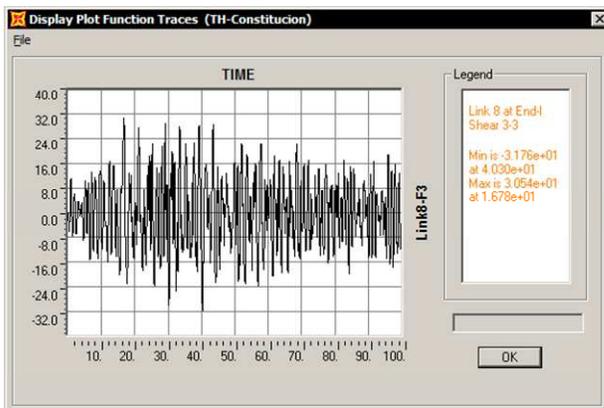


Caso 3: Análisis Optimizado

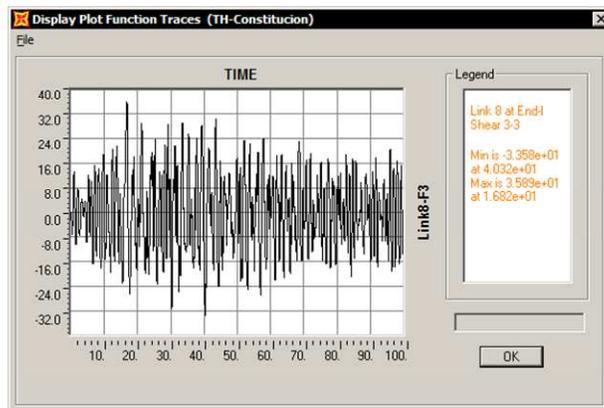
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-35.2	31.4
Análisis Excéntrico	-35.3	31.6
Análisis Optimizado	-45.6	42.3

Figura VII.25: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Longitudinal

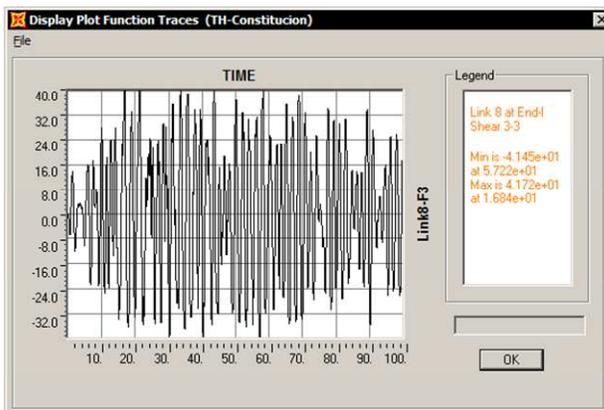
Aislador 8 - Registro Constitución Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

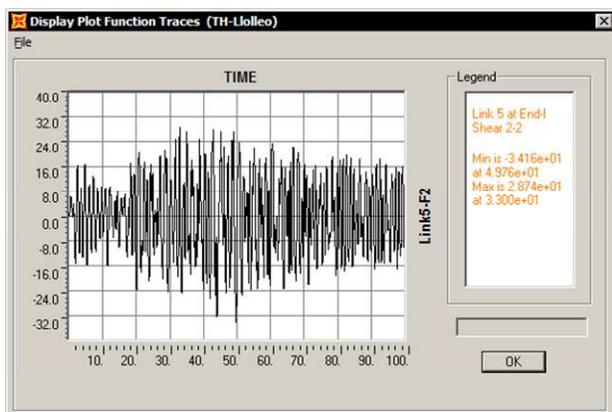


Caso 3: Análisis Optimizado

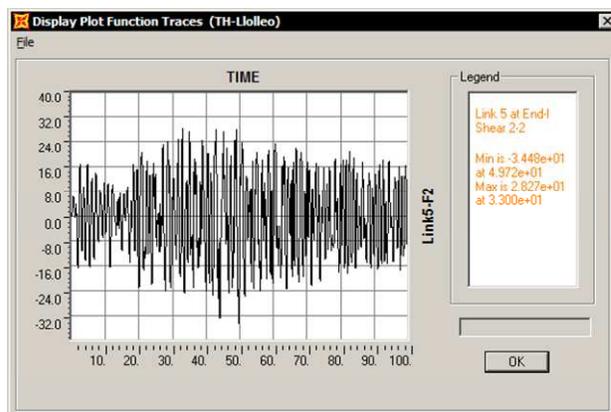
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-31.8	30.5
Análisis Excéntrico	-33.6	35.9
Análisis Optimizado	-41.4	41.7

Figura VII.26: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Transversal

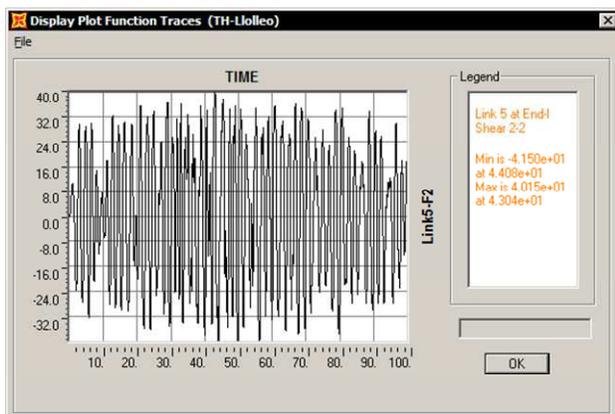
Aislador 5 - Registro Lloleo Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

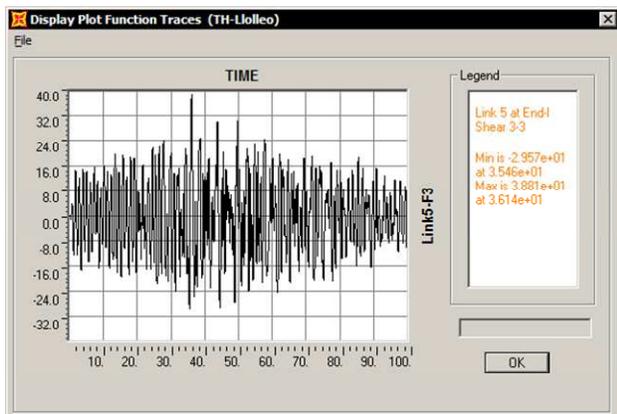


Caso 3: Análisis Optimizado

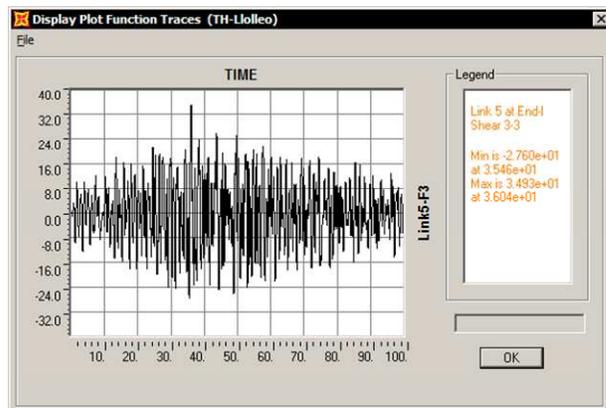
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-34.6	28.7
Análisis Excéntrico	-34.5	28.3
Análisis Optimizado	-41.5	40.1

Figura VII.27: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Lloleo Dirección Longitudinal

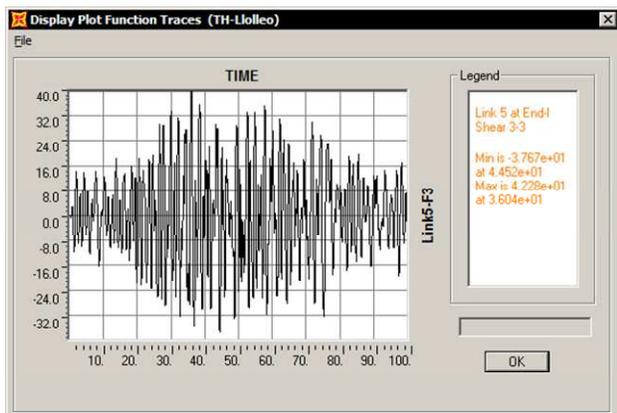
Aislador 5 - Registro Lloleo Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

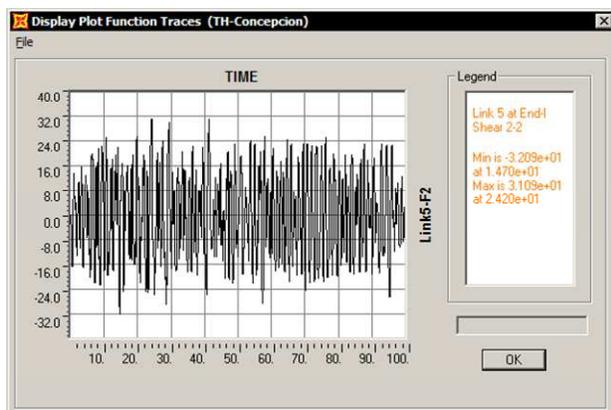


Caso 3: Análisis Optimizado

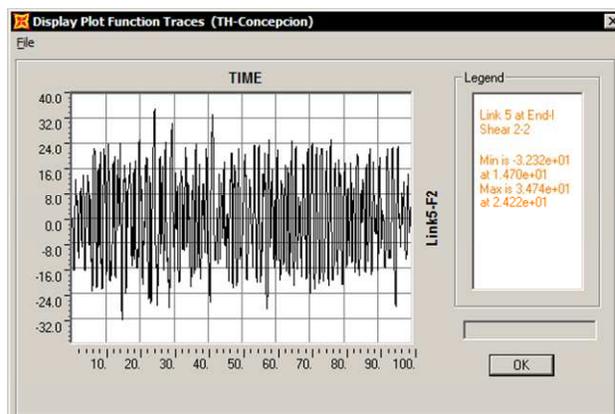
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-29.6	38.8
Análisis Excéntrico	-27.6	34.9
Análisis Optimizado	-37.7	42.3

Figura VII.28: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Lloleo Dirección Transversal

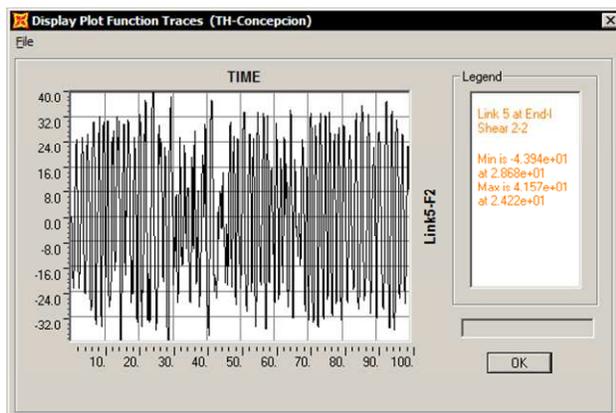
Aislador 5 - Registro Concepción Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

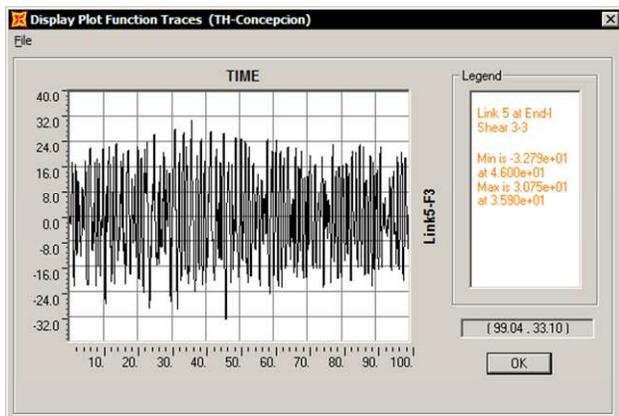


Caso 3: Análisis Optimizado

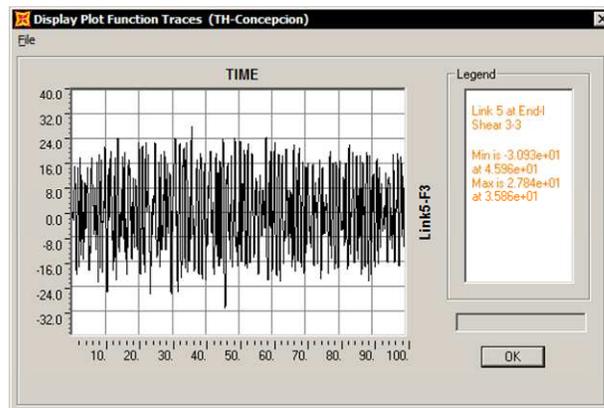
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-32.1	31.1
Análisis Excéntrico	-32.3	24.2
Análisis Optimizado	-43.9	41.6

Figura VII.29: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Longitudinal

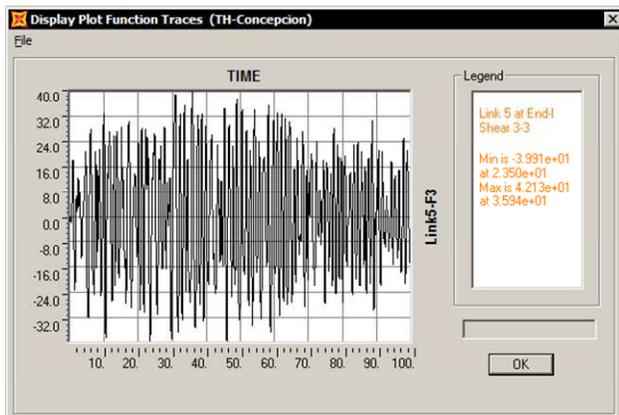
Aislador 5 - Registro Concepción Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

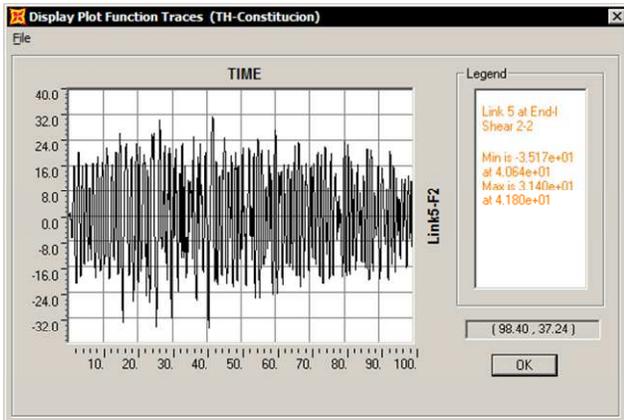


Caso 3: Análisis Optimizado

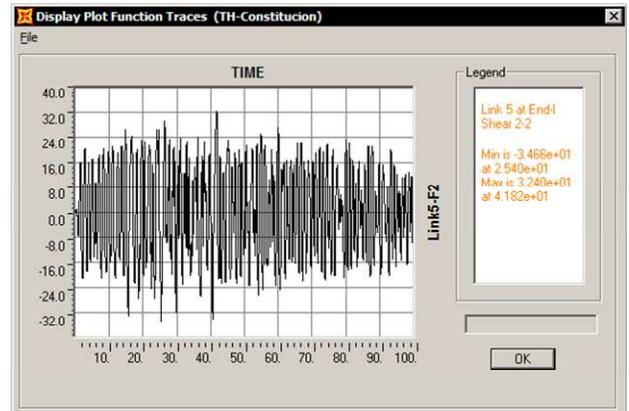
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-32.8	30.8
Análisis Excéntrico	-30.9	27.8
Análisis Optimizado	-39.9	42.1

Figura VII.30: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Transversal

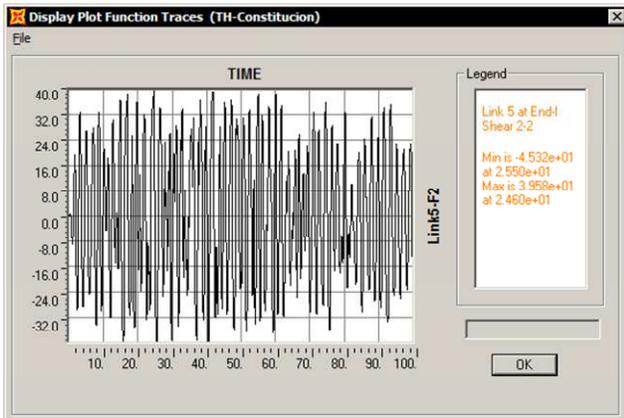
Aislador 5 - Registro Constitución Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

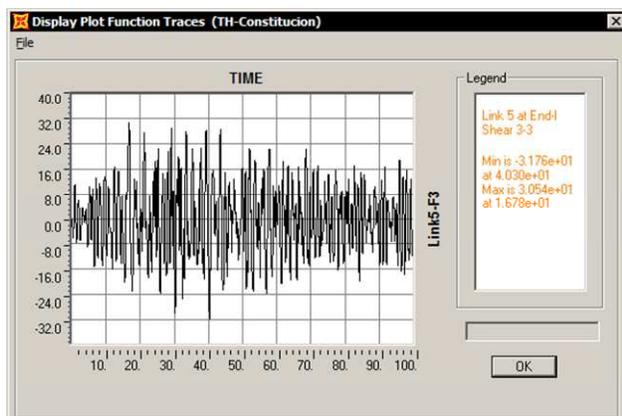


Caso 3: Análisis Optimizado

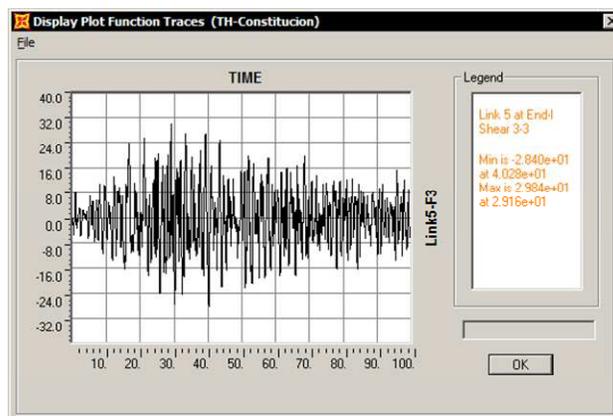
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-35.2	31.4
Análisis Excéntrico	-34.7	32.4
Análisis Optimizado	-45.3	39.6

Figura VII.31: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Longitudinal

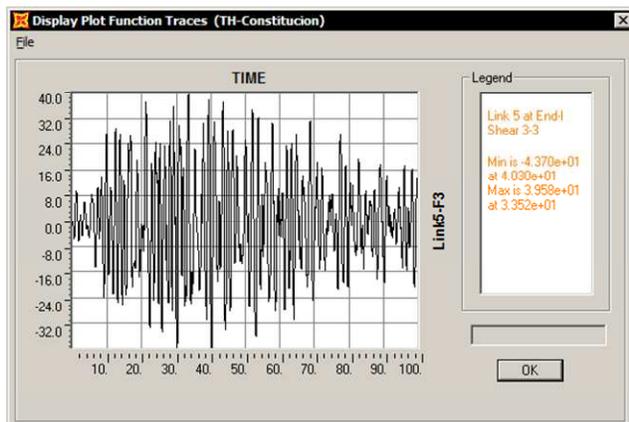
Aislador 5 - Registro Constitución Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico



Caso 3: Análisis Optimizado

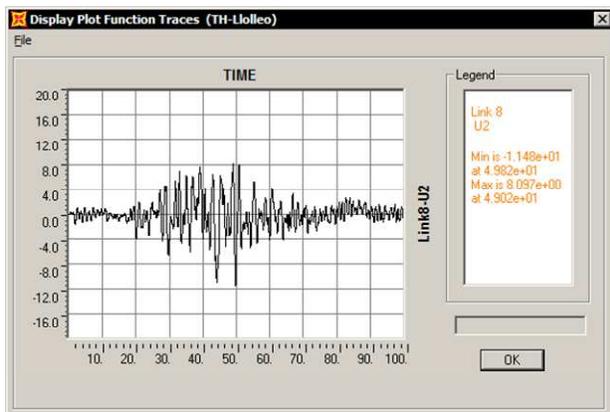
Esfuerzo de Corte	Min t	Max t
Análisis Centrado	-31.8	30.5
Análisis Excéntrico	-28.4	29.8
Análisis Optimizado	-43.7	39.6

Figura VII.32: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Transversal

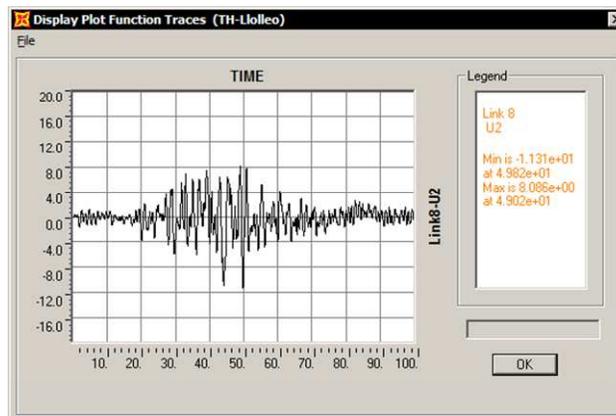
Historia Deformación de Corte Aisladores

En las siguientes figuras se muestra gráficamente las deformaciones de corte obtenidas en el tiempo para los aisladores 5 y 8.

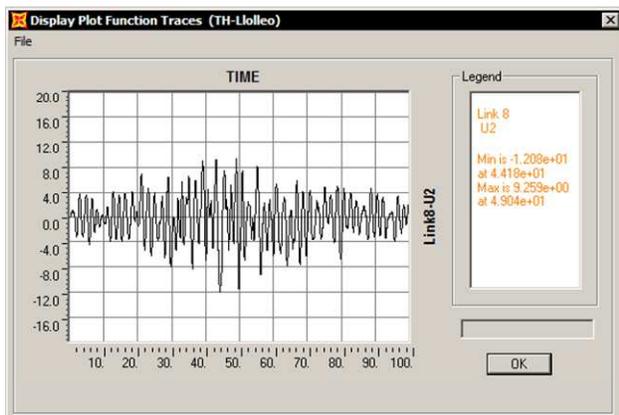
Aislador 8 - Registro Lloleo Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

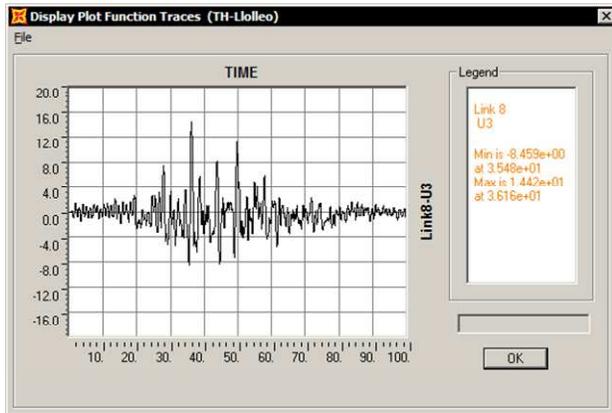


Caso 3: Análisis Optimizado

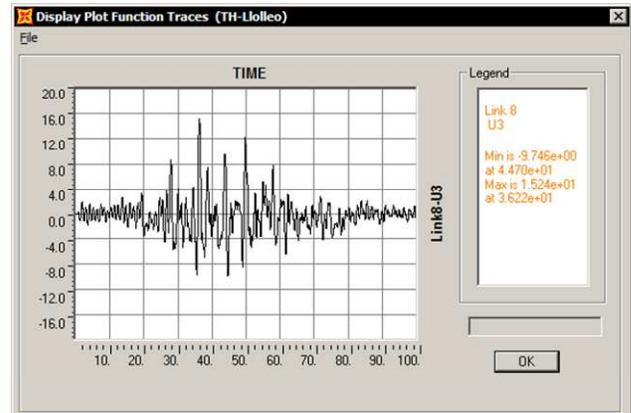
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-11.5	8.1
Análisis Excéntrico	-11.3	8.1
Análisis Optimizado	-12.1	9.3

Figura VII.33: Historia Deformacion de Corte Aislador 8, Registro Lloleo Dirección Longitudinal

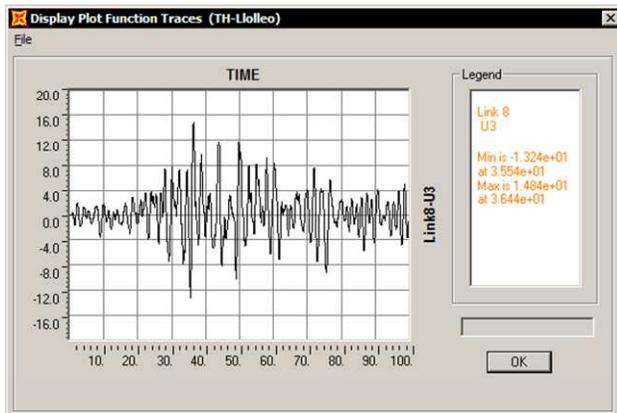
Aislador 8 - Registro Lloleo Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

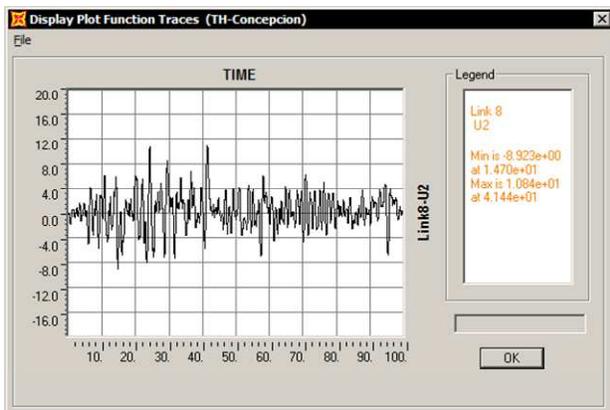


Caso 3: Análisis Optimizado

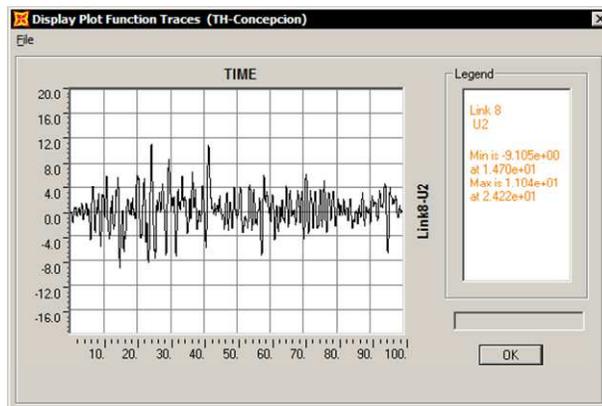
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-8.5	14.4
Análisis Excéntrico	-9.7	15.2
Análisis Optimizado	-13.2	14.8

Figura VII.34: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Lloleo Dirección Transversal

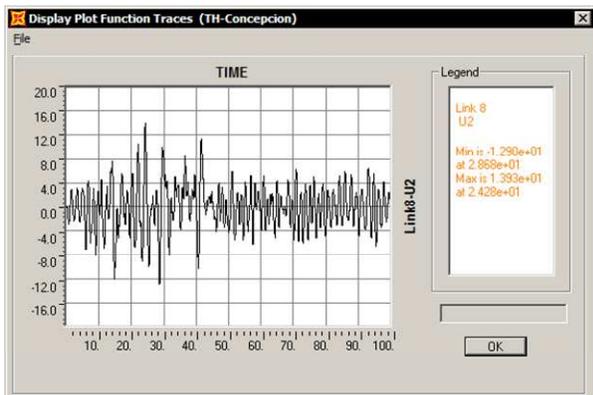
Aislador 8 - Registro Concepción Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

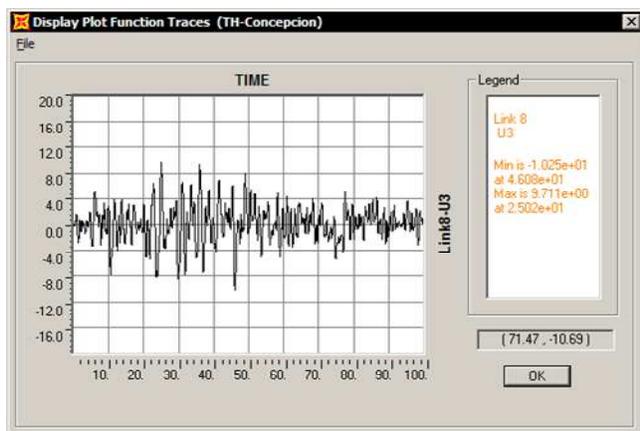


Caso 3: Análisis Optimizado

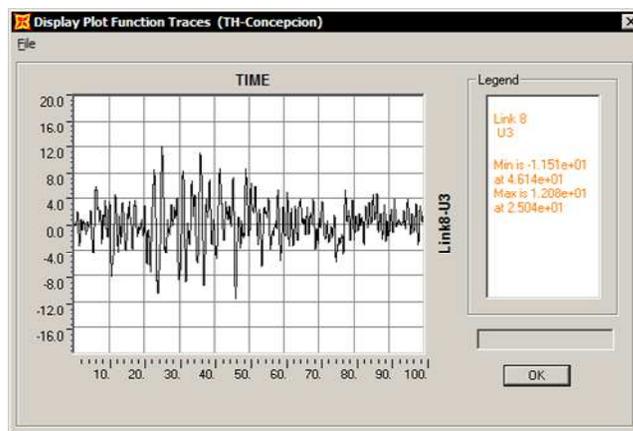
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-8.9	10.8
Análisis Excéntrico	-9.1	11.0
Análisis Optimizado	-12.9	13.9

Figura VII.35: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Longitudinal

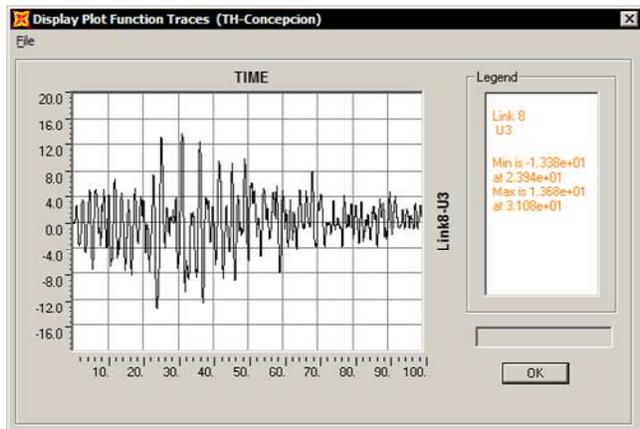
Aislador 8 - Registro Concepción Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

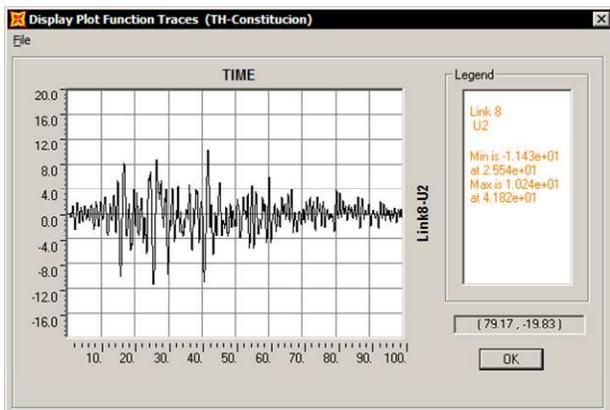


Caso 3: Análisis Optimizado

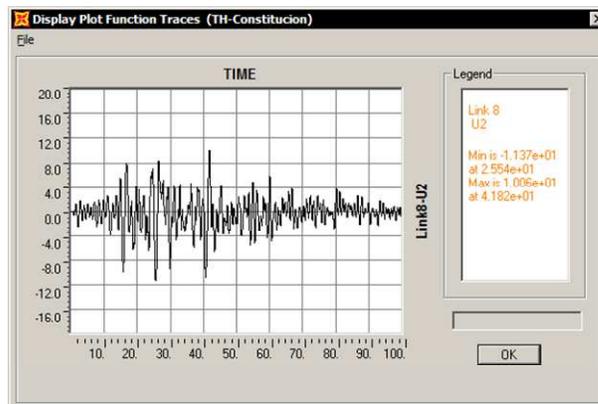
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-10.2	9.7
Análisis Excéntrico	-11.5	12.1
Análisis Optimizado	-13.4	13.7

Figura VII.36: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Concepción Dirección Transversal

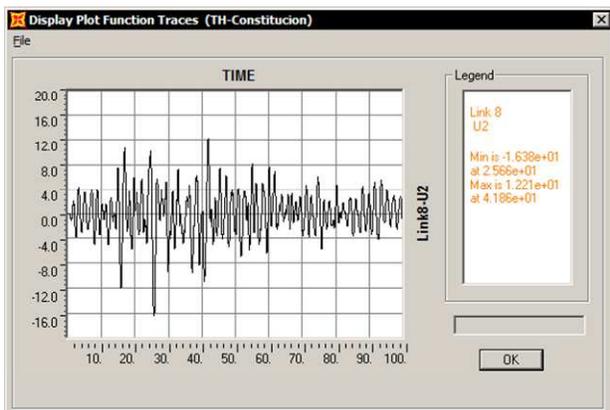
Aislador 8 - Registro Constitución Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

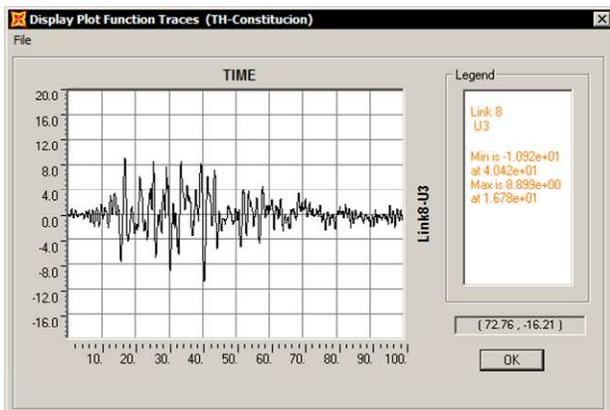


Caso 3: Análisis Optimizado

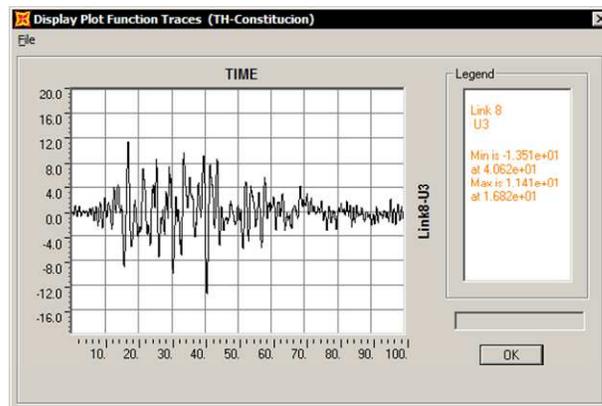
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-11.4	10.2
Análisis Excéntrico	-11.4	10.1
Análisis Optimizado	-16.4	12.2

Figura VII.37: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Longitudinal

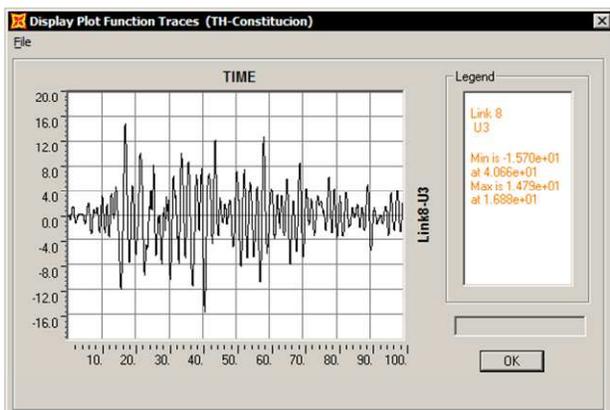
Aislador 8 - Registro Constitución Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

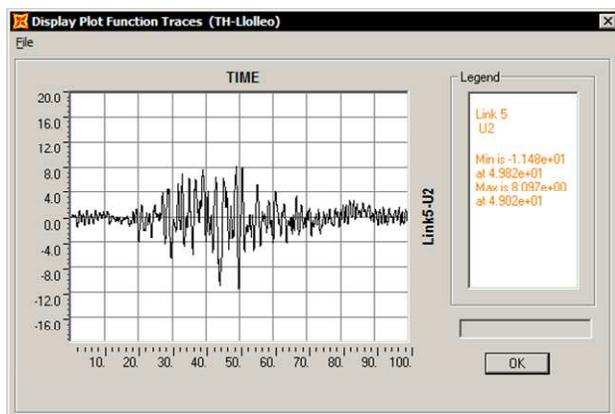


Caso 3: Análisis Optimizado

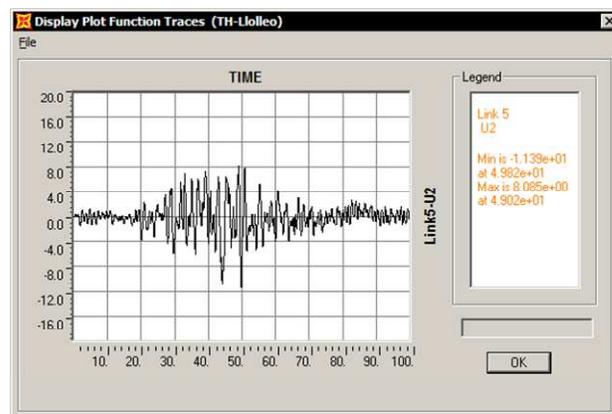
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-10.9	8.9
Análisis Excéntrico	-13.5	11.4
Análisis Optimizado	-15.7	14.8

Figura VII.38: Historia Deformación de Corte Aislador 8, Registro Constitución Dirección Transversal

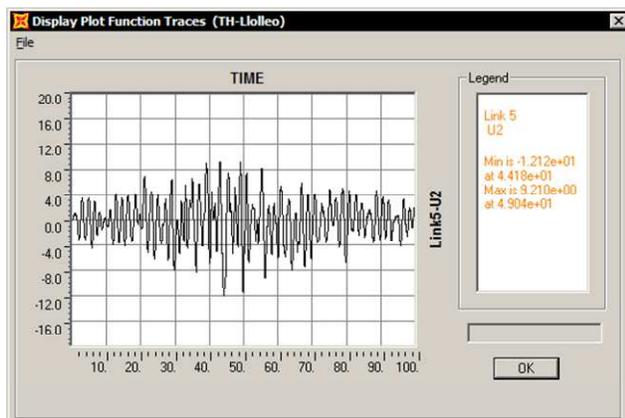
Aislador 5 - Registro Lloleo Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

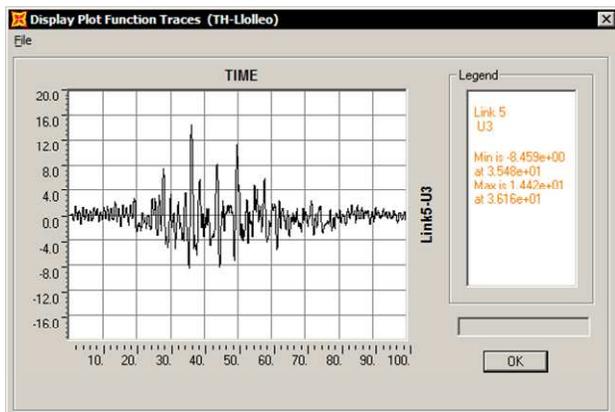


Caso 3: Análisis Optimizado

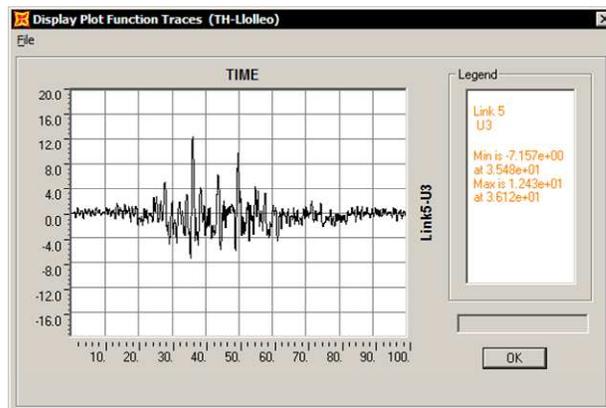
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-11.5	8.1
Análisis Excéntrico	-11.4	8.1
Análisis Optimizado	-12.1	9.2

Figura VII.39: Historia Esfuerzo de Corte Aislador 5, Registro Lloleo Dirección Longitudinal

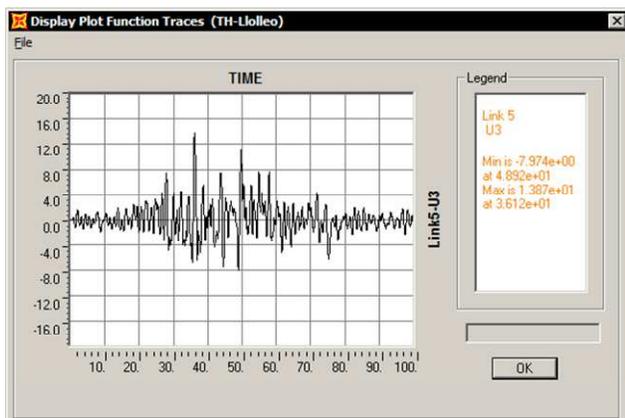
Aislador 5 - Registro Lloleo Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

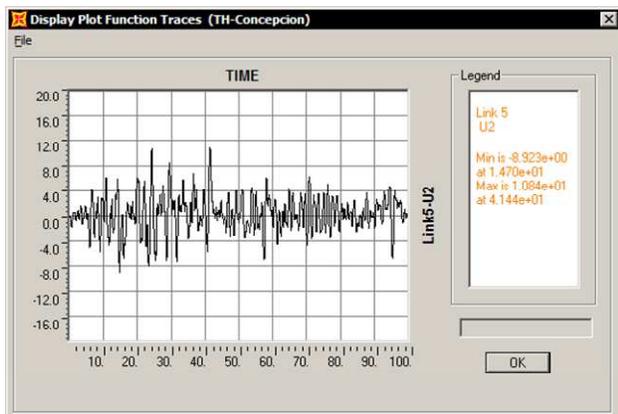


Caso 3: Análisis Optimizado

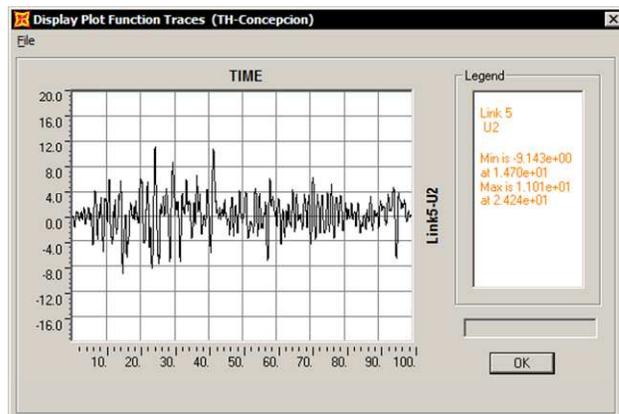
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-8.5	14.4
Análisis Excéntrico	-7.2	12.4
Análisis Optimizado	-8.0	13.9

Figura VII.40: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Lloleo Dirección Transversal

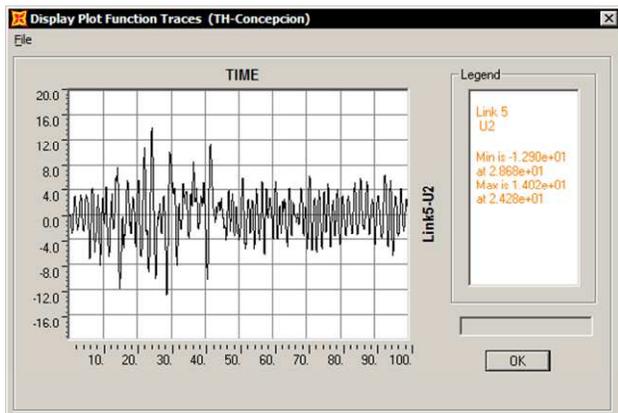
Aislador 5 - Registro Concepción Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

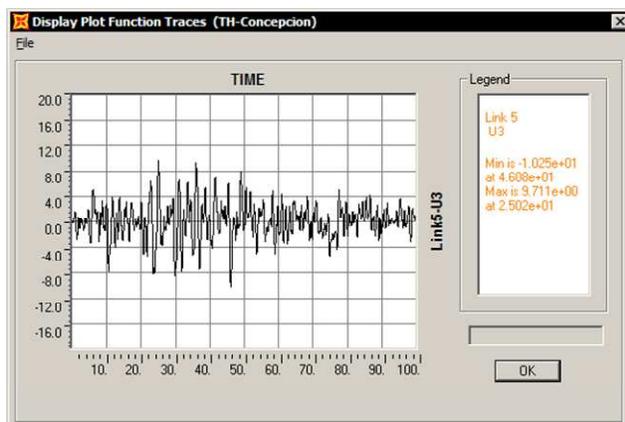


Caso 3: Análisis Optimizado

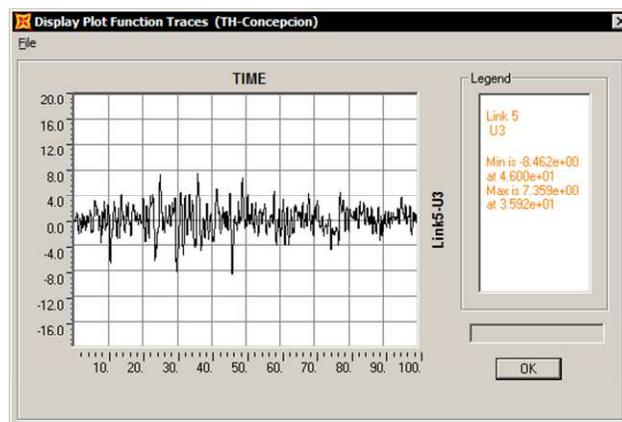
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-8.9	10.8
Análisis Excéntrico	-9.1	11.0
Análisis Optimizado	-12.9	14.0

Figura VII.41: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Longitudinal

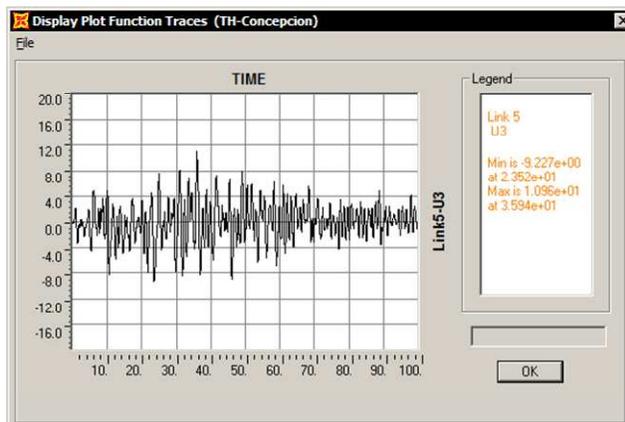
Aislador 5 - Registro Concepción Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

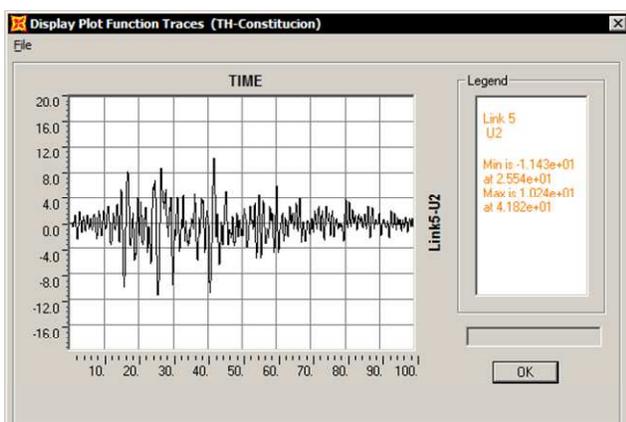


Caso 3: Análisis Optimizado

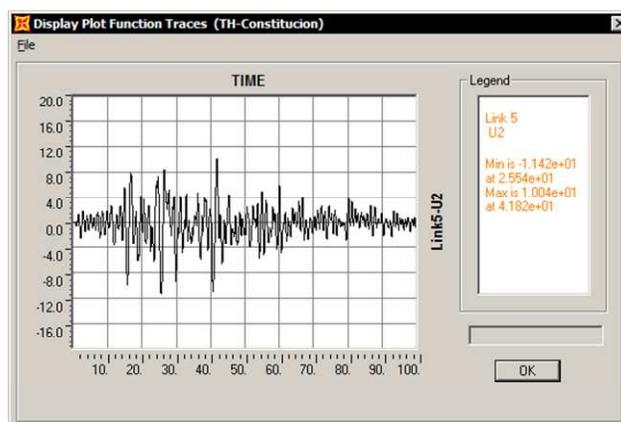
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-10.3	9.7
Análisis Excéntrico	-8.5	7.4
Análisis Optimizado	-9.2	11.0

Figura VII.42: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Concepción Dirección Transversal

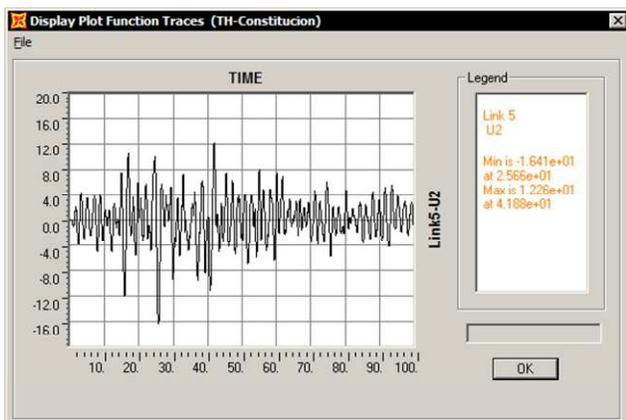
Aislador 5 - Registro Constitución Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

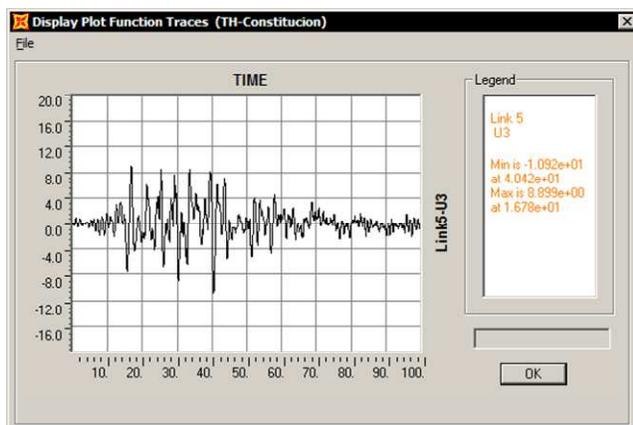


Caso 3: Análisis Optimizado

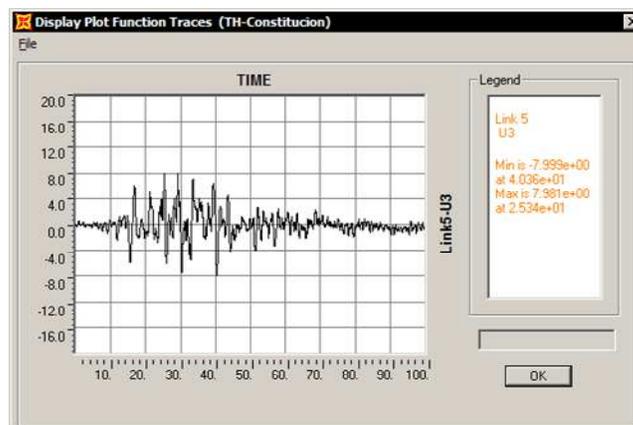
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-11.4	10.2
Análisis Excéntrico	-11.4	10.0
Análisis Optimizado	-16.4	12.3

Figura VII.43: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Longitudinal

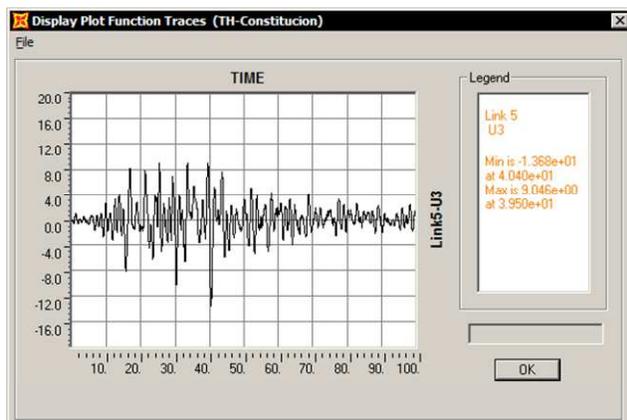
Aislador 5 - Registro Constitución Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico



Caso 3: Análisis Optimizado

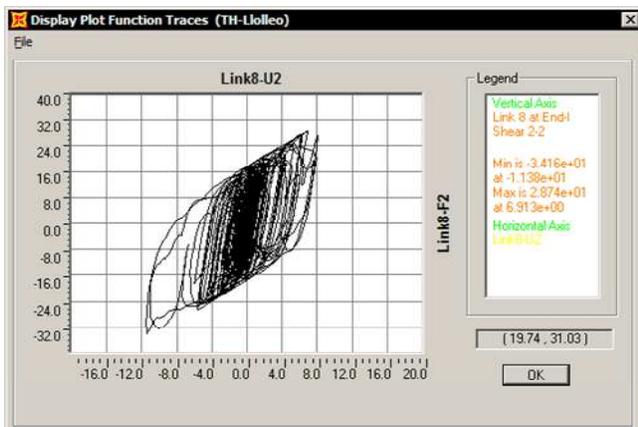
Deformación de Corte	Min cm	Max cm
Análisis Centrado	-10.9	8.9
Análisis Excéntrico	-8.0	8.0
Análisis Optimizado	-13.7	9.0

Figura VII.44: Historia Deformación de Corte Aislador 5, Registro Constitución Dirección Transversal

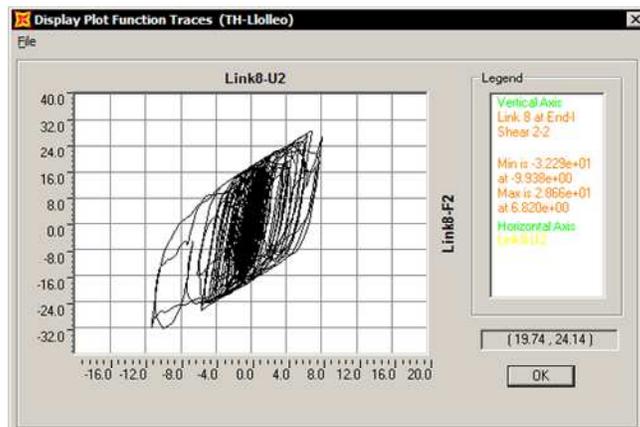
Relación Esfuerzo Deformación

A continuación se muestra la relación Esfuerzo-Deformación obtenida para cada uno de los registros para los casos del aislador 5 y 8.

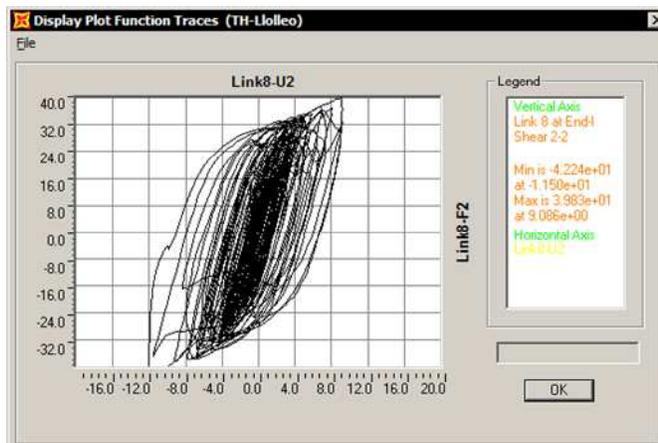
Aislador 8 - Registro Lolloe



Caso 1: Análisis Centrado

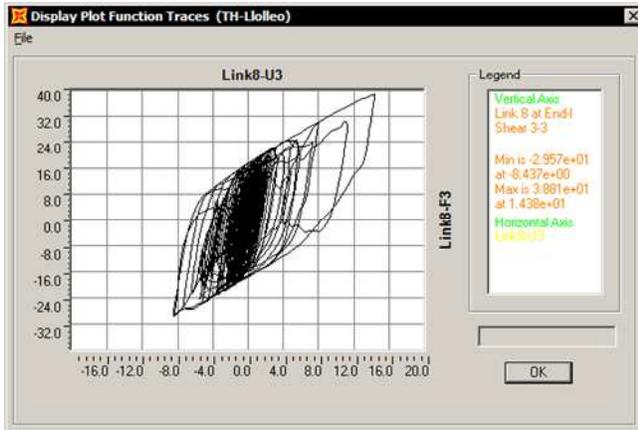


Caso 2: Análisis Excéntrico

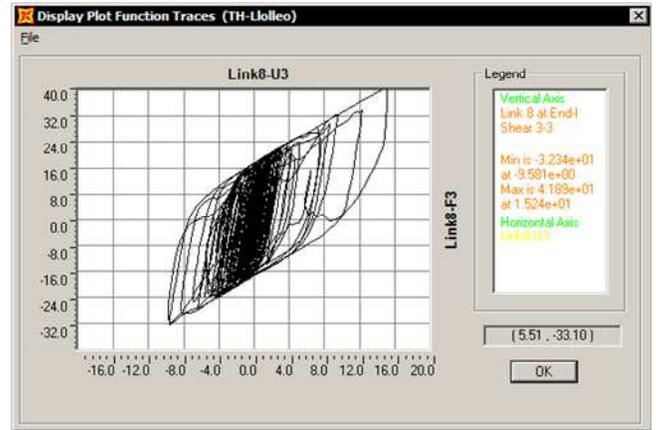


Caso 3: Análisis Optimizado

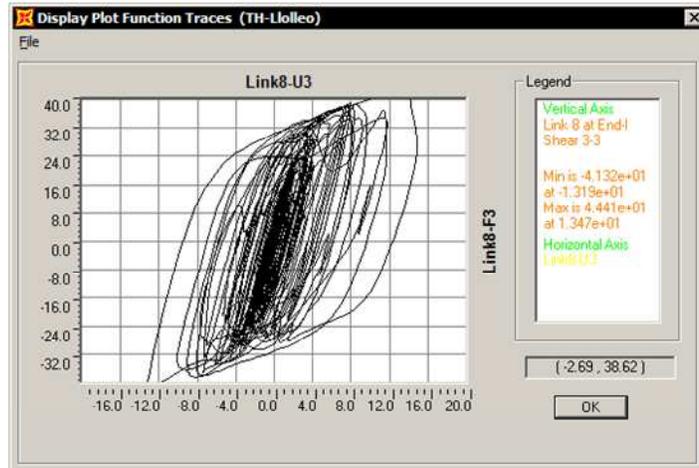
Figura VII.45: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Lolloe



Caso 1: Análisis Centrado

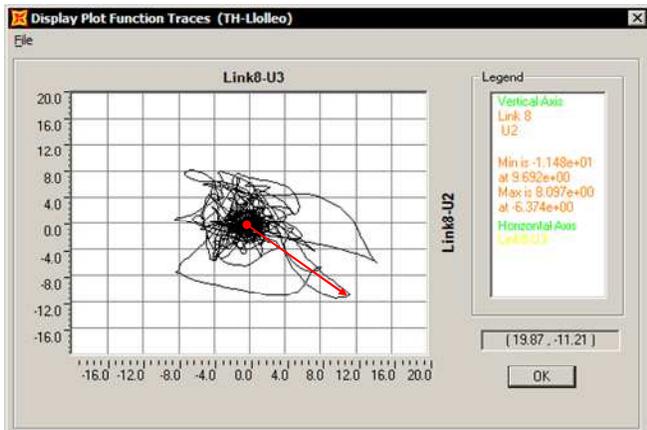


Caso 2: Análisis Excéntrico



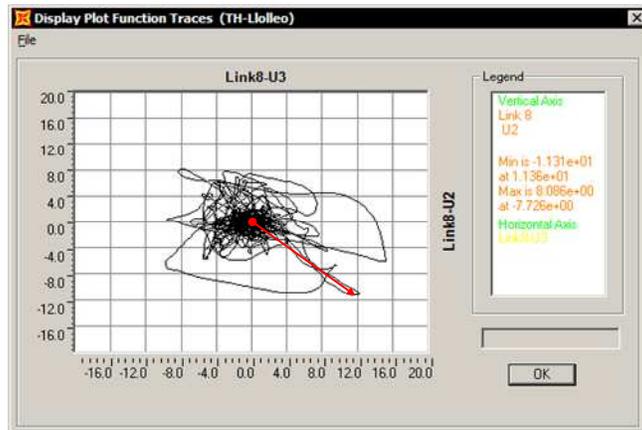
Caso 3: Análisis Optimizado

Figura VII.46: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Llolleo



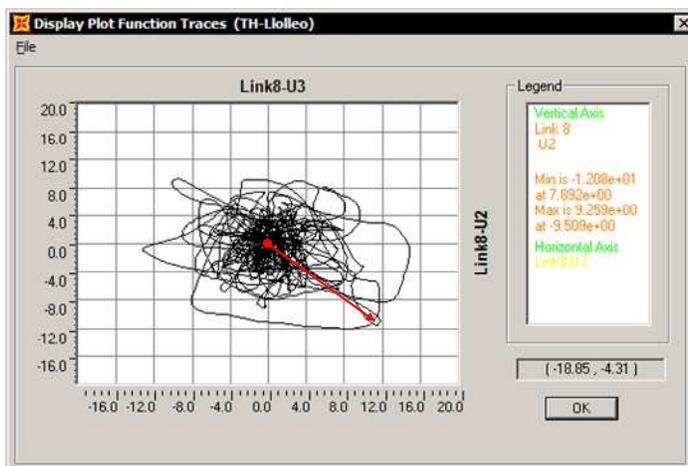
Caso 1: Análisis Centrado

Máxima Deformación Compuesta: 15.6 cm



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máxima Deformación Compuesta: 16.3 cm

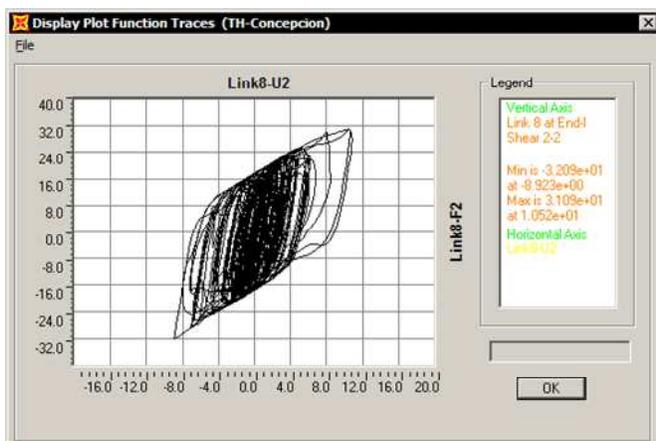


Caso 3: Análisis Optimizado

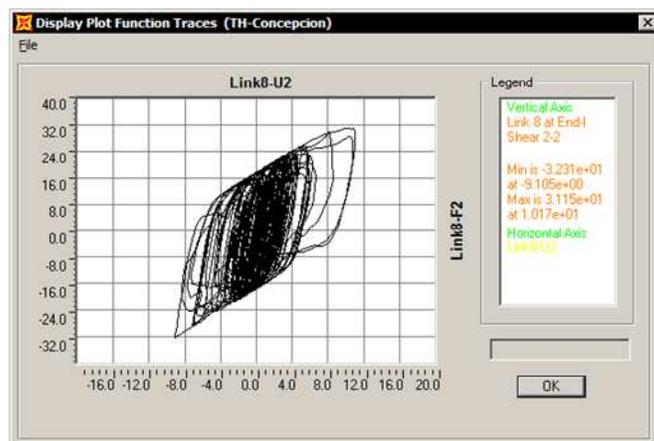
Máxima Deformación Compuesta: 15.6 cm

Figura VII.47: Máxima Deformación Compuesta Aislador 8, Registro Llolleo

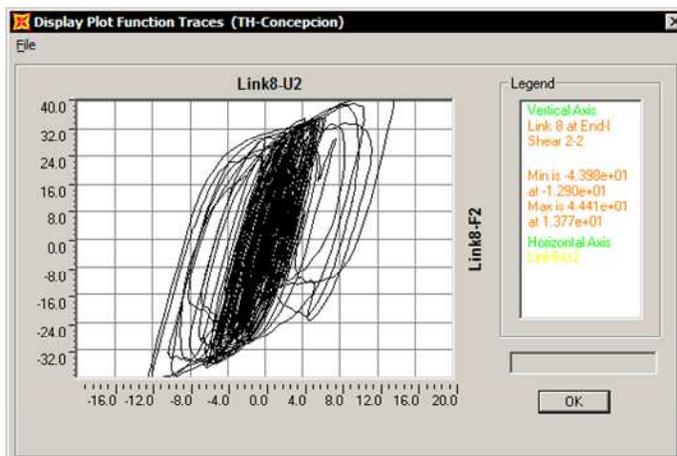
Aislador 8 - Registro Concepción



Caso 1: Análisis Centrado

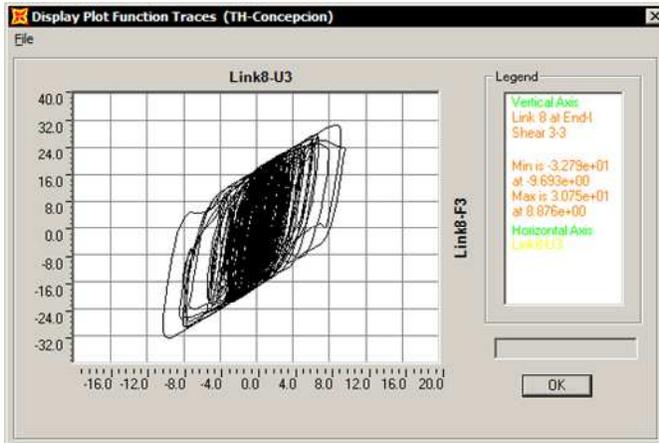


Caso 2: Análisis Excéntrico

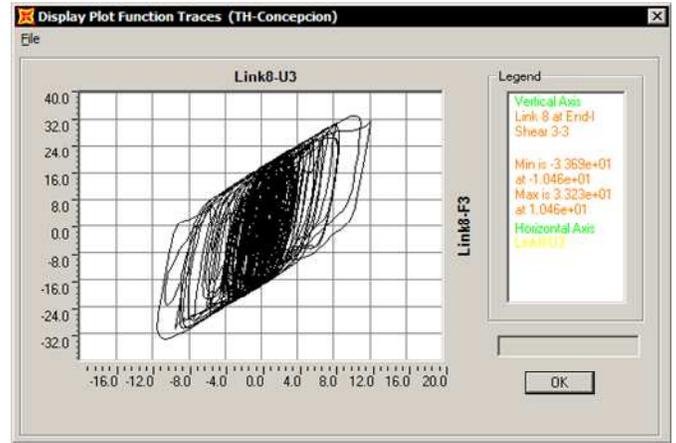


Caso 3: Análisis Optimizado

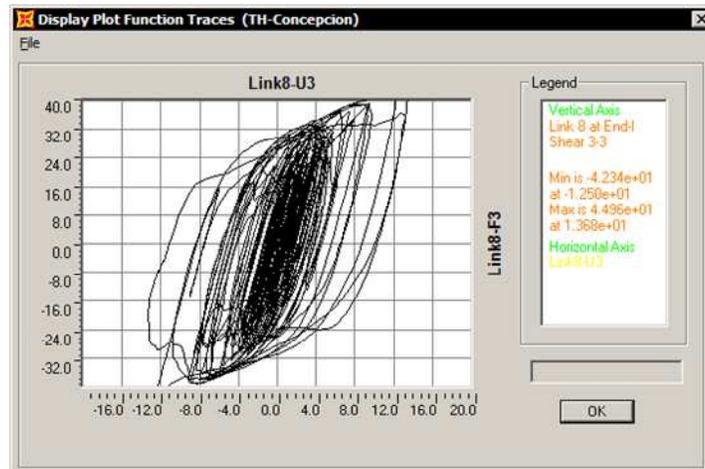
Figura VII.48: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Concepción



Caso 1: Análisis Centrado

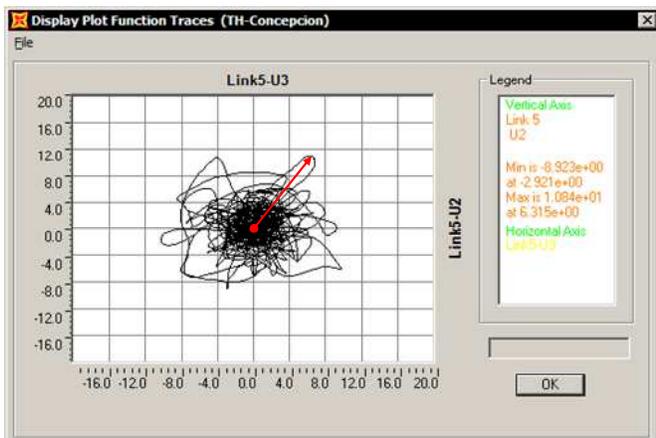


Caso 2: Análisis Excéntrico



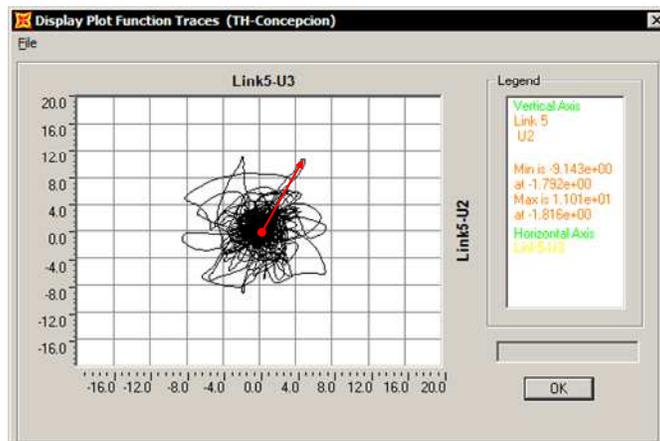
Caso 3: Análisis Optimizado

Figura VII.49: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Concepción



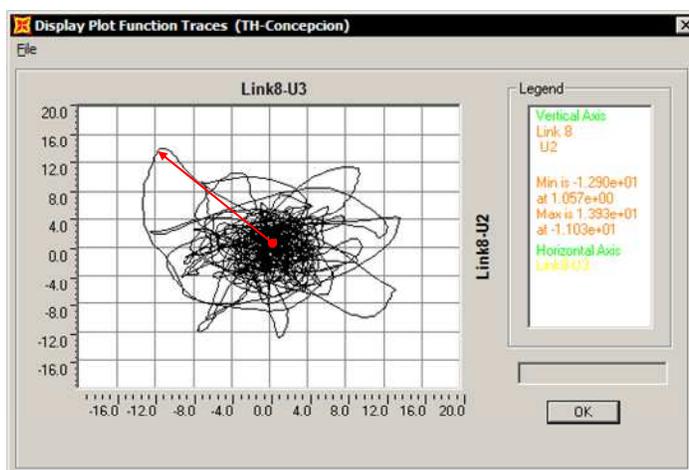
Caso 1: Análisis Centrado

Máxima Deformación Compuesta: 13.0 cm



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máxima Deformación Compuesta: 13.9 cm

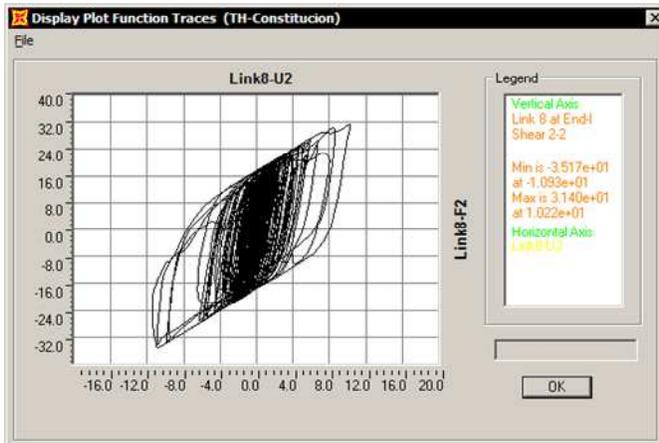


Caso 3: Análisis Optimizado

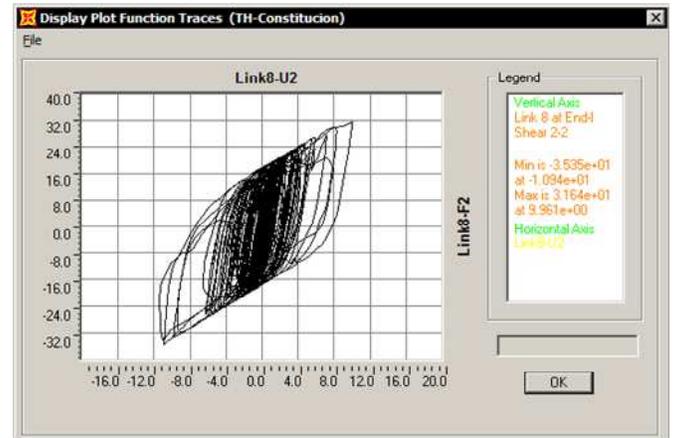
Máxima Deformación Compuesta: 17.8 cm

Figura VII.50: Máxima Deformación Compuesta Aislador 8, Registro Concepción

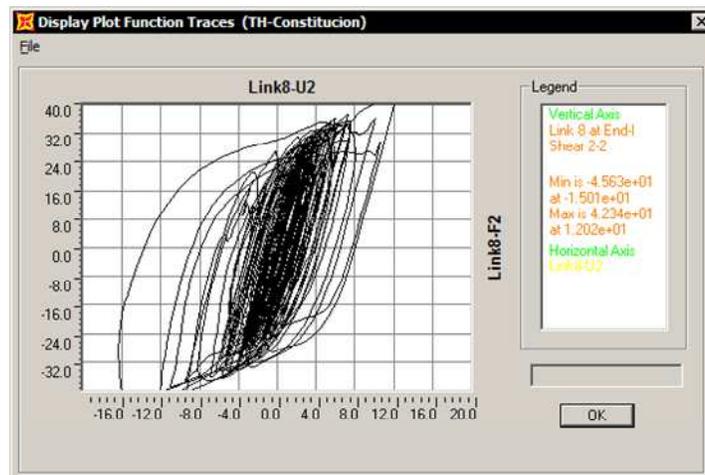
Aislador 8 - Registro Constitución



Caso 1: Análisis Centrado

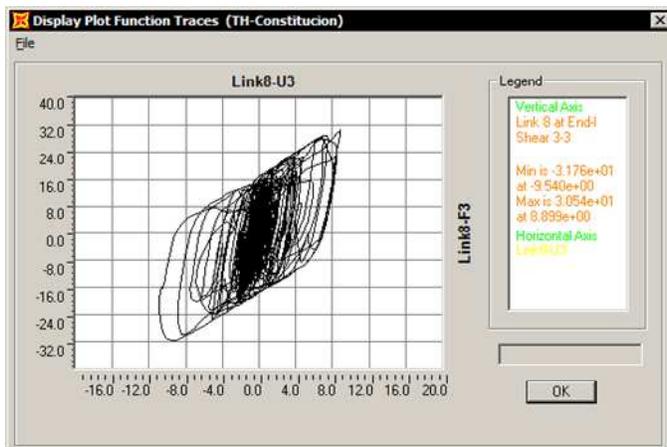


Caso 2: Análisis Excéntrico

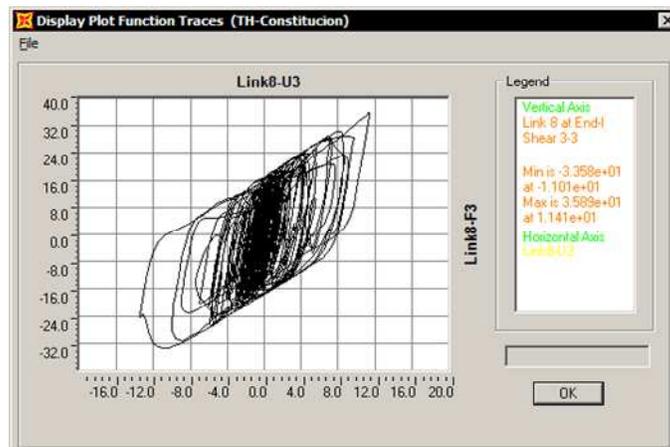


Caso 3: Análisis Optimizado

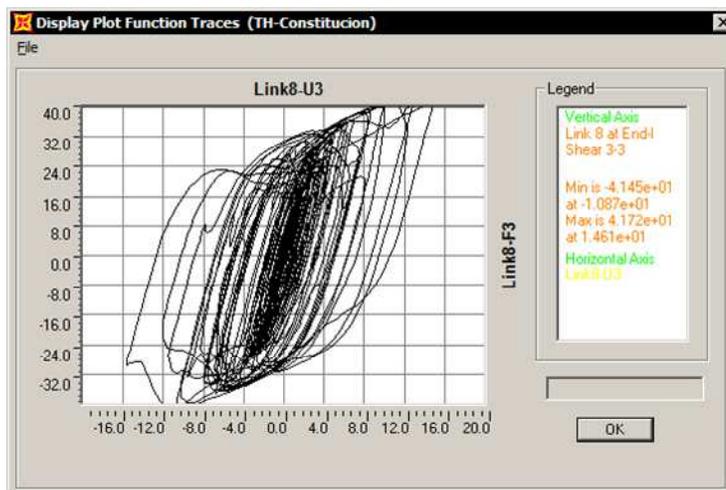
Figura VII.51: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Constitución



Caso 1: Análisis Centrado

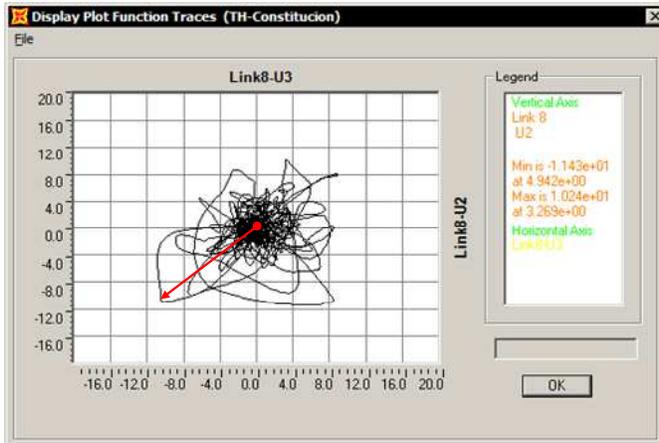


Caso 2: Análisis Excéntrico



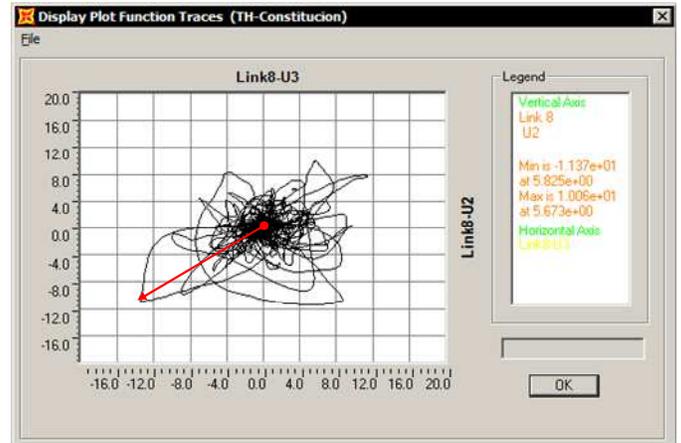
Caso 3: Análisis Optimizado

Figura VII.52: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 8, Registro Constitución



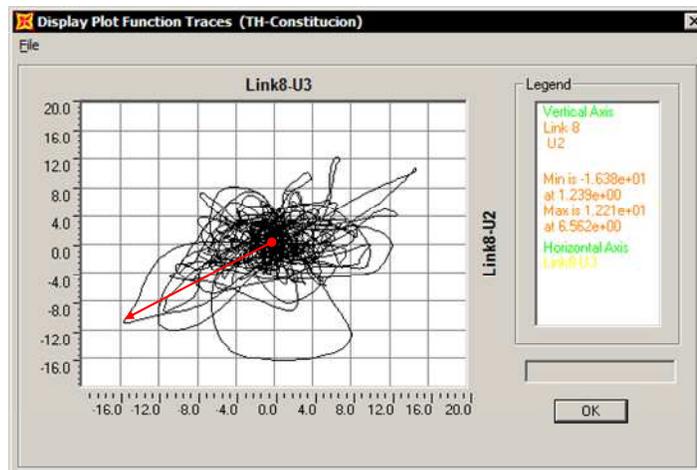
Caso 1: Análisis Centrado

Máxima Deformación Compuesta: 14.9 cm



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máxima Deformación Compuesta: 17.2 cm

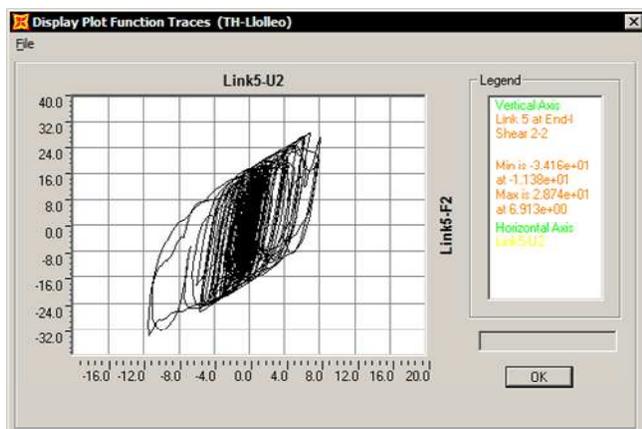


Caso 3: Análisis Optimizado

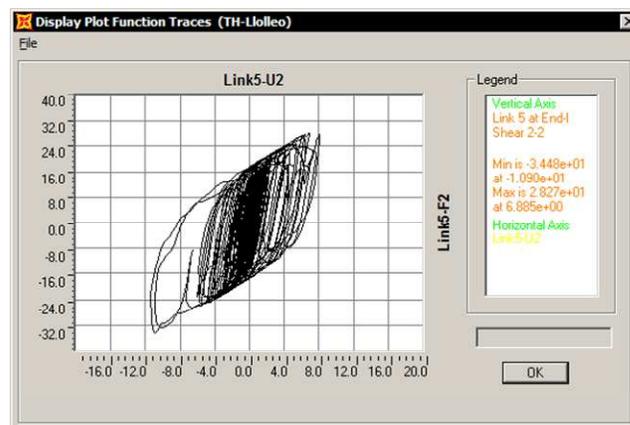
Máxima Deformación Compuesta: 18.6 cm

Figura VII.53: Máxima Deformación Compuesta Aislador 8, Registro Constitución

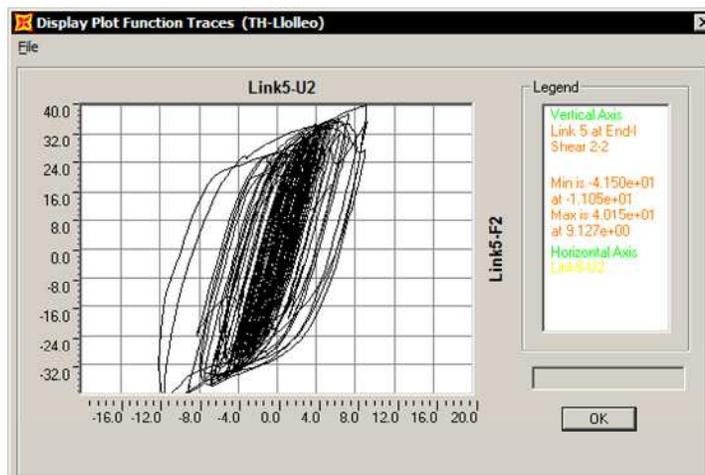
Aislador 5 - Registro Lolloe



Caso 1: Análisis Centrado

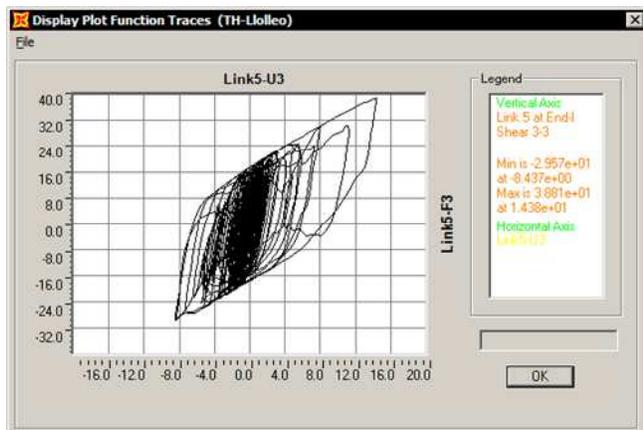


Caso 2: Análisis Excéntrico

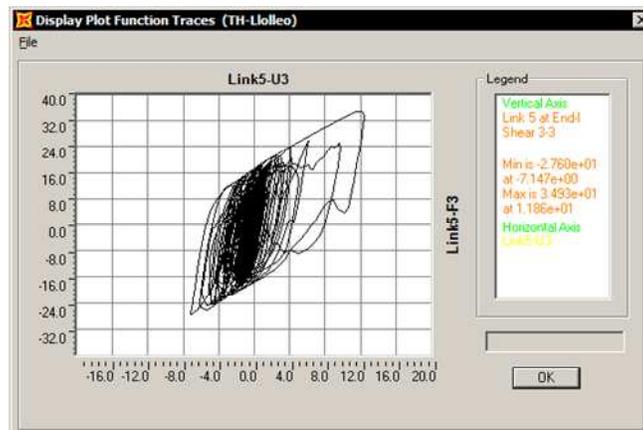


Caso 3: Análisis Optimizado

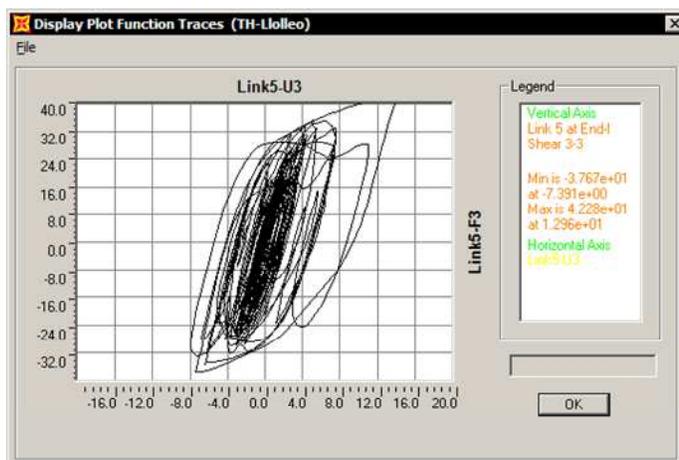
Figura VII.54: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Lolloe



Caso 1: Análisis Centrado

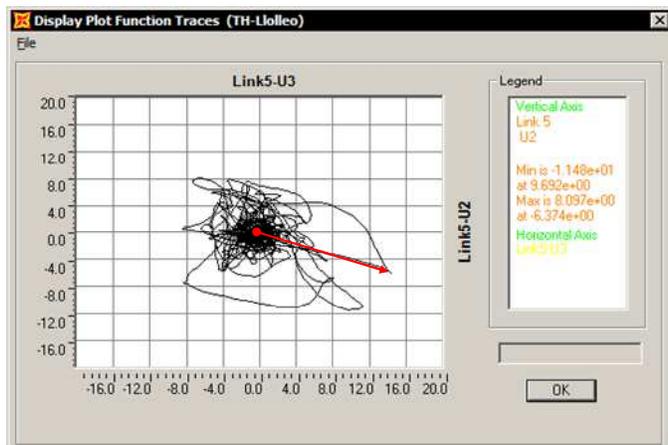


Caso 2: Análisis Excéntrico



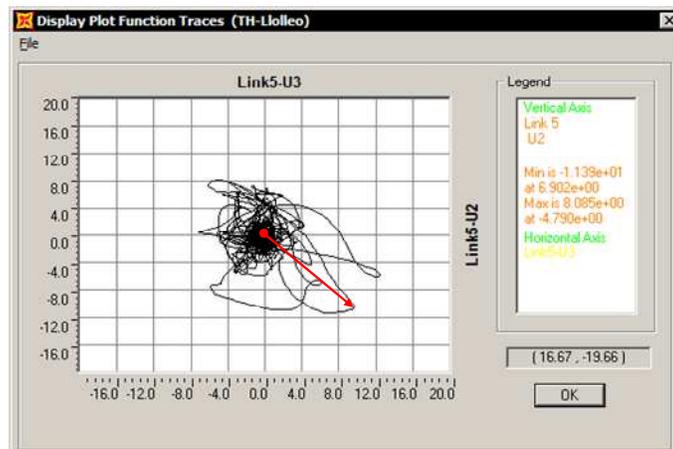
Caso 3: Análisis Optimizado

Figura VII.55: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Llolleo



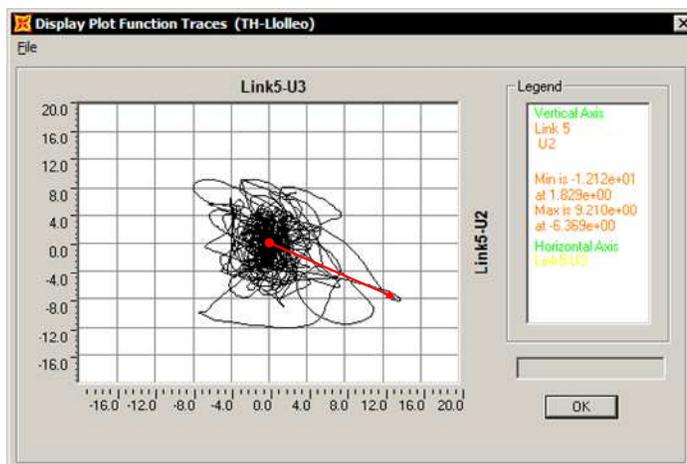
Caso 1: Análisis Centrado

Máxima Deformación Compuesta: 15.2 cm



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máxima Deformación Compuesta: 14.1 cm

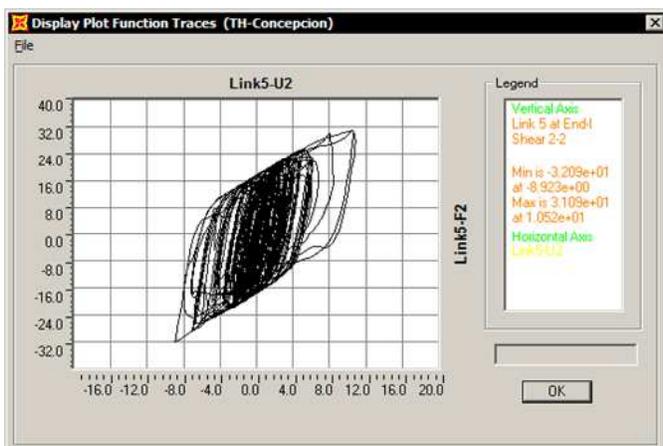


Caso 3: Análisis Optimizado

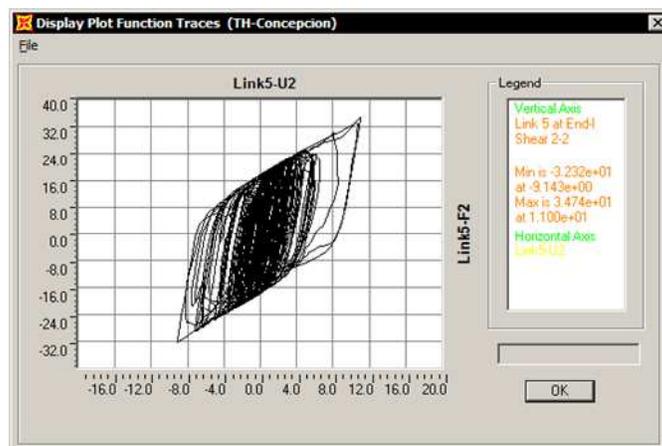
Máxima Deformación Compuesta: 16.1 cm

Figura VII.56: Máxima Deformación Compuesta Aislador 5, Registro Llolleo

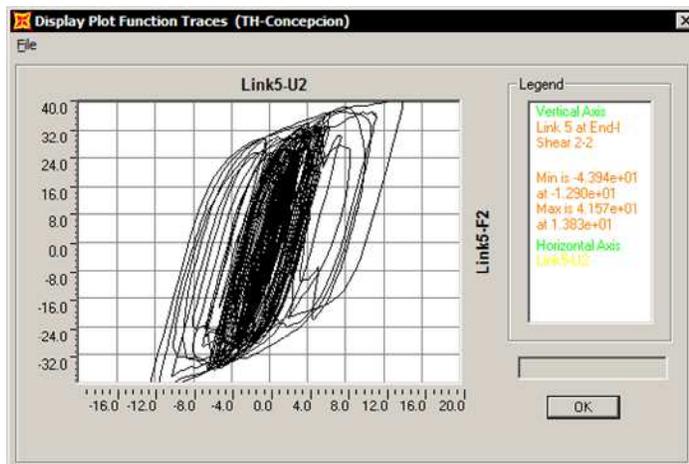
Aislador 5 - Registro Concepción



Caso 1: Análisis Centrado

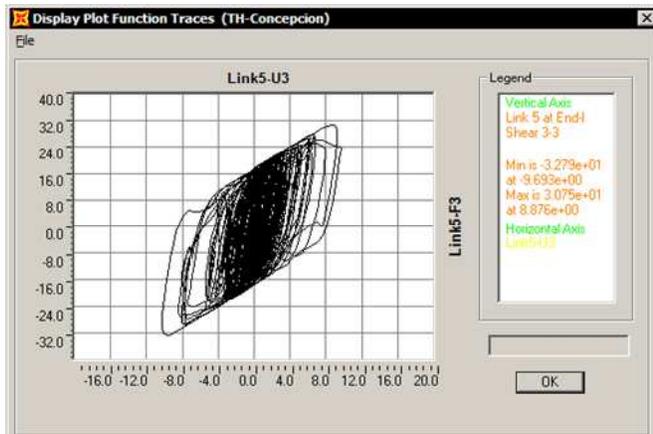


Caso 2: Análisis Excéntrico

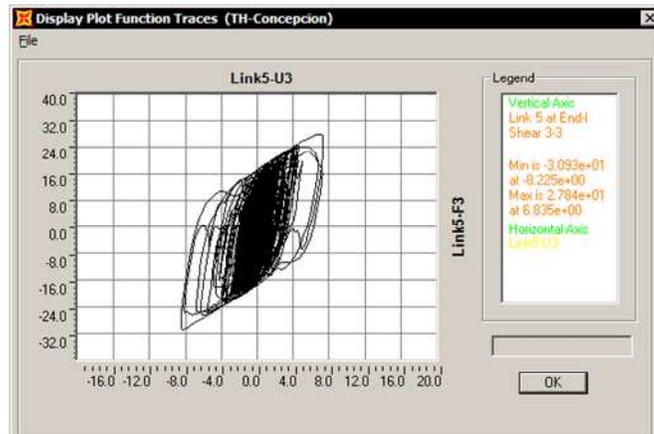


Caso 3: Análisis Optimizado

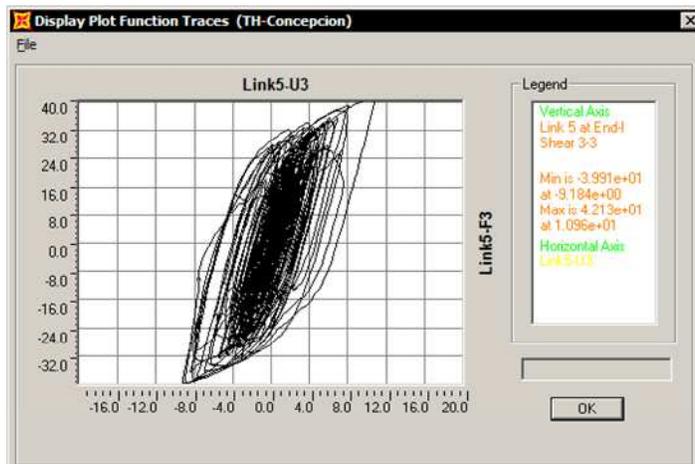
Figura VII.57: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Concepción



Caso 1: Análisis Centrado

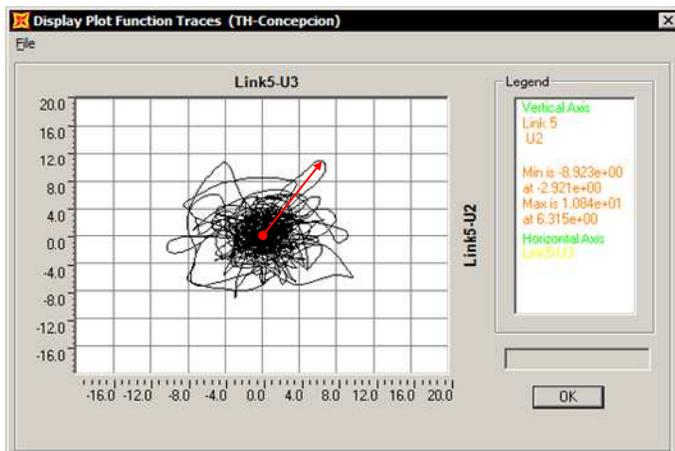


Caso 2: Análisis Excéntrico



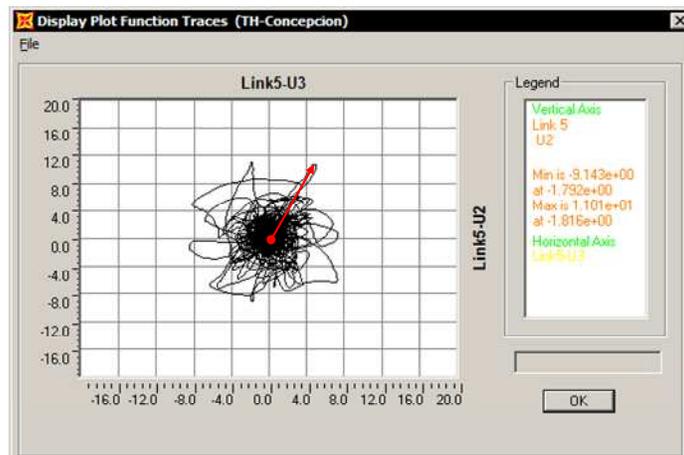
Caso 3: Análisis Optimizado

Figura VII.58: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Concepción



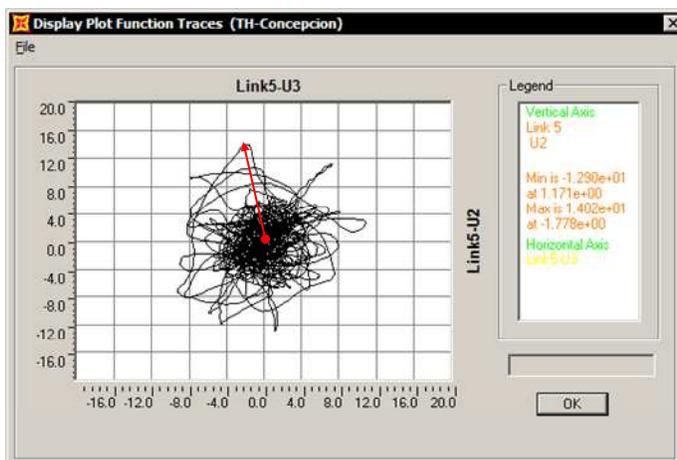
Caso 1: Análisis Centrado

Máxima Deformación Compuesta: 13.0 cm



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máxima Deformación Compuesta: 13.9 cm

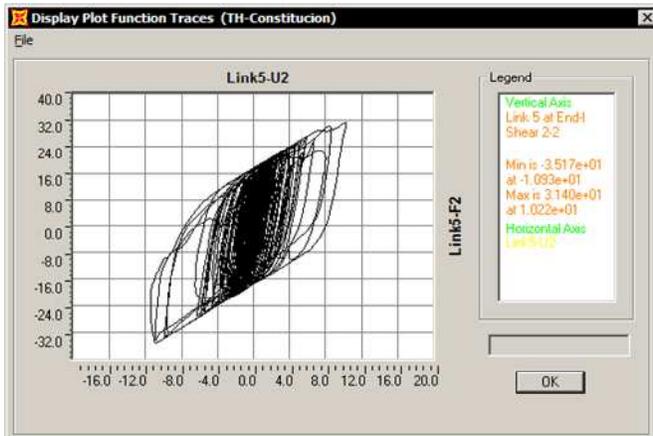


Caso 3: Análisis Optimizado

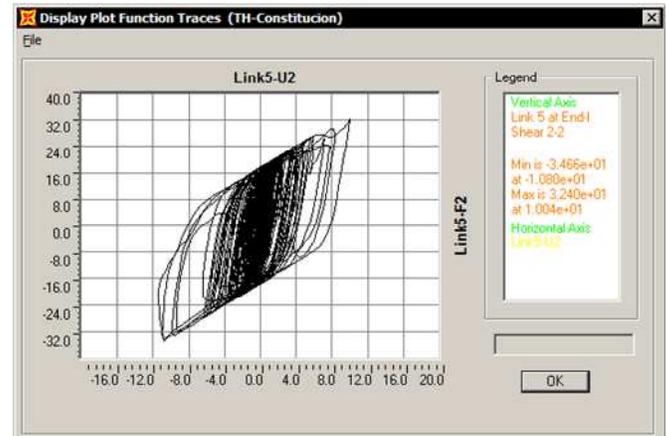
Máxima Deformación Compuesta: 14.1 cm

Figura VII.59: Máxima Deformación Compuesta Aislador 5, Registro Concepción

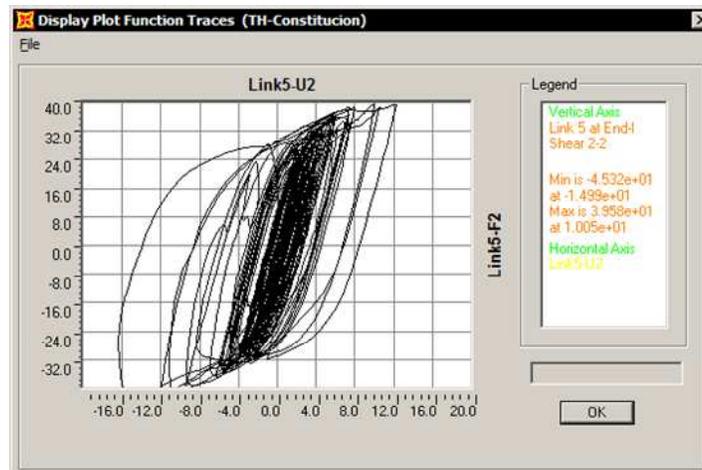
Aislador 5 - Registro Constitución



Caso 1: Análisis Centrado

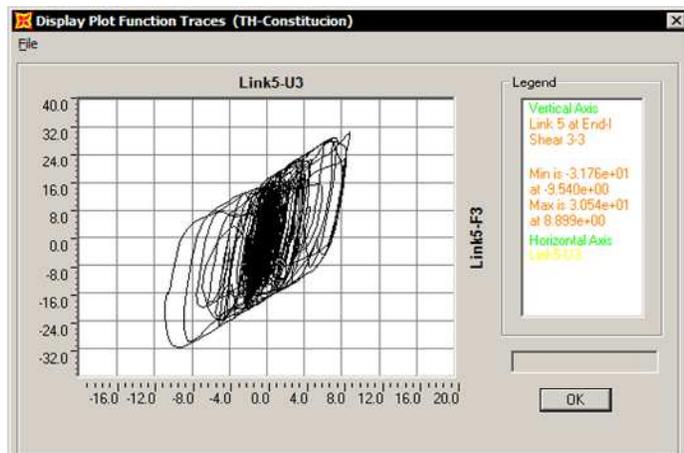


Caso 2: Análisis Excéntrico

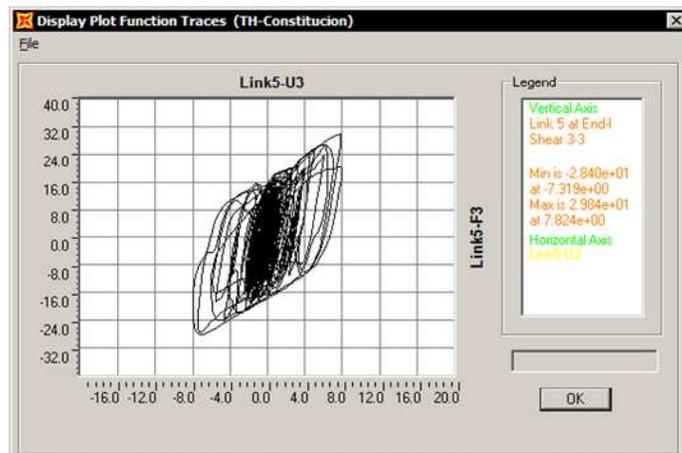


Caso 3: Análisis Optimizado

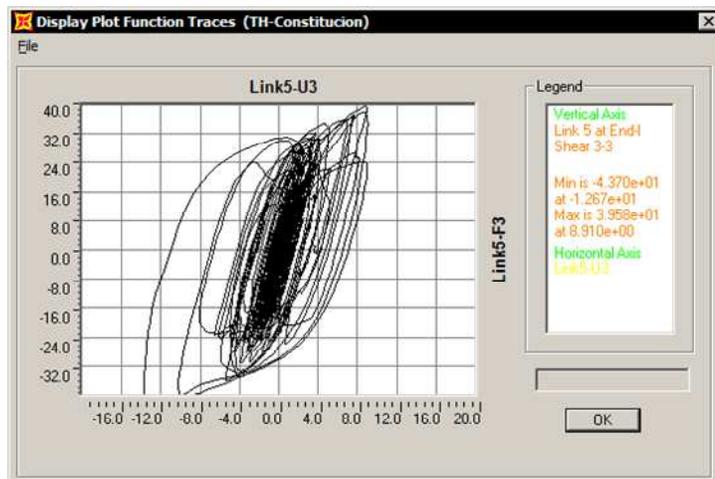
Figura VII.60: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Constitución



Caso 1: Análisis Centrado

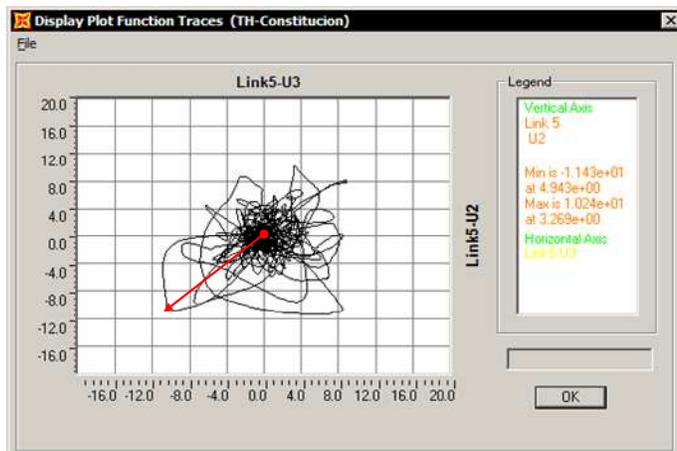


Caso 2: Análisis Excéntrico



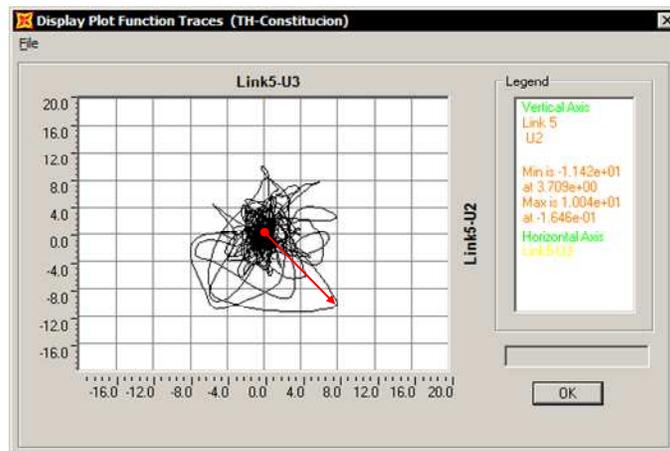
Caso 3: Análisis Optimizado

Figura VII.61: Relación Esfuerzo Deformación Aislador 5, Registro Constitución



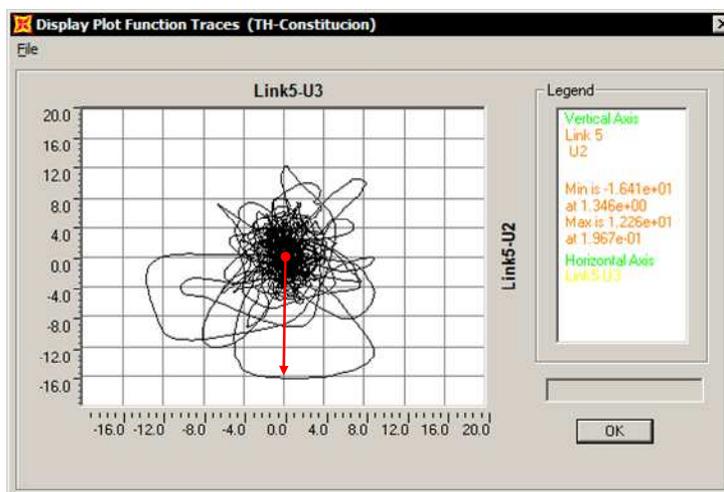
Caso 1: Análisis Centrado

Máxima Deformación Compuesta: 14.9 cm



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máxima Deformación Compuesta: 12.8 cm



Caso 3: Análisis Optimizado

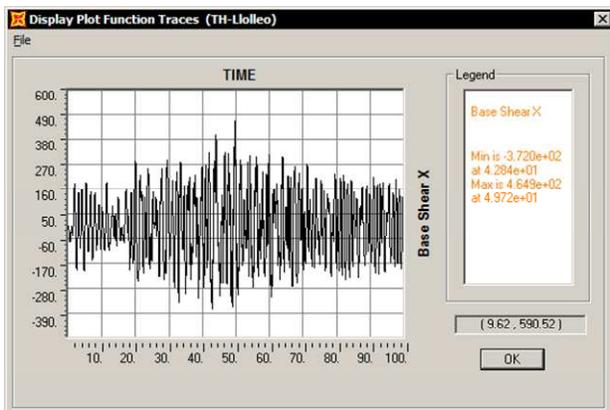
Máxima Deformación Compuesta: 12.8 cm

Figura VII.62: Máxima Deformación Compuesta Aislador 5, Registro Constitución

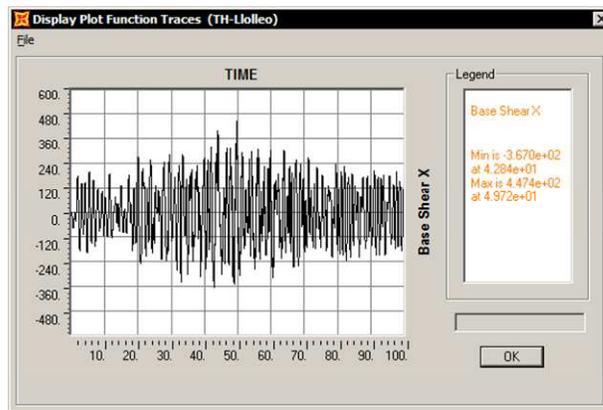
Historia de Respuesta a Nivel Basal

En relación al corte basal para cada uno de los casos en estudio (Análisis Centrado, Análisis Excéntrico y Análisis Optimizado), se obtienen los siguientes resultados.

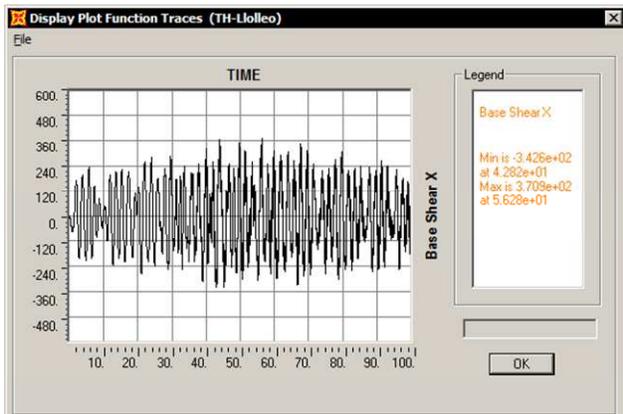
Registro Lolloe - Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

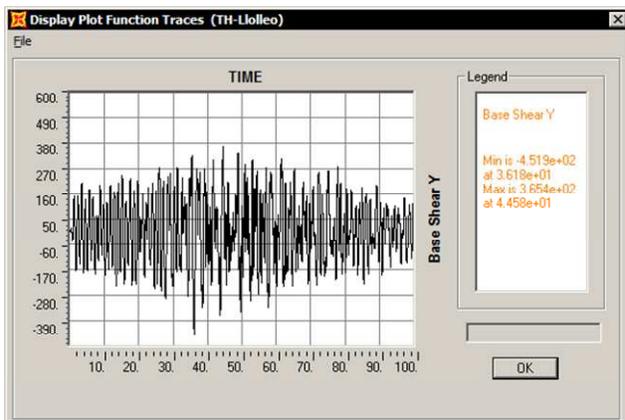


Caso 3: Análisis Optimizado

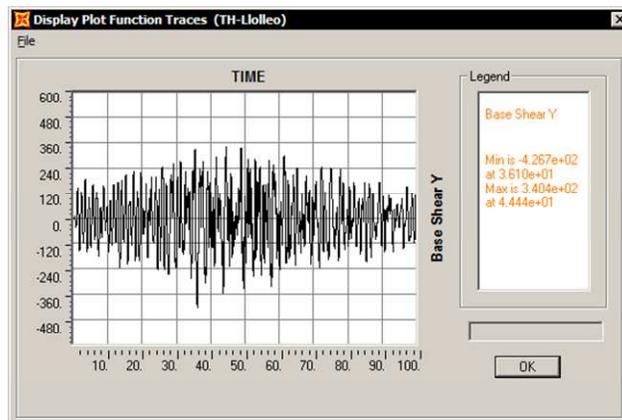
Corte Basal X	Min t	Max t
Análisis Centrado	-372.0	465.0
Análisis Excéntrico	-367.0	447.0
Análisis Optimizado	-343.0	371.0

Figura VII.63: Respuesta de cortes basales, Registro Lolloe Longitudinal

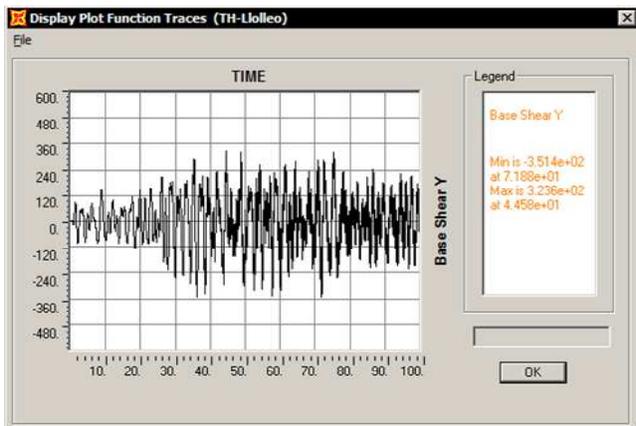
Registro Lolloe - Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



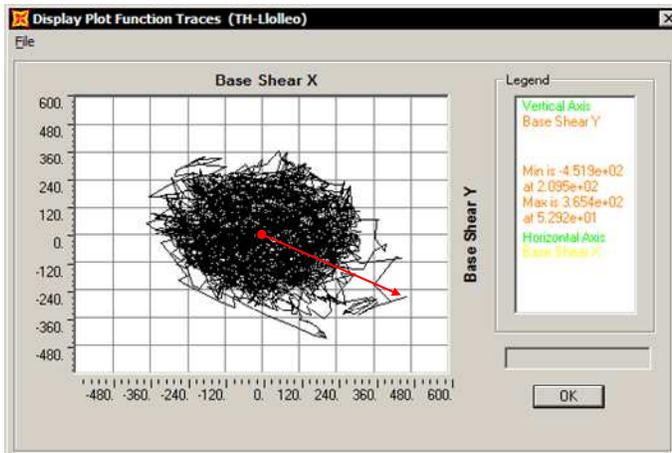
Caso 2: Análisis Excéntrico



Caso 3: Análisis Optimizado

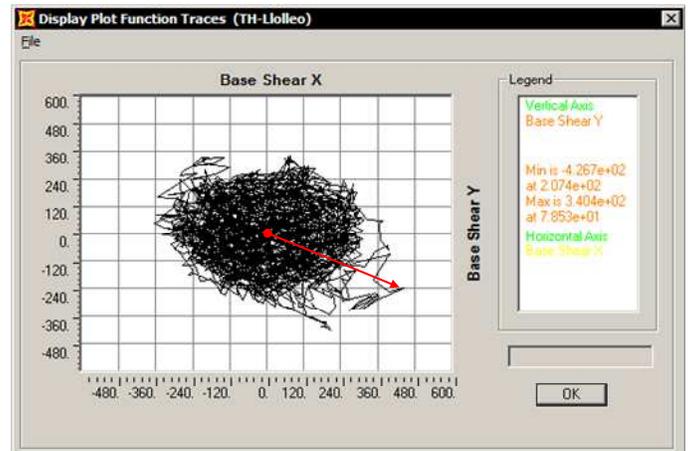
Corte Basal Y	Min t	Max t
Análisis Centrado	-452.0	365.0
Análisis Excéntrico	-427.0	304.0
Análisis Optimizado	-351.0	324.0

Figura VII.64: Respuesta de cortes basales, Registro Lolloe Transversal



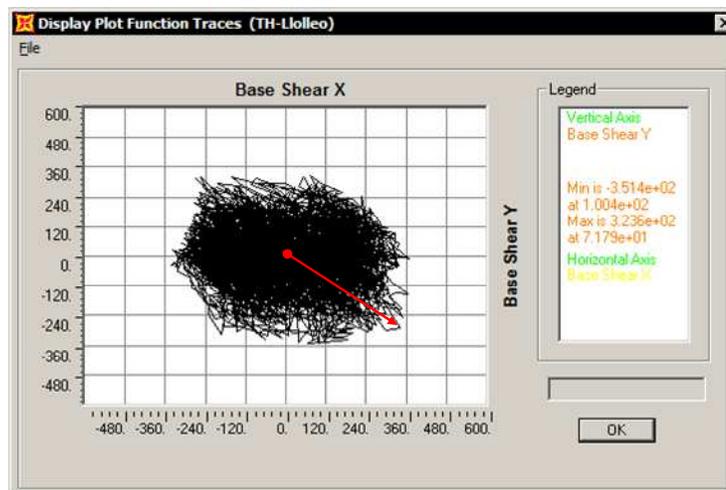
Caso 1: Análisis Centrado

Máximo Corte Compuesto: 524.8 t



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máximo Corte Compuesto: 483.7 t

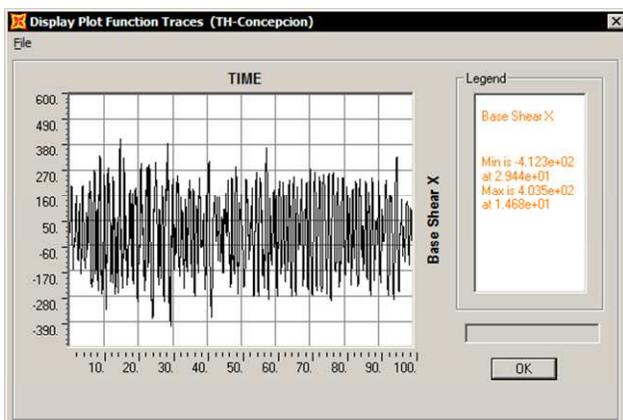


Caso 3: Análisis Optimizado

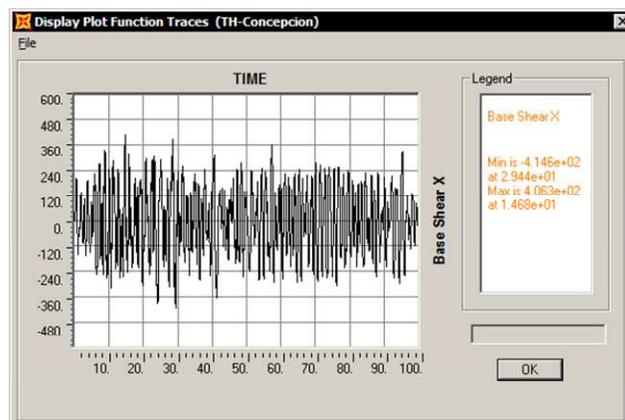
Máximo Corte Compuesto: 446.0 t

Figura VII.65: Máximo Corte Compuesto, Registro Llolleo

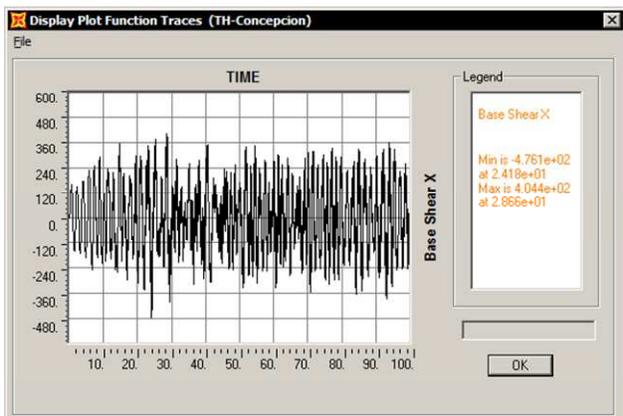
Registro Concepción - Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

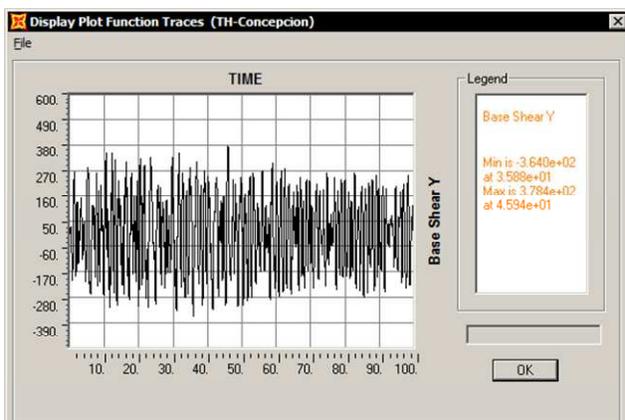


Caso 3: Análisis Optimizado

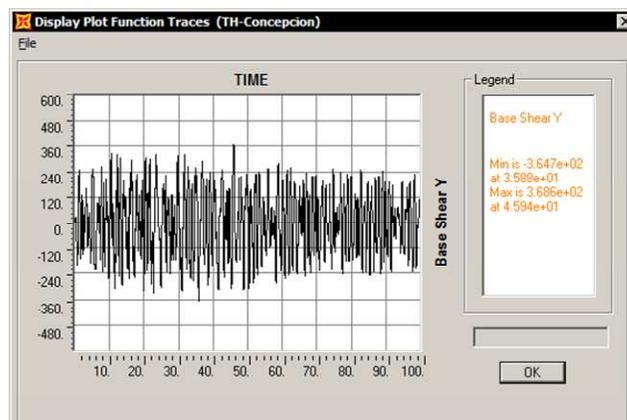
Corte Basal X	Min t	Max t
Análisis Centrado	-412.0	406.0
Análisis Excéntrico	-415.0	406.0
Análisis Optimizado	-476.0	404.0

Figura VII.66: Respuesta de cortes basales, Registro Concepción Longitudinal

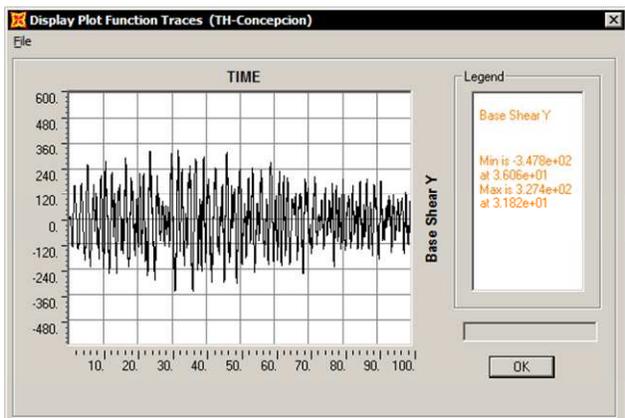
Registro Concepción - Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



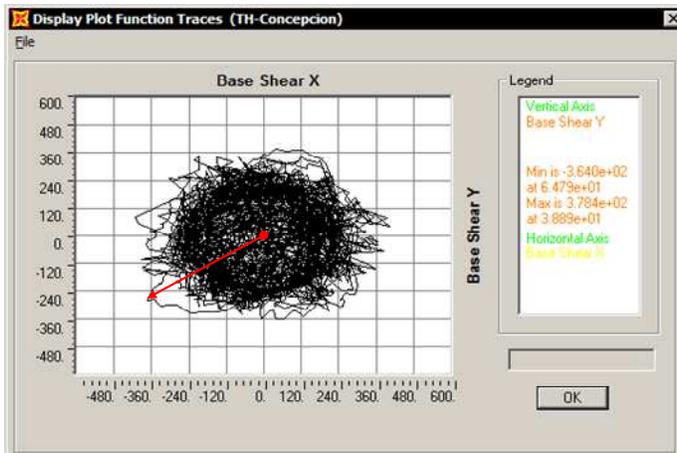
Caso 2: Análisis Excéntrico



Caso 3: Análisis Optimizado

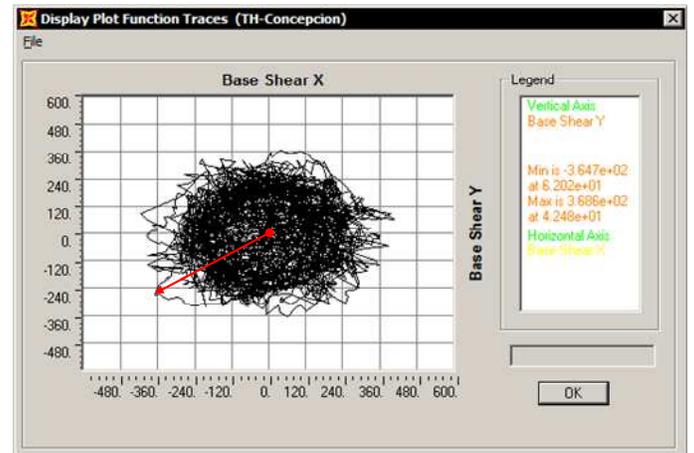
Corte Basal Y	Min t	Max t
Análisis Centrado	-364.0	378.0
Análisis Excéntrico	-365.0	367.0
Análisis Optimizado	-348.0	327.0

Figura VII.67: Respuesta de cortes basales, Registro Concepción Transversal



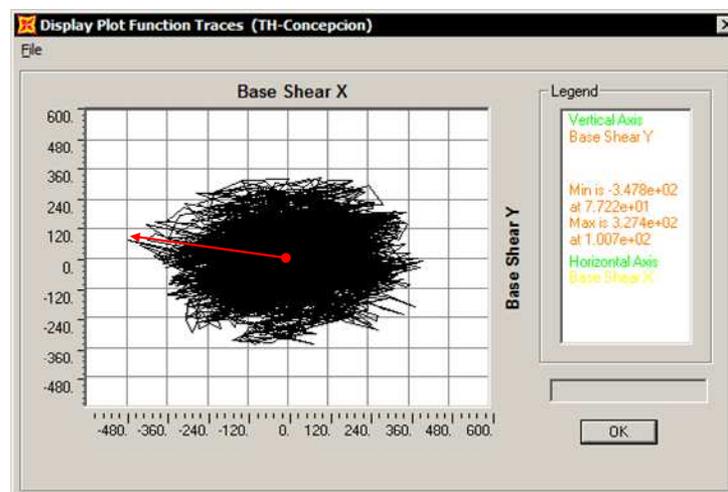
Caso 1: Análisis Centrado

Máximo Corte Compuesto: 450.0 t



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máximo Corte Compuesto: 450.0 t

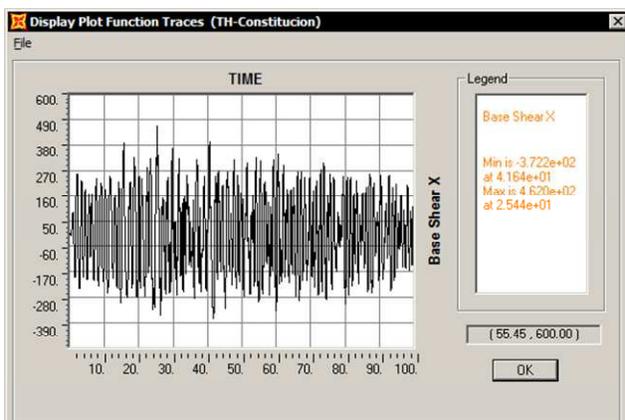


Caso 3: Análisis Optimizado

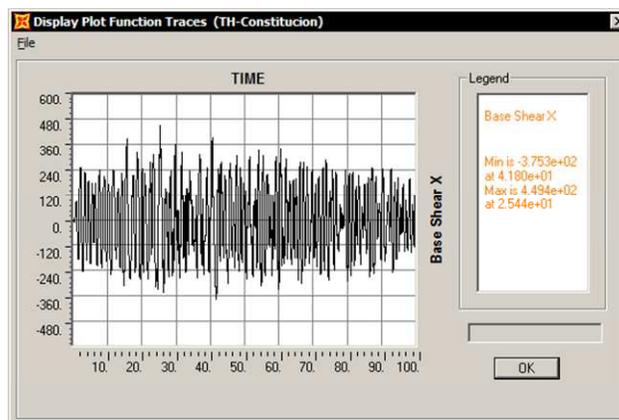
Máximo Corte Compuesto: 483.7 t

Figura VII.68: Máximo Corte Compuesto, Registro Concepción

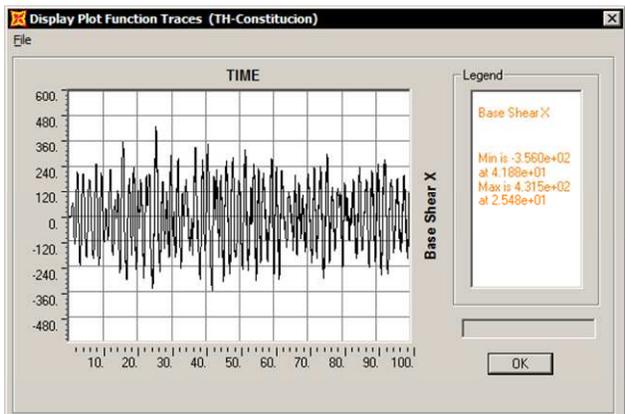
Registro Constitución - Dirección Longitudinal



Caso 1: Análisis Centrado



Caso 2: Análisis Excéntrico

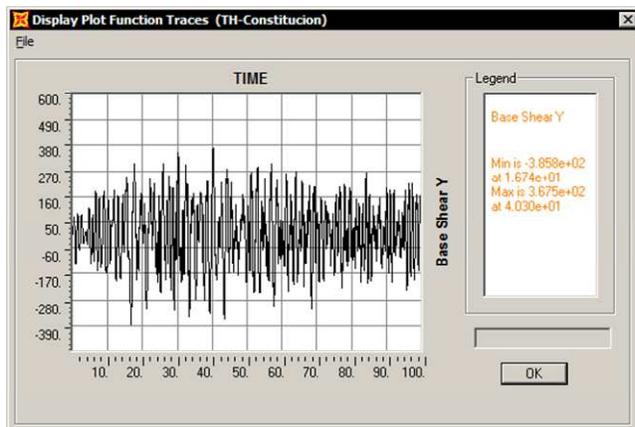


Caso 3: Análisis Optimizado

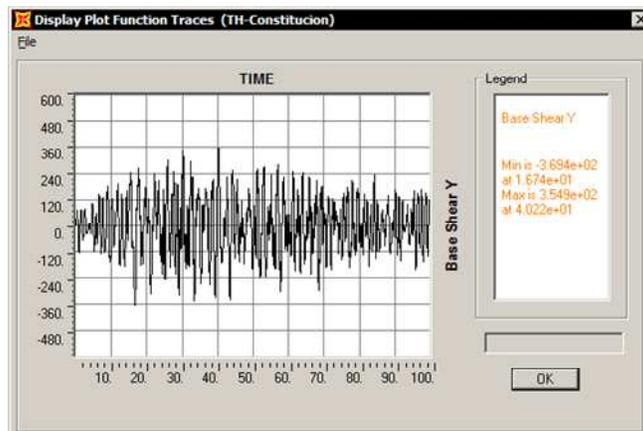
Corte Basal X	Min t	Max t
Análisis Centrado	-372.0	462.0
Análisis Excéntrico	-375.0	449.0
Análisis Optimizado	-356.0	431.0

Figura VII.69: Respuesta de cortes basales, Registro Constitución Longitudinal

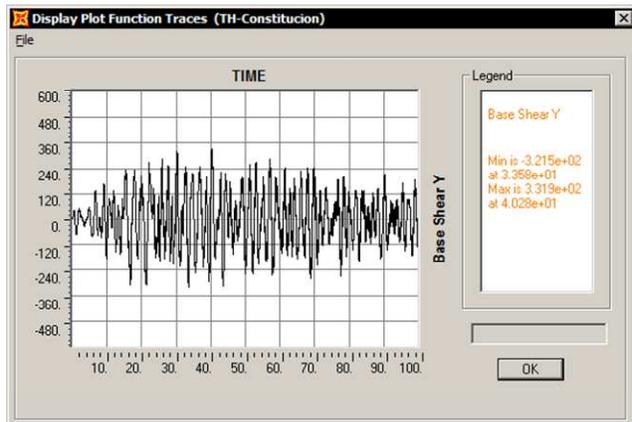
Registro Constitución - Dirección Transversal



Caso 1: Análisis Centrado



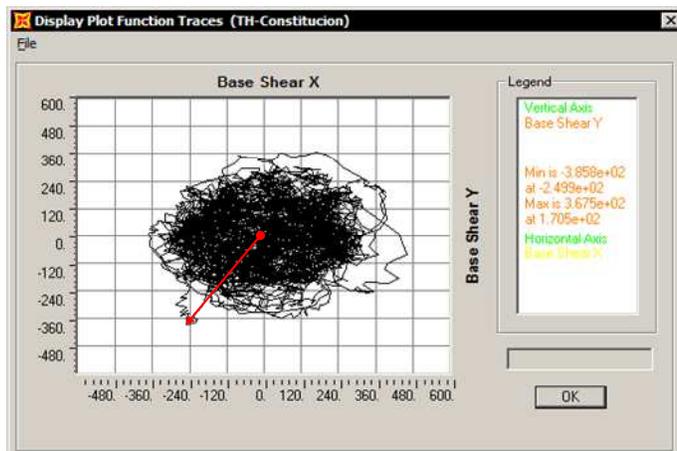
Caso 2: Análisis Excéntrico



Caso 3: Análisis Optimizado

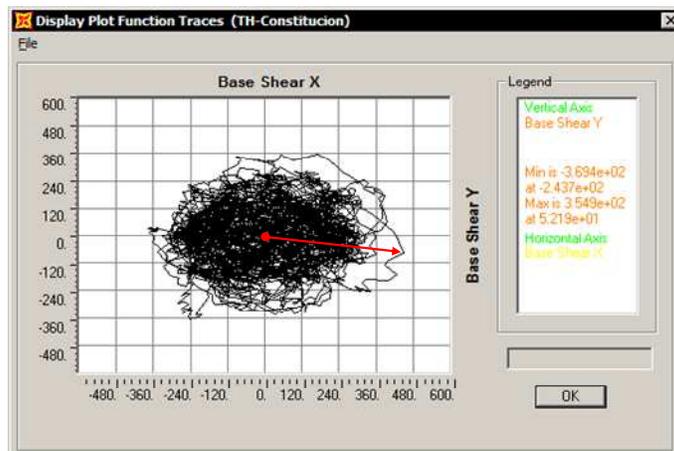
Corte Basal Y	Min t	Max t
Análisis Centrado	-386.0	367.0
Análisis Excéntrico	-369.0	355.0
Análisis Optimizado	-322.0	332.0

Figura VII.70: Respuesta de cortes basales, Registro Constitución Transversal



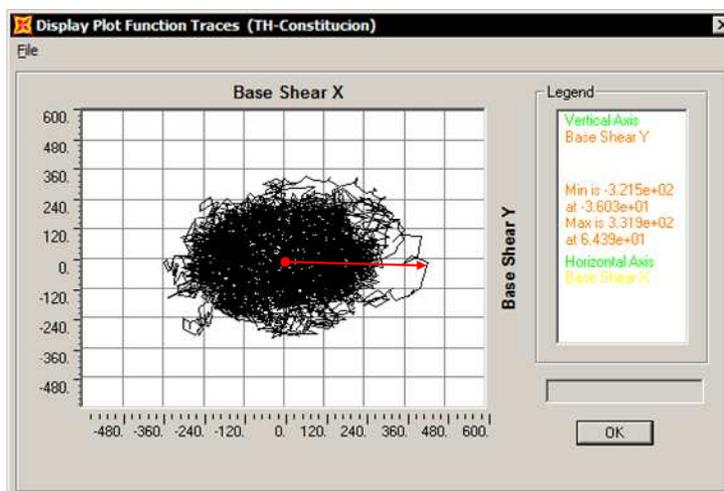
Caso 1: Análisis Centrado

Máximo Corte Compuesto: 457.9 t



Caso 2: Análisis Excéntrico

Máximo Corte Compuesto: 454.0 t



Caso 3: Análisis Optimizado

Máximo Corte Compuesto: 421.1 t

Figura VII.71: Máximo Corte Compuesto, Registro Constitución

De las tablas y figuras anteriores se desprende que a nivel del centroide de la base del conjunto no existen diferencias significativas que puedan cambiar los diseños. Más aún, la sollicitación de corte basal de diseño se reduce levemente en el caso excéntrico. Tal resultado se debe a la pequeña flexibilización (aumento de periodo) que se origina por la excentricidad de la carga solicitante.

No obstante lo anterior, el efecto de la excentricidad de la carga aplicada debe notarse principalmente en la torsión en planta que se genera en la estructura. A continuación se presentan resultados de máximos y mínimos a nivel de centroide de la base de apoyo.

Tabla VII-1: Reacciones Basales Caso Centrado

		FX [t]	FY [t]	FZ [t]	MX [t cm]	MY [t cm]	MZ [t cm]
Llolleo	Max	465	365	2	404688	376705	37
Llolleo	Min	-372	-452	-1	-327816	-322119	-33
Concepción	Max	404	378	2	314885	342582	55
Concepción	Min	-412	-364	-2	-333132	-336437	-55
Constitución	Max	462	368	2	325971	376599	49
Constitución	Min	-372	-386	-2	-344345	-359899	-51
		465	452	2	404688	376705	55

Tabla VII-2: Reacciones Basales Caso Excéntrico

		FX [t]	FY [t]	FZ [t]	MX [t cm]	MY [t cm]	MZ [t cm]
Llolleo	Max	447	340	35	374678	346880	186323
Llolleo	Min	-367	-427	-35	-298939	-294952	-205179
Concepción	Max	406	369	25	346623	358532	193337
Concepción	Min	-415	-365	-23	-367004	-345970	-172497
Constitución	Max	449	355	22	314152	353268	170169
Constitución	Min	-375	-369	-23	-335435	-360365	-148899
		449	427	35	374678	360365	205179

Tabla VII-3: Reacciones Basales Caso Optimizado

		FX [t]	FY [t]	FZ [t]	MX [t cm]	MY [t cm]	MZ [t cm]
Llolleo	Max	371	324	9	297336	301460	156565
Llolleo	Min	-343	-351	-9	-262402	-272359	-133394
Concepción	Max	404	327	13	288707	333430	174005
Concepción	Min	-476	-348	-11	-265752	-363737	-151813
Constitución	Max	431	332	7	266308	348287	152292
Constitución	Min	-356	-321	-7	-284976	-294804	-174598
		476	351	13	297336	363737	174598

Donde:

- FX Corte basal en la dirección longitudinal
FY Corte basal en la dirección transversal
FZ Resultante vertical total
MX Momento volcante originado por el corte basal transversal
MY Momento volcante originado por el corte basal longitudinal
MZ Momento torsional en torno a centroide de la base de la estructura

De las tablas anteriores, las cuales amplían la información de los gráficos incorporando momentos volcantes y torsionales globales, se desprende que los volcantes de la estructura no presentan mayores cambios entre la condición centrada, excéntrica y optimizada. Sin embargo, y como era de esperarse, la torsión en planta presenta un aumento significativo en el caso excéntrico y optimizado.

Este efecto torsional es la justificación del aumento de deformaciones en el aislador número 8 y la disminución de las mismas en el aislador número 5.

Carga de Diseño en Aisladores

Tabla VII-4: Compresiones de Diseño Caso Excéntrico

		Caso Excéntrico					
Grupo	Aislador	P_{A1} t	P_{max Ax} t	P_{min Ax} t	P_{max Ay} t	P_{min Ay} t	
1	7	934	859	526	831	554	
2	8	531	669	358	616	411	
3	3-11	561	532	319	547	304	
4	4-12	198	306	139	302	143	
		P _{min} en toda la planta en aisladores			63	t	1-9

Tabla VII-5: Compresiones de Diseño Caso Optimizado

		Caso Optimizado					
Grupo	Aislador	P_{A1} t	P_{max Ax} t	P_{min Ax} t	P_{max Ay} t	P_{min Ay} t	
1	7	940	858	538	838	558	
2	8	532	666	373	624	416	
3	3-11	559	522	327	538	311	
4	4-12	197	287	148	283	152	
		P _{min} en toda la planta en aisladores			67	t	1-9

Tabla VII-6: Deformaciones de Diseño

Grupo	Aislador	Caso Excéntrico		Caso Optimizado	
		$d_{\max Ax}$	$d_{\max Ay}$	$d_{\max Ax}$	$d_{\max Ay}$
		cm	cm	cm	cm
1	7	17.8	18.0	18.2	18.2
2	8	17.9	20.1	18.0	19.9
3	3-11	17.8	18.3	17.9	18.0
4	4-12	17.9	20.4	18.2	20.2

En estas últimas tablas puede verse que a nivel de cada dispositivo las variables que definen su diseño no han tenido cambios significativos, aun cuando cada uno de los dispositivos en sí mismo ha variado sus propiedades fuertemente.

Lo anterior se explica por el hecho que los dispositivos trabajan en conjunto, acoplados por el sistema de apoyo rígido bajo y sobre ellos, situación que los transforma en un sistema en el que las propiedades de cada dispositivo dejan de ser relevantes por si solas. En el caso estudiado, las propiedades de la base original en relación a la base propuesta han resultado muy parecidas (en razón de los resultados obtenidos) aun cuando los dispositivos por si solos son notablemente diferentes.

En consideración a la variación despreciable entre las condiciones originales y finales para el diseño de cada dispositivo, se validan los aisladores propuestos declarando que cumplen.

VIII ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra un análisis comparativo, a modo de resumen de los distintos análisis descritos en los capítulos anteriores, es decir, Análisis Centrado (Caso 1), Análisis Excéntrico (Caso 2), y Análisis Optimizado (Caso 3).

VIII.1 Análisis Elásticos Linealizados.

Corte basal de diseño

En la siguiente tabla se muestra el corte basal de diseño obtenido tanto para la condición de carga centrada como para la condición de carga excéntrica. Además se indica la diferencia porcentual obtenida para el Caso 2 con respecto al análisis centrado.

Tabla VIII-1: Corte Basal de Diseño (t)

Dirección	Condición de Carga		Porcentaje Variación
	Caso 1	Caso 2	
Longitudinal	561,0	553,0	-1,4
Transversal	561,0	529,2	-5,7

Como se puede ver en la tabla anterior los valores resultantes no conducen a grandes variaciones.

Comparación Aisladores Análisis Centrado versus Análisis Optimizado

A continuación se muestra de manera porcentual la reducción obtenida de material (goma y plomo) para el caso del uso de diferentes aisladores con respecto a la disposición original que considera un solo tipo de aislador (Caso 1 y 2).

Tabla VIII-2: Volumen materiales aisladores (cm³)

Volumen	Disposición Aisladores		Porcentaje Variación
	Caso 1 y 2	Caso 3	
Goma	3317522	1777387	-46,4
Plomo	102000	90666	-11,1

Como se puede ver en la siguiente tabla, a pesar de las notorias diferencias entre los dispositivos utilizados en los dos análisis (Caso 1-2 y Caso 3), las características totales de las bases resultan similares. Desde el punto de vista de las respuestas, ambos sistemas se encuentran en la zona de desplazamientos constantes del espectro de diseño por lo que se deben obtener deformaciones bastante similares. Sin embargo, a nivel de cada aislador, y debido a las diferencias de rigidez individual, las fuerzas que desarrolla cada dispositivo resultan diferentes.

Tabla VIII-3: Resumen Parámetros de diseño base aislada Caso 1-2 y Caso 3

Parámetro de Diseño	Notación	Unidad	Valores	
			Caso 1-2	Caso 3
Desplazamiento de diseño	D_d	cm	20,3	20,3
Fluencia en corte del plomo	t_{yp}	kgf/cm ²	100,0	100,0
Capacidad de la base a def. cero	Q	tf	212,1	188,5
Rigidez al corte postfluencia	$k_p(k_2)$	tf/cm	19,560	14,010
Rigidez al corte inicial	$k_i(k_1)$	tf/cm	195,600	140,100
Rigidez al corte efectiva	k_{eff}	tf/cm	30,006	23,295
Desplazamiento de fluencia	D_y	cm	1,20	1,49
Fuerza de fluencia	F_y	tf	235,6	209,4
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}		0,21	0,24

Corte basal de diseño Caso 3

En la siguiente tabla se muestran los cortes basales obtenidos considerando la disposición de aisladores optimizada. Además se indica la diferencia porcentual de los valores obtenidos para este caso en comparación con el análisis centrado.

Tabla VIII-4: Corte Basal de Diseño (t)

Dirección	Disposición Aisladores		Porcentaje Variación
	Caso 1	Caso 3	
Longitudinal	553,0	420,1	-24,0
Transversal	529,2	402,6	-23,9

Como se puede ver en la tabla los valores obtenidos en el Caso 3 son menores que los resultantes en el Caso 1, por otra parte, como se menciona anteriormente, para la disposición de aisladores optimizada, se obtienen cortes basales menores que el mínimo indicado por la normativa nacional, sin embargo, a pesar de lo anterior para el diseño se considera el valor correspondiente al diseño elástico ($R = 1$).

Deformaciones Sísmicas Caso 3

En las siguientes tablas se muestran las deformaciones promedio obtenidas tanto en la interfaz de los aisladores, como a nivel de techo de los silos, para las dos situaciones de análisis. Además se muestra la diferencia porcentual entre los resultados obtenidos para la disposición optimizada de los aisladores con respecto a la situación original.

Tabla VIII-5: Deformación Interfaz Aisladores

Dirección	Disposición Aisladores		Porcentaje Variación
	Caso 1	Caso 3	
Longitudinal	18,4	18,5	0,8
Transversal	18,1	18,5	2,5

Tabla VIII-6: Deformación Nivel de Techo Silos

Dirección	Disposición Aisladores		Porcentaje
	Caso 1	Caso 3	Variación
Longitudinal	18,4	18,6	0,6
Transversal	17,9	18,2	1,6

En la tabla se puede observar que las deformaciones elásticas esperadas crecen de manera muy leve en relación al sistema original, que considera un solo tipo de aislador.

VIII.2 Análisis Tiempo historia, Comparación entre Casos 1 y 2.

De acuerdo con lo indicado en los capítulos anteriores, en general, se puede observar en cada una de las historias de respuestas consideradas que las exigencias en relación a los modelos linealizados disminuyen considerablemente. Es decir, los desplazamientos de diseño de los aisladores, y consistentemente los esfuerzos asociados, resultan notoriamente menores al considerar los registros artificiales que se han descrito y validado en el presente trabajo.

Cabe mencionar que debido a que se trata de pares de registros (correspondientes a las dos direcciones horizontales de análisis) resulta muy importante explorar la respuesta compuesta por ambas direcciones principales solicitadas ya que los máximos en cada dirección no cuentan con una sollicitación nula en la otra dirección. A continuación se muestran los resultados obtenidos tanto para las direcciones longitudinal y transversal, como para la sollicitación compuesta. Al igual que para los análisis linealizados, también se muestra la variación porcentual presente entre la condición de carga centrada y excéntrica.

Esfuerzo de Corte Aisladores

En las siguientes tablas se muestra el corte obtenido para los aisladores de control N°5 y N°8, tanto para la condición de carga centrada, como para la condición de carga excéntrica para cada uno de los registros considerados en el análisis.

Tabla VIII-7: Corte Basal de Diseño, Aislador N°5

Condición Carga	Dirección	Esfuerzo de Corte (t)			
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo
Caso 1	Longitudinal	34,6	32,1	35,2	35,2
Caso 2	Longitudinal	34,5	32,3	34,7	34,7
Caso 1	Transversal	38,8	32,8	31,8	38,8
Caso 2	Transversal	34,9	30,9	29,8	34,9

Tabla VIII-8: Corte Basal de Diseño, Aislador N°8

Condición Carga	Dirección	Esfuerzo de Corte (t)			
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo
Caso 1	Longitudinal	34,1	32,1	35,2	35,2
Caso 2	Longitudinal	32,3	32,3	35,3	35,3
Caso 1	Transversal	38,8	32,8	31,8	38,8
Caso 2	Transversal	41,9	33,7	35,9	41,9

De acuerdo con los resultados anteriores, para el diseño que considera una condición de carga excéntrica se obtienen las siguientes diferencias porcentuales en relación con el diseño que considera carga centrada.

Tabla VIII-9: Diferencia Porcentual Corte Basal de Diseño

Registro	Aislador N°5		Aislador N°8	
	Dir. Long.	Dir. Trans.	Dir. Long.	Dir. Trans.
Llolleo	0,3	10,1	5,3	-8,0
Concepción	-0,6	5,8	-0,6	-2,7
Constitución	1,4	6,3	-0,3	-12,9

Deformaciones en aisladores

En relación con las deformaciones de corte presentes en los aisladores de control, los resultados obtenidos para cada uno de los casos de análisis y para cada uno de los registros considerados son mostrados en las siguientes tablas.

Tabla VIII-10: Deformación Aislador N°5

Condición Carga	Dirección	Deformación de Corte (cm)			
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo
Caso 1	Longitudinal	11,5	10,8	11,4	11,5
Caso 2	Longitudinal	11,4	11,0	11,4	11,4
Caso 1	Transversal	14,4	10,3	10,9	14,4
Caso 2	Transversal	12,4	8,5	8,0	12,4
Caso 1	Compuesta	15,2	13,0	14,9	15,2
Caso 2	Compuesta	14,1	13,9	12,8	14,1

Tabla VIII-11: Deformación Aislador N°8

Condición Carga	Dirección	Deformación de Corte (cm)			
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo
Caso 1	Longitudinal	11,5	10,8	11,4	11,5
Caso 2	Longitudinal	11,3	11,0	11,4	11,4
Caso 1	Transversal	14,4	10,2	10,9	14,4
Caso 2	Transversal	15,2	12,1	13,5	15,2
Caso 1	Compuesta	15,6	13,0	14,9	15,6
Caso 2	Compuesta	16,3	13,6	17,2	17,2

Tabla VIII-12: Diferencia Porcentual Deformación Aisladores

Registro	Aislador N°5			Aislador N°8		
	Dir. Long.	Dir. Trans.	Dir. Comp.	Dir. Long.	Dir. Trans.	Dir. Comp.
Llolleo	-0,9	-13,9	-7,2	-1,7	5,6	4,6
Concepción	1,9	-17,5	6,8	1,9	18,6	4,3
Constitución	0,0	-26,6	-13,9	0,0	23,9	15,7

Reacciones Basales

En la siguiente tabla se muestran las reacciones basales obtenidas en cada dirección de análisis, para cada uno de los registros. Por otra parte se indica la diferencia porcentual entre ambas condiciones de carga, con respecto a la de carga centrada.

Tabla VIII-13: Reacciones Basales (ton)

Condición Carga	Dirección	Registro Artificial			Valor Máx.	Variación Porcentual
		Llolleo	Concep.	Const.		
Caso 1	Longitudinal	465,0	412,0	462,0	465,0	-3,4
Caso 2	Longitudinal	447,0	415,0	449,0	449,0	
Caso 1	Transversal	452,0	378,0	386,0	452,0	-5,5
Caso 2	Transversal	427,0	367,0	369,0	427,0	
Caso 1	Compuesta	524,8	450,0	457,9	524,8	-7,8
Caso 2	Compuesta	483,7	450,0	454,0	483,7	

De la tabla anterior se desprende que a nivel de centroide de la base del conjunto no existen diferencias que deban considerarse en el diseño. Más aún, la solicitación de corte basal de diseño se reduce levemente en el caso excéntrico. Tal resultado se debe a la pequeña flexibilización (aumento de período) que se origina por la excentricidad de la carga solicitante. No obstante lo anterior, el efecto de la excentricidad de la carga aplicada debe notarse principalmente en la torsión en planta que se genera en la estructura. Debido a esto a continuación se presentan resultados de máximos y mínimos a nivel de centroide de la base de apoyo.

Tabla VIII-14: Momentos Volcantes en la base

Tiempo Historia		Caso 1			Caso 2		
		MX Tonf-cm	MY Tonf-cm	MZ Tonf-cm	MX Tonf-cm	MY Tonf-cm	MZ Tonf-cm
Llolleo	Máx.	404688	376705	37	374678	346880	186323
	Mín.	-327816	-322119	-33	-298939	-294952	-205179
Concepción	Máx.	314885	342582	55	346623	358532	193337
	Mín.	-333132	-336437	-55	-367004	-345970	-172497
Constitución	Máx.	325971	376599	49	314152	353268	170169
	Mín.	-344345	-359899	-51	-335435	-360365	-148899

Dónde:

MX Momento volcante originado por el corte basal transversal.

MY Momento volcante originado por el corte basal longitudinal.

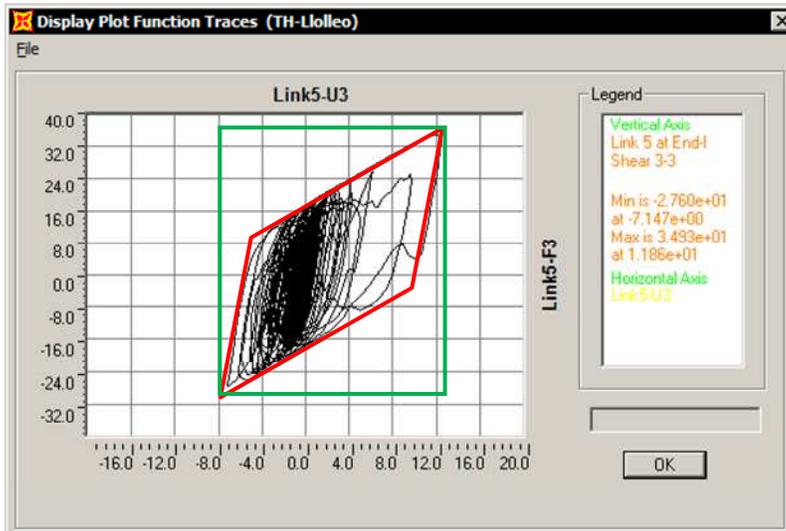
MZ Momento torsional en torno al centroide de la base de la estructura.

De las tablas anteriores, las cuales amplían la información incorporando momentos, se desprende que ambos momentos volcantes de la estructura no presentan mayores cambios entre la condición centrada y excéntrica. Sin embargo, y como era de esperarse, la torsión en planta presenta un aumento significativo en el caso excéntrico.

Este efecto torsional es la justificación del aumento de deformaciones en el aislador número 8 y la disminución de las mismas en el aislador número 5.

Amortiguamientos Aproximados Caso 2

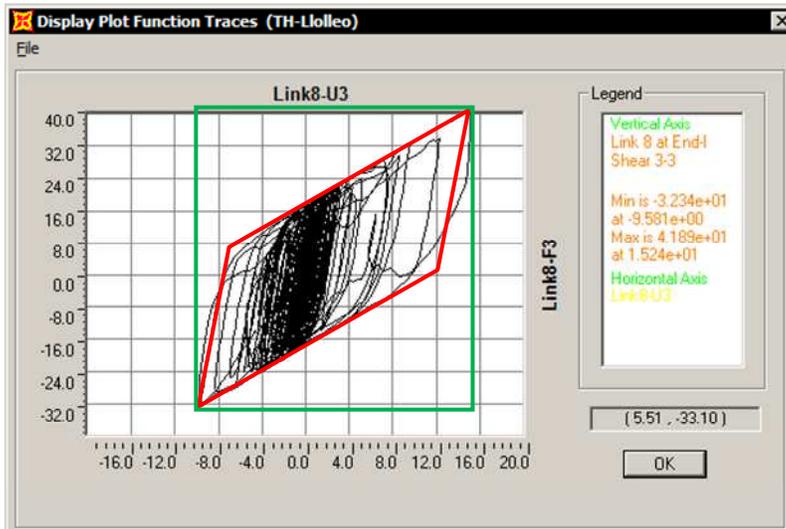
En los siguientes gráficos se puede observar que los ciclos de histéresis presentan niveles de disipación de energía importantes. Para el cálculo de los amortiguamientos aproximados para los aisladores de control se considera el registro de Llolleo.



$$\xi = \frac{4}{2\pi} \cdot \frac{\text{área histeresis}}{\text{área rec. envolvente}}$$

$$\xi \approx 29\%$$

Figura VIII.1: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Lolloe, Aislador N°5, Caso 2.



$$\xi = \frac{4}{2\pi} \cdot \frac{\text{área histeresis}}{\text{área rec. envolvente}}$$

$$\xi \approx 27.4\%$$

Figura VIII.2: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Lolloe, Aislador N°8, Caso 2.

Claramente los registros utilizados se ajustan de buena forma a la exigencia incorporada en el caso linealizado. Es decir, puede asumirse que en ambos casos la sollicitación hacia la estructura es similar. Por lo anterior, y en razón de las gráficas esfuerzo-deformación de los aisladores, las diferencias de respuesta a nivel de diseño

pueden atribuirse a la diferencia en el amortiguamiento equivalente que se considera en la condición linealizada.

Considerando estos resultados se puede decir que para efectos de diseño el método de la linealización equivalente resulta suficientemente conservador y por lo tanto es aceptable frente a los análisis inelásticos de tipo Tiempo Historia.

Desplazamientos máximos compuestos y fuerzas correspondientes

En las tablas siguientes se muestra en forma resumida el comportamiento compuesto experimentado por el Aislador N°8 ante los pares de registros considerados.

Tabla VIII-15: Desplazamiento máximo Aislador N°8

Registro Artificial	T seg	U2 cm	U3 cm	U cm	ángulo °
Llolleo	49,76	-11,2	12,1	16,5	-47,3
Concepción	25,04	-6,5	12,1	13,7	-61,9
Constitución	40,64	-10,9	-13,5	17,3	51,0

Tabla VIII-16: Fuerza resultante Aislador N°8

Registro Artificial	T seg	F2 ton	F3 ton	F ton	ángulo °
Llolleo	-31,3	30,0	43,3	-43,8	-47,3
Concepción	25,04	-23,5	31,6	39,4	-53,4
Constitución	40,64	-35,3	-23,7	42,5	33,9

Las tablas anteriores muestran el desplazamiento máximo experimentado por el aislador y el instante en que este se produce. Conjuntamente se entrega la fuerza resultante en el aislador para el mismo instante de tiempo. Cabe mencionar que la dirección del desplazamiento en relación al centro no coincide con la dirección de la fuerza en el instante considerado.

Por otra parte, en la siguiente tabla se puede ver que el valor de las fuerzas compuestas instantáneas experimentadas por el dispositivo resulta levemente menor que aquellas que corresponden al desplazamiento en cuestión, de acuerdo a la curva esqueleto del dispositivo.

Tabla VIII-17: Fuerzas instantáneas v/s Fuerzas esperadas

Registro Artificial	U cm	F(U) ton	$\beta(U)$ %	ΔF %
Llolleo	16,5	44,7	23,0	-3,0
Concepción	13,7	40,0	26,0	-1,5
Constitución	17,3	46,0	23,0	-7,5

Dónde:

- U2 Desplazamiento máximo en dirección longitudinal experimentado en el tiempo.
- U3 Desplazamiento máximo en dirección transversal experimentado en el tiempo.
- U Desplazamiento compuesto máximo experimentado en el tiempo.
- F2 Fuerza en dirección longitudinal.
- F3 Fuerza en dirección transversal.
- F Fuerza compuesta en el momento en que se produce el desplazamiento U.
- F(U) Fuerza esperada de acuerdo a la curva esqueleto del aislador para el desplazamiento U.
- $\beta(U)$ Amortiguamiento esperado de acuerdo a la curva esqueleto del aislador para el desplazamiento U.
- ΔF Diferencia porcentual entre F y F(U), en relación a F(U).

Aunque el amortiguamiento equivalente asociado a los desplazamientos compuestos resulta menor que aquel asociado a cada dirección principal por separado, este es levemente mayor que aquel definido en los modelos linealizados.

VIII.3 Análisis Tiempo historia, comparación entre Casos 2 y 3

Esfuerzo de Corte Aisladores

En las siguientes tablas se muestra el corte obtenido para los aisladores de control N°5 y N°8, para los análisis correspondientes a los Casos 2 y 3.

Tabla VIII-18: Corte Basal de Diseño, Aislador N°5

Análisis	Dirección	Esfuerzo de Corte (ton)			
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo
Caso 3	Longitudinal	41,5	43,9	45,3	45,3
Caso 2	Longitudinal	34,5	32,3	34,7	34,7
Caso 3	Transversal	42,3	42,1	43,7	43,7
Caso 2	Transversal	34,9	30,9	29,8	34,9

Tabla VIII-19: Corte Basal de Diseño, Aislador N°8

Análisis	Dirección	Esfuerzo de Corte (ton)			
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo
Caso 3	Longitudinal	42,2	44,4	45,6	45,6
Caso 2	Longitudinal	32,3	32,3	35,3	35,3
Caso 3	Transversal	44,4	45,0	41,7	45,0
Caso 2	Transversal	41,9	33,7	35,9	41,9

Tabla VIII-20: Diferencia Porcentual Corte Basal de Diseño con respecto al Caso 2

Registro	Aislador N°5		Aislador N°8	
	Dir. Long.	Dir. Trans.	Dir. Long.	Dir. Trans.
Llolleo	20,3	21,2	30,7	6,0
Concepción	35,9	36,2	37,5	33,5
Constitución	30,5	46,6	29,2	16,2

Como se puede ver en la tabla anterior, la diferencia a nivel de esfuerzo de corte de diseño en un aislador entre la situación original y la optimizada es considerable. Sin embargo esto es consistente con la diferencia de rigidez de los dispositivos y la similitud de los desplazamientos.

Deformaciones en aisladores

En relación con las deformaciones de corte presentes en los aisladores de control, los resultados obtenidos en cada uno de los Casos para cada registro, son mostrados en las siguientes tablas.

Tabla VIII-21: Deformación Aislador N°5

Análisis	Dirección	Deformación de Corte (cm)				Diferencia Porcentual
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo	
Caso 3	Longitudinal	12,1	14,0	16,4	16,4	43,9
Caso 2	Longitudinal	11,4	11,0	11,4	11,4	
Caso 3	Transversal	13,9	11,0	13,7	13,9	12,1
Caso 2	Transversal	12,4	8,5	8,0	12,4	
Caso 3	Compuesta	16,1	14,1	16,0	16,1	14,0
Caso 2	Compuesta	14,1	13,9	12,8	14,1	

Tabla VIII-22: Deformación Aislador N°8

Análisis	Dirección	Deformación de Corte (cm)				Diferencia Porcentual
		Llolleo	Concepción	Constitución	Máximo	
Caso 3	Longitudinal	12,1	13,9	16,4	16,4	43,9
Caso 2	Longitudinal	11,3	11,0	11,4	11,4	
Caso 3	Transversal	14,8	13,7	15,7	15,7	3,3
Caso 2	Transversal	15,2	12,1	13,5	15,2	
Caso 3	Compuesta	15,6	17,8	18,6	18,6	8,1
Caso 2	Compuesta	16,3	13,6	17,2	17,2	

Reacciones Basales

En la siguiente tabla se muestran las reacciones basales obtenidas en cada dirección de análisis, para cada uno de los registros. Por otra parte se indica la diferencia porcentual obtenida entre los Casos 2 y 3 con respecto al Caso 2.

Tabla VIII-23: Reacciones Basales (ton)

Análisis	Dirección	Registro Artificial			Valor Máx.	Variación Porcentual
		Llolleo	Concep.	Const.		
Caso 3	Longitudinal	371,0	476,0	431,0	476,0	6,0
Caso 2	Longitudinal	447,0	415,0	449,0	449,0	
Caso 3	Transversal	351,0	348,0	332,0	351,0	-17,8
Caso 2	Transversal	427,0	367,0	369,0	427,0	
Caso 3	Compuesta	446,0	483,7	421,1	483,7	0,0
Caso 2	Compuesta	483,7	450,0	454,0	483,7	

De la tabla anterior se desprende que a nivel de centroide de la base del conjunto no existen diferencias que deban considerarse en el diseño.

No obstante lo anterior, el efecto de la excentricidad de la carga aplicada debe notarse principalmente en la torsión en planta que se genera en la estructura. A continuación se presentan resultados de máximos y mínimos a nivel de centroide de la base de apoyo.

Tabla VIII-24: Momentos Volcantes en la base

		Caso 2			Caso 3		
Tiempo		MX	MY	MZ	MX	MY	MZ
Historia		Tonf-cm	Tonf-cm	Tonf-cm	Tonf-cm	Tonf-cm	Tonf-cm
Llolleo	Máx.	374678	346880	186323	297336	301460	156565
	Mín.	-298939	-294952	-205179	-262402	-272359	-133394
Concepción	Máx.	346623	358532	193337	288707	333430	174005
	Mín.	-367004	-345970	-172497	-265752	-363737	-151813
Constitución	Máx.	314152	353268	170169	266308	348287	152292
	Mín.	-335435	-360365	-148899	-284976	-294804	-174598

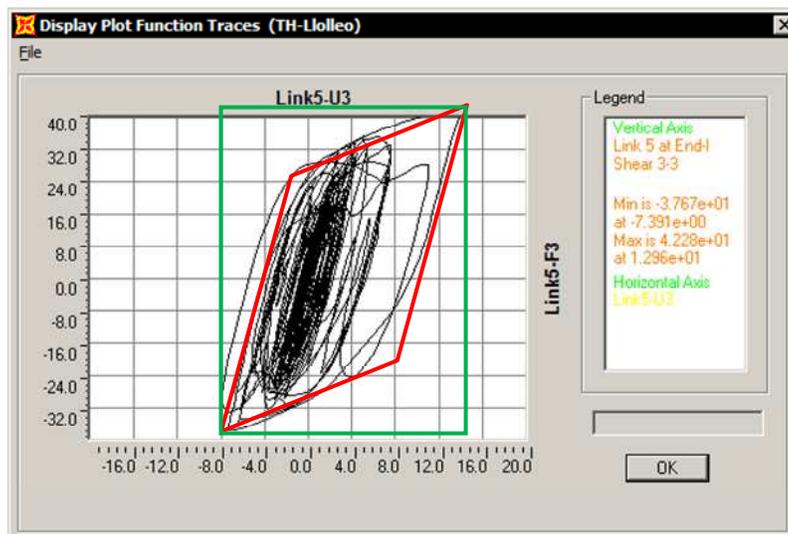
Tabla VIII-25: Diferencia Porcentual Momentos con respecto al Caso 2

Tiempo		GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Historia		Tonf-cm	Tonf-cm	Tonf-cm
Llolleo	Máx.	-20,6	-13,1	-16,0
	Mín.	-12,2	-7,7	-35,0
Concepción	Máx.	-16,7	-7,0	-10,0
	Mín.	-27,6	5,1	-12,0
Constitución	Máx.	-15,2	-1,4	-10,5
	Mín.	-15,0	-18,2	17,3

De las tablas anteriores, las cuales amplían la información incorporando momentos, se desprende que ambos volcantes y torsión de la estructura no presentan aumentos en relación a la situación correspondiente al Caso 2, por el contrario, se producen algunas disminuciones.

Amortiguamientos Aproximados

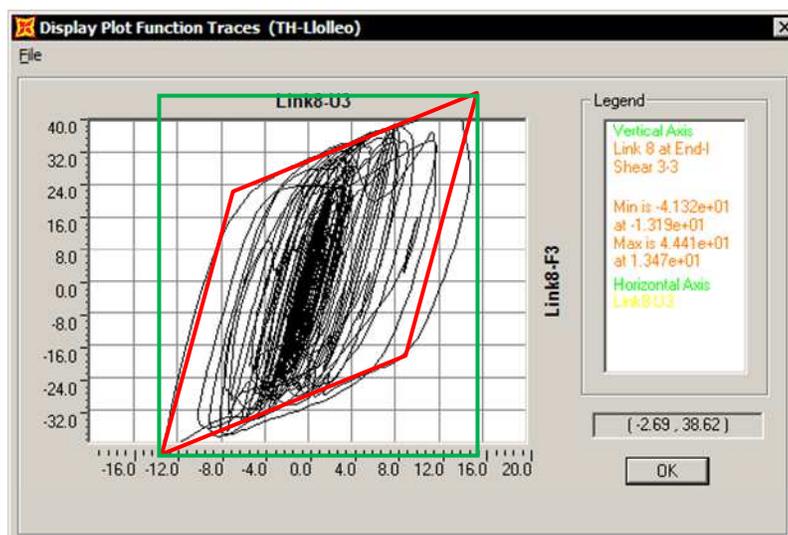
En los siguientes gráficos se puede observar que los ciclos de histéresis presentan niveles de disipación de energía importantes. Para el cálculo de los amortiguamientos aproximados en el Caso 3, para los aisladores de control se considera el registro de Lolloe.



$$\xi = \frac{4}{2\pi} \cdot \frac{\text{área histeresis}}{\text{área rec. envolvente}}$$

$$\xi \approx 37.9\%$$

Figura VIII.3: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Lolloe, Aislador N°5, Caso 3.



$$\xi = \frac{4}{2\pi} \cdot \frac{\text{área histeresis}}{\text{área rec. envolvente}}$$

$$\xi \approx 35\%$$

Figura VIII.4: Determinación de Amortiguamiento Aproximado, Registro Lolloe, Aislador N°8, Caso 3.

En la siguiente tabla se muestra la diferencia de los valores de amortiguamiento obtenidos para el Caso 3 con respecto al Caso 2 de análisis.

Tabla VIII-26: Comparación Amortiguamiento

Aislador	Amortiguamiento ξ (%)		
	Caso 3	Caso 2	Dif. Porcentual
N°5	37,9	29,0	30,7
N°8	35,0	27,4	27,7

Cargas de diseño aisladores

En las siguientes tablas se pueden ver las solicitaciones y deformaciones de diseño para cada grupo de aisladores obtenidas para los análisis correspondientes a los Casos 2 y 3.

Tabla VIII-27: Compresiones de Diseño

Grupo	Aislador	Caso 2			Caso 3			Diferencia Porcentual		
		P_{A1}	$P_{m\acute{a}x Ax}$	$P_{m\acute{i}n Ax}$	P_{A1}	$P_{m\acute{a}x Ax}$	$P_{m\acute{i}n Ax}$	P_{A1}	$P_{m\acute{a}x Ax}$	$P_{m\acute{i}n Ax}$
		ton	ton	ton	ton	ton	ton			
1	7	934	859	526	940	858	538	0,6	-0,1	2,3
2	8	531	669	358	532	666	373	0,2	-0,4	4,2
3	3-11	561	532	319	559	522	327	-0,4	-1,9	2,5
4	4-12	198	306	139	197	287	148	-0,5	-6,2	6,5

Tabla VIII-28: Compresiones de Diseño

Grupo	Aislador	Caso 2		Caso 3		Dif. Porcentual	
		$P_{\text{máx Ay}}$	$P_{\text{mín Ay}}$	$P_{\text{máx Ay}}$	$P_{\text{mín Ay}}$	$P_{\text{máx Ay}}$	$P_{\text{mín Ay}}$
		ton	ton	ton	ton		
1	7	831	554	838	558	0,8	0,7
2	8	616	411	624	416	1,3	1,2
3	3-11	547	304	538	311	-1,6	2,3
4	4-12	302	143	283	152	-6,3	6,3

Tabla VIII-29: Deformaciones de diseño

Grupo	Aislador	Caso 2		Caso 3		Dif. Porcentual	
		$d_{\text{máx Ax}}$	$d_{\text{máx Ay}}$	$d_{\text{máx Ax}}$	$d_{\text{máx Ay}}$	$d_{\text{máx Ax}}$	$d_{\text{máx Ay}}$
		cm	cm	cm	cm		
1	7	17,8	18,0	18,2	18,2	2,2	1,1
2	8	17,9	20,1	18,0	19,9	0,6	-1,0
3	3-11	17,8	18,3	17,9	18,0	0,6	-1,6
4	4-12	17,9	20,4	18,2	20,2	1,7	-1,0

En estas últimas tablas puede verse que a nivel de cada dispositivo las variables que definen su diseño no sufren cambios significativos a pesar de que se considera una fuerte variación en las propiedades de cada dispositivo en el Caso 3 de análisis.

Lo anterior se explica por el hecho que los dispositivos trabajan en conjunto, acoplados por el sistema de apoyo rígido existente bajo y sobre ellos, situación que los transforma en un sistema en el que las propiedades de cada dispositivo dejan de ser relevantes por si solas. Para el caso del presente estudio, las propiedades de la base original en relación a la base optimizada resultan muy parecidas (a partir de resultados obtenidos) aunque los dispositivos por si solos son notablemente diferentes.

Desplazamientos máximos compuestos y fuerzas correspondientes

En las tablas siguientes se muestra en forma resumida el comportamiento compuesto experimentado por el Aislador N°8, esto es desplazamiento y fuerza resultante, ante los pares de registros considerados para ambos casos de análisis.

Tabla VIII-30: Desplazamiento máximo Aislador N°8

Análisis	Registro	T seg	U2 cm	U3 cm	U cm	ángulo °
Caso 2	Llolleo	49,76	-11,2	12,1	16,5	-47,3
	Concepción	25,04	-6,5	12,1	13,7	-61,9
	Constitución	40,64	-10,9	-13,5	17,3	51,0
Caso 3	Llolleo	49,82	-11,5	11,6	16,3	-45,2
	Concepción	24,22	13,8	-11,7	18,0	-40,3
	Constitución	40,68	-11,0	-15,7	19,2	54,9

Tabla VIII-31: Fuerza resultante Aislador N°8

Análisis	Registro	T seg	F2 ton	F3 ton	F ton	ángulo °
Caso 2	Llolleo	49,76	-31,3	30,0	43,3	-43,8
	Concepción	25,04	-23,5	31,6	39,4	-53,4
	Constitución	40,64	-35,3	-23,7	42,5	33,9
Caso 3	Llolleo	49,82	-36,5	29,0	46,6	-38,5
	Concepción	24,22	44,4	-4,8	44,7	-6,1
	Constitución	40,68	-39,3	-29,2	49,0	36,6

De la segunda tabla presentada se puede notar que el valor de las fuerzas compuestas instantáneas experimentadas por el dispositivo resultan levemente menores que aquellas que corresponderían al desplazamiento en cuestión de acuerdo a la curva esqueleto del dispositivo.

Por otra parte, como se puede ver en la siguiente tabla, si bien el amortiguamiento equivalente asociado a los desplazamientos compuestos resulta menor que aquel asociado a cada dirección principal por separado, continúa siendo levemente mayor que aquel definido en los modelos linealizados.

Tabla VIII-32: Fuerzas instantáneas v/s Fuerzas esperadas

Análisis	Registro	U cm	F(U) ton	$\beta(U)$ %	ΔF %
Caso 2	Llolleo	16,5	44,7	23,0	-3,0
	Concepción	13,7	40,0	26,0	-1,5
	Constitución	17,3	46,0	23,0	-7,5
Caso 3	Llolleo	16,3	47,7	33,0	-2,4
	Concepción	18,0	49,5	33,0	-9,7
	Constitución	19,2	50,6	32,0	-3,2

IX CONCLUSIONES

Luego de analizar el comportamiento general de las alternativas en estudio, puede concluirse que las soluciones que incorporan dispositivos de aislamiento elastoméricos generan demandas elásticas un orden de magnitud menor a las obtenidas en la solución tradicional de base fija.

Esta reducción tan significativa de demanda elástica se obtiene debido a la inclusión de una interfaz flexible en la dirección horizontal bajo la zona de almacenamiento. Con esto, el periodo natural de vibración de la estructura se eleva considerablemente, al momento que las formas modales cambian desde las tradicionales hacia aquellas que corresponden a oscilaciones de cuerpo libre. Paralelamente, el aumento de amortiguamiento en estos modos aislados crece notablemente en comparación al 5% tradicional que es asignado a este tipo de estructuras. Dicho sea de paso, este amortiguamiento de 5% sólo podría justificarse por el desarrollo de inelasticidades considerables, con el consiguiente daño (reparable) asociado.

Es importante notar que los mayores amortiguamientos de las estructuras aisladas, a diferencia del caso tradicional, se generan únicamente debido a la acción de los dispositivos y no a las posibles inelasticidades que puedan desarrollarse en la estructura. En estos casos, debido al objetivo primario del diseño aislado (daño nulo), las estructuras no trabajan fuera del rango lineal elástico, y consecuentemente no pueden desarrollar un amortiguamiento que sea considerable para efectos de nuestros diseños. Visto de esta forma, pareciera ser un claro error el adicionar un amortiguamiento estructural considerable (más de un 1%) al desarrollado por el sistema aislado, ya que esto significaría que el diseño permite que la estructura pueda encontrarse trabajando en un nivel de deformación que se contrapone al uso mismo de la tecnología de protección en estudio.

Debido a que el mayor impacto de la incorporación de una interfaz aislada dentro de la estructura es el aumento de los periodos asociados a los primeros modos

traslacionales, la eficiencia de la solución vendrá asociada al hecho de sacar de la zona de máximos espectrales (S_a) a aquellas estructuras rígidas que se encuentren en esta zona de periodos bajos. Por otra parte, a nivel de diseño práctico el efecto objetivo es llevar a la estructura a la condición de corte basal mínimo aceptado por la normativa que corresponda, lo que tiene su mayor ventaja en aquellos casos en que la estructura albergue masas importantes dentro de ella.

En el caso estudiado, el diseño de los elementos de aislación queda controlado por la compresión de largo plazo. Si bien esta es una condición que en estructuras habitacionales o de infraestructura resulta poco común, en equipos-estructuras de almacenamiento de masa variable no genera sorpresa. Lo anterior en razón que para condiciones estáticas estas estructuras deben ser capaces de trabajar a plena capacidad. Sin embargo, para condiciones sísmicas puede considerarse una condición de ocupación menor, que sea consistente con el nivel de llenado que se espera la mayor cantidad del tiempo. Este ha sido el caso. En este escenario, hemos visto como el momento volcante sísmico en la interfaz de aislación, producido en la situación aislada, no ha sido capaz de elevar la compresión de corto plazo en los dispositivos por sobre la máxima que corresponde al caso estático. Para este efecto (disminución de momento volcante) han actuado de manera simultánea dos efectos. El primero corresponde directamente a la disminución del corte basal en la estructura aislada, y el segundo corresponde al descenso de la resultante de solicitaciones laterales en la superestructura aislada. Este segundo efecto es equivalente a decir que casi no ha existido variación de las aceleraciones en altura para el caso de la superestructura aislada, situación que resulta consistente con el cambio de las formas modales predominantes a vibraciones de cuerpo libre.

Una estructura sin aislamiento sísmico puede presentar daños reparables en el “corto plazo” tanto en los elementos estructurales y no estructurales como en el contenido que alberga (equipos) provocando detenciones en la operación, siendo esta situación absolutamente aceptable dentro de los criterios normativos tradicionales. Pese a que no puede establecerse una regla general de ahorro directo de materiales resistentes en

las diferentes estructuras industriales con sistemas de aislación basal (requiere un estudio caso a caso), el gasto inherente a la incorporación del sistema de protección sísmica (eleva CAPEX) se ve compensando con creces al considerar en la evaluación económica que la estructura aislada no tendrá detenciones de la operación en caso de eventos sísmicos de gran intensidad (disminuye OPEX).

Si bien en el presente estudio no se ha incluido, como complemento a lo expuesto debiera desarrollarse (en etapas futuras), una evaluación económica formal de las alternativas técnicas estudiadas a fin de guiar de mejor manera la elección de la solución de aislamiento, considerando no solamente el desempeño de la estructura.

Cabe mencionar que debido a que en general el diseño se realiza con el uso de linealización equivalente y en un modelo de geometría lineal, el efecto $P\Delta$ de los aisladores sobre las caras de apoyo no será detectado por el modelo. En consecuencia, este efecto debe incorporarse de manera externa al realizar las verificaciones de aceptación que correspondan.

Un punto importante de notar es la amplia reserva de deformación lateral que pueden proveer los dispositivos. Debido al tamaño de los aisladores las deformaciones de diseño no resultan una exigencia mayor para los dispositivos, situación que es deseable en la medida que estas deformaciones puedan crecer por motivos inesperados.

Vale la pena detenerse un momento en este concepto de “reserva” de capacidad. En el caso de las estructuras industriales es común realizar actualizaciones en los sistemas productivos, situación que modifica las solicitaciones en las estructuras y exige la realización de revisiones y reacondicionamiento a las mismas. En el caso de los dispositivos de aislamiento la posibilidad de refuerzo o reparación podría considerarse nula para efectos prácticos, por lo que sólo resulta viable el recambio del elemento. En un escenario como este, que debiera ser previsto en el diseño

original, es deseable que el recambio no se ejecute en la totalidad de los dispositivos, sino sólo en aquellos que puedan desarrollar trabajos más allá de su zona segura.

Si bien se trata de un tema netamente económico y no técnico, es importante considerar en el diseño la posibilidad de estos recambios. En esta línea, podría ser altamente recomendable el mantener reservas de capacidad considerables en el sistema original. Además, la definición del sector donde se instalará cada uno de los dispositivos debiera ser detallada de tal forma que permita la incorporación futura de elementos de mayor tamaño y capacidad en caso de ser necesario.

Se puede mencionar que claramente los análisis linealizados tienen un costo (HH de ingeniería) órdenes de magnitud inferior a las verificaciones no lineales de tipo tiempo historia. Sumado a esto, tienden a entregar resultados levemente conservadores, situación por la cual constituyen un real aporte a la ingeniería de diseño práctico.

Por lo anterior, parece razonable acotar el uso de los análisis no lineales al ámbito de la investigación o a aquellos casos en que las verificaciones linealizadas de estructuras construidas se encuentren en el rango de no cumplimiento.

Otro aspecto importante es que a través del estudio se logra mostrar como dos juegos de aisladores muy diferentes logran obtener una respuesta muy similar a nivel de diseño de la superestructura. Esta situación muestra la gran versatilidad de los sistemas y la baja sensibilidad que se puede lograr bajo determinadas circunstancias, estabilidad y seguridad en la solución.

Si bien la propuesta optimizada (Caso 3) logra obtener una real disminución en el consumo de materias primas, es claro que la elección de esta alternativa no resulta llamativa para efectos de ingeniería real de proyectos industriales. El uso de aisladores idénticos en cada uno de los puntos de apoyo tiene ventajas constructivas inmediatas desde el punto de vista de la estandarización. De la misma forma, la

posibilidad de contar con dispositivos de recambio en bodega para ser usados en cualquier punto bajo cualquier circunstancia, entrega una versatilidad en la administración de los repuestos que disminuye los costos directos e indirectos de las mantenciones. Consistentemente, debiera recomendarse el uso de aisladores idénticos.

Otro aspecto a considerar en la elección de los dispositivos y su configuración es la robustez y estabilidad de la solución. Esto es, debe tenerse especial cuidado en generar sobredimensionamientos razonables que hagan viable el uso ante variaciones menores de las superestructuras, masas o rigideces. Se debe tener presente que en estructuras industriales, más que en las habitacionales, el recambio de equipos o upgrade de los procesos productivos corresponde a una actividad común durante la vida útil de los edificios.

Como último foco, y no menos importante, se debe establecer que el uso de los sistemas de aislación en las estructuras involucradas en este trabajo busca incorporar una flexibilización de la interfaz que disminuya los esfuerzos y las aceleraciones a niveles mínimos, y al mismo tiempo se incorpora un alto amortiguamiento tendiente a disminuir las deformaciones relativas a un mínimo razonable.

BIBLIOGRAFÍA

MEDALLA, M. (2013) *Análisis de Implementación de dispositivos de aislación sísmica en batería de Silos Industriales*. Actividad de Graduación, Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

ACI 318S-08 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural

CHOPRA, A (1995), *Dynamics of Structures*. Prentice Hall, New Jersey.

EUROCÓDIGO 1 (2006). Acciones en Estructuras. Parte 4: Silos y Estanques.

GAYLORD & GAYLORD (1972) *Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solid*. Prentice Hall, New Jersey.

KELLY, J y DIMITRIOS, A (2011) *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. John Wiley & Sons, United Kingdom.

KELLY, J and NAEIM, F (1999), *Design of Seismic Isolated Structures*. John Wiley & Sons, New York.

Norma Chilena Oficial, NCh2369Of2003. Diseño Sísmico de Estructuras e Edificios Industriales. *Instituto Nacional de Normalización*.

Norma Chilena Oficial, NCh2745Of2003. Análisis y diseño de edificios con Aislación Sísmica. *Instituto Nacional de Normalización*.