



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CÍVIL

ANÁLISIS Y DISEÑO DE STOPPERS SÍSMICOS MEDIANTE MODELO INTEGRADO EN CALDERA DE 350MW NETO TIPO PC

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

WALTER ALEJANDRO NAVARRETE VENEGAS

PROFESOR GUÍA:
HUGO BAESLER CORREA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO FONT FILAX
RAMÓN MONTECINOS CONCHA

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Walter Alejandro Navarrete Venegas
FECHA: 17/07/2017
PROFESOR GUÍA: Hugo Baesler Correa

ANÁLISIS Y DISEÑO DE STOPPERS SÍSMICOS MEDIANTE MODELO INTEGRADO EN CALDERA DE 350MW NETO TIPO PC

Dadas las condiciones de localización de las centrales termoeléctricas a carbón, y la sismicidad de la costa de Chile, así como la creciente demanda eléctrica, principalmente de la minería, se propone evaluar el diseño de stoppers sísmicos exteriores de calderas del tipo carbón pulverizado (PC), cuyo desempeño sísmico permita disminuir el tiempo de parada operacional de las centrales con tal de abastecer de energía eléctrica en el menor tiempo posible y evitar dañar a la población, para el caso de la caldera generadora de vapor, equipo principal de las centrales, sometida a un evento sísmico severo.

El análisis se realizará mediante un modelo integrado, que considera la interacción suelo estructura, la estructura de soporte del equipo, los componentes mecánicos de la caldera colgante, el sistema de stoppers sísmicos que transfieren carga sísmica entre la estructura de soporte y la caldera colgante. Este tipo de modelación es requisito para el diseño sísmico de calderas en la norma NCh2369 actualizada, con lo cual se obtiene una respuesta más real de la estructura y equipo.

El diseño del sistema de stoppers sísmicos exteriores que se propone, tiene un comportamiento plástico con el sismo de diseño, con lo cual se protege al equipo colgante, limitando las cargas sísmicas que se transfieren a la caldera colgante. Luego del sismo de diseño, los stoppers sísmicos deben permitir su inspección y reemplazo para la pronta puesta en servicio de la central.

Se propone un diseño de stoppers sísmicos de estructura de acero, que cumpla con los requisitos de análisis y diseño de la norma NCh2369 actualizada. Se verificó mediante el modelo integrado su comportamiento plástico y se realizó una estimación de las deformaciones plásticas máximas.

Se concluye en este trabajo de título que se puede proveer stoppers sísmicos solo en base a estructuras de acero, con capacidad de disipación de energía con el trabajo plástico para el sismo de diseño, cumpliendo los requisitos del capítulo 14 de norma NCh2369 actualizada y los estándares de criterios de diseño sísmico de las empresas generadoras, para el suministro de calderas en Chile.

DEDICATORIA

Dedicado a...
Mis padres, Cecilia y Walter
Mi hermano, Tomás
Mi abuelo, Carlos
Y a Leonor.

Quienes me han acompañado y apoyado incondicionalmente en esta gran etapa.

AGRADECIMIENTOS

PMI Energy Services y su personal.

Hugo Baesler Correa.

Néstor Sepúlveda Solís.

Manuel Rodríguez Vivanco.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES GENERALES	2
2.1. Introducción	2
2.2. Situación Eléctrica en Chile	2
2.3. Componentes de Operación de una Central Termoeléctrica	7
2.3.1. Centrales Térmicas Convencionales.....	7
2.3.2. Centrales Térmicas de Ciclo Combinado.....	8
2.4. Estructura de Caldera en Estudio	9
2.5. Antecedentes Stopper	11
2.5.1. Stopper Tipo I.....	12
2.5.2. Stopper Tipo II	13
2.6. Modelo Integrado	14
3. MODELO INTEGRADO	15
3.1. Introducción	15
3.2. Descripción y Modelación – Modelo Integrado	15
3.2.1. Componentes Internos - FURNACE.....	16
3.2.2. Componentes Internos - CAGE.....	17
3.2.3. Componentes de Gran Tamaño	18
3.2.4. Pared de Tubo y Techo de la Caldera	19
3.2.5. Hangers.....	20
3.2.6. Masas en Modelo Integrado	20
3.3. Propuesta de diseño	22
3.4. Modelación Stopper	24
3.5. Incorporación Interacción Suelo Estructura	27
3.5.1. Materiales.....	31
3.5.2. Parámetros Geotécnicos.....	31

4. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO SÍSMICO	32
4.1. Introducción.....	32
4.2. Análisis Modal Espectral.....	32
4.2.1. Espectro de Diseño NCh2369of2003	32
4.2.2. Espectro de Diseño ASCE7-10.....	33
4.2.3. Comentarios Espectro de Diseño.....	35
5. DISEÑO DE STOPPERS.....	37
5.1. Introducción.....	37
5.2. Disposición Plataformas y Buckstays.....	37
5.3. Disposición Guías y Columnas de Sacrificio (Stoppers).....	42
5.3.1. Stopper Tipo I.....	44
5.3.2. Stopper Tipo II	45
5.4. Solicitaciones para Diseño	45
5.5. Diseño Stoppers	49
5.5.1. Columnas de Sacrificio	51
5.5.2. Guías.....	65
6. RESULTADOS.....	66
6.1. Introducción.....	66
6.2. Modelo Fixed.....	66
6.2.1. Modos	66
6.2.2. Desplazamientos Caldera.....	68
6.3. Modelo ISE.....	72
6.3.1. Modos	72
6.3.2. Desplazamientos Caldera.....	73
6.4. Modelo Sin Stoppers.....	78
6.4.1. Modos	78
6.4.2. Desplazamientos Caldera.....	79
6.5. Deformaciones Columnas de Sacrificio	83

7. CONCLUSIONES	87
7.1. Resultados Comparativos de Modelos	87
7.2. Validación de Metodología de Diseño de Stoppers Sísmicos	90
7.3. Recomendaciones	92
GLOSARIO	96
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	1
A1. Diseño de Columna de Sacrificio Stopper Tipo I	1
A2. Diseño de Columna de Sacrificio Stopper Tipo II	7
A3. Diagrama Momento Curvatura según ASCE/SEI 41-13	13
A4. Diseño Guías Stoppers	15
A5. Metodología Análisis de Pushover	20

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Demanda Anual SIC y SING Periodo 2007-2016 FUENTE: CNE.....	3
Tabla 2: Masas Componentes Tipo Shell.	20
Tabla 3: Masa Componentes Tipo Sólidos.....	21
Tabla 4: Masa Componentes Tipo Frame.	21
Tabla 5: Masas Puntuales.....	22
Tabla 6: Propiedades del Acero.....	27
Tabla 7: Dimensiones Pedestales.	28
Tabla 8: Coeficiente Sísmico Máximo.....	32
Tabla 9: Plataformas.....	37
Tabla 10: Zonificación Buckstays.	41
Tabla 11: Distribución Stoppers por Plataforma.....	42
Tabla 12: Fuerzas Solicitantes para Diseño.....	47
Tabla 13: Dimensiones Columnas de Sacrificio.	51
Tabla 14: Deformaciones Pushover.....	64
Tabla 15: Diseño Guías Elásticas.....	65
Tabla 16: Modos Modelo Fixed.....	67
Tabla 17: Desplazamientos Relativos Caldera - Estructura de Soporte Modelo Fixed.....	69
Tabla 18: Modos Modelo ISE.	73
Tabla 19: Desplazamientos Relativos Caldera - Estructura de Soporte Modelo ISE.	74
Tabla 20: Modos Modelo Sin Stoppers.	79
Tabla 21: Desplazamientos Relativos Caldera - Estructura de Soporte.	80
Tabla 22: Estimación de Deformaciones Plásticas.....	86
Tabla 23: Periodos Fundamentales Estructura de Modelos Fixed e ISE.	87
Tabla 24: Efecto 1.	88
Tabla 25: Parámetros y criterios de aceptación según ASCE41-13.	13

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolución de Ventas Anuales Periodo 2007-2016.....	4
Gráfico 2: Espectro de Diseño Último NCh2369of2003 ($\xi=3\%$).....	33
Gráfico 3: Espectro de Diseño ASCE7-10 ($\xi=4\%$ y 5%).....	35
Gráfico 4: Espectros Elásticos ASCE7-10 y NCh2369of2003.....	36
Gráfico 5: Espectros Análisis Modal Espectral.....	46
Gráfico 6: Comportamiento según nivel de esbeltez.....	49
Gráfico 7: Momento Curvatura M- φ - PL1 - RX1 RX2.....	52
Gráfico 8: Fuerza Deformación F- Δ - PL1 - RX1 RX2.....	52
Gráfico 9: Momento Curvatura M- φ - PL1 - RY1.....	52
Gráfico 10: Fuerza Deformación F- Δ - PL1 - RY1.....	53
Gráfico 11: Momento Curvatura M- φ - PL1 - RY2.....	53
Gráfico 12: Fuerza Deformación F- Δ - PL1 - RY2.....	53
Gráfico 13: Momento Curvatura M- φ - PL3 - RX1 RX2.....	54
Gráfico 14: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RX1 RX2.....	54
Gráfico 15: Momento Curvatura M- φ - PL3 - RY1.....	54
Gráfico 16: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY1.....	55
Gráfico 17: Momento Curvatura M- φ - PL3 - RY2.....	55
Gráfico 18: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY2.....	55
Gráfico 19: Momento Curvatura M- φ - PL3 - RY3.....	56
Gráfico 20: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY3.....	56
Gráfico 21: Momento Curvatura M- φ - PL3 - RY4.....	56
Gráfico 22: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY4.....	57
Gráfico 23: Momento Curvatura M- φ - PL4 - RX1 RX2.....	57
Gráfico 24: Fuerza Deformación F- Δ - PL4 - RX1 RX2.....	57
Gráfico 25: Momento Curvatura M- φ - PL5 - RX1 RX3.....	58
Gráfico 26: Fuerza Deformación F- Δ - PL5 - RX1 RX3.....	58
Gráfico 27: Momento Curvatura M- φ - PL5 - RX2 RX4.....	58
Gráfico 28: Fuerza Deformación F- Δ - PL5 - RX2 RX4.....	59
Gráfico 29: Momento Curvatura M- φ - PL5 - RY1.....	59
Gráfico 30: Fuerza Deformación F- Δ - PL5 - RY1.....	59
Gráfico 31: Momento Curvatura M- φ - PL5 - RY2.....	60
Gráfico 32: Fuerza Deformación F- Δ - PL5 - RY2.....	60
Gráfico 33: Momento Curvatura M- φ - PL6 - RX1 RX3.....	60
Gráfico 34: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RX1 RX3.....	61
Gráfico 35: Momento Curvatura M- φ - PL6 - RX2 RX4.....	61
Gráfico 36: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RX2 RX4.....	61
Gráfico 37: Momento Curvatura M- φ - PL6 - RY1.....	62
Gráfico 38: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RY1.....	62
Gráfico 39: Momento Curvatura M- φ - PL6 - RY2.....	62

Gráfico 40: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RY2.....	63
Gráfico 41: Deformada Caldera Modelo Fixed - Plano XY. Factor de Amplificación: 10.	69
Gráfico 42: Deformada Caldera Modelo Fixed - Plano XZ. Factor de Amplificación: 10.....	70
Gráfico 43: Deformada Caldera Modelo Fixed - Plano YZ. Factor de Amplificación: 10.....	71
Gráfico 44: Deformada Caldera Modelo ISE - Plano XY. Factor de Amplificación: 10.....	75
Gráfico 45: Deformada Caldera Modelo ISE - Plano XZ. Factor de Amplificación: 10.....	76
Gráfico 46: Deformada Caldera Modelo ISE - Plano YZ.....	77
Gráfico 47: Deformada Caldera - Plano XY. Factor de Amplificación: 10.....	80
Gráfico 48: Deformada Caldera - Plano XZ. Factor de Amplificación: 10.....	81
Gráfico 49: Deformada Caldera - Plano YZ. Factor de Amplificación: 10.....	82
Gráfico 50: Deformación Elástica vs Plástica.	83
Gráfico 51: Fuerza - Deformación o Momento - Giro. FUENTE: ASCE41-13.....	85

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Mapa SIC.....	5
Figura 2: Mapa SING.	6
Figura 3: Central Térmica Convencional.	7
Figura 4: Central Térmica de Ciclo Combinado.....	9
Figura 5: Estructura de Soporte de Caldera en Estudio.....	9
Figura 6: Estructura de Interacción Soporte – Caldera.....	10
Figura 7: Caldera y Hangers.....	10
Figura 8: Estructura de la Caldera.....	11
Figura 9: Stopper Tipo I con daño. FUENTE: “Atico, Peru, Mw 8.4 Earthquake of June 23, 2001”. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of ASCE.....	12
Figura 10: Stopper Tipo II con daño. FUENTE: “Atico, Peru, Mw 8.4 Earthquake of June 23, 2001”. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of ASCE.....	13
Figura 11: Modelo Integrado.....	14
Figura 12: Simplificación de Paquete de Tubos del Furnace.	16
Figura 13: Tubos simplificados del Furnace.	16
Figura 14: Paquetes de Tubos del Cage.....	17
Figura 15: Simplificación de Tubos Dinámicamente Equivalentes del Cage.	18
Figura 16: Componentes de Gran Tamaño.	19
Figura 17: Pared de Tubo y Techo de la Caldera.	19
Figura 18: Hangers.....	20
Figura 19: Propuesta de Diseño.	23
Figura 20: Vista General Propuesta de Diseño.....	24
Figura 21: Ejes Locales Frames.....	25
Figura 22: Grados de Libertad de los Stoppers.....	26
Figura 23: Releases Guía y Columna de Sacrificio.....	26
Figura 24: Simplificación en Modelo.....	26
Figura 25: Propuesta de Stopper Simplificada.....	27
Figura 26: Modelo Integrado Fixed.....	27
Figura 27: Distribución Pedestales y Geometría MAT.....	29
Figura 28: Zonas y asentamientos estáticos.....	30
Figura 29: Modelo con Interacción Suelo Estructura (ISE).....	31
Figura 30: Plataformas	38
Figura 31: Plataforma - PL0.....	38
Figura 32: Plataforma - PL1.....	38
Figura 33: Plataforma - PL2.....	39
Figura 34: Plataforma - PL3.....	39
Figura 35: Plataforma - PL4.....	39
Figura 36: Plataforma - PL5.....	40
Figura 37: Plataforma - PL6.....	40

Figura 38: Buckstays.....	41
Figura 39: PL1 con Stoppers.....	42
Figura 40: PL3 con Stoppers.....	43
Figura 41: PL4 con Stoppers.....	43
Figura 42: PL5 con Stoppers.....	43
Figura 43: PL6 con Stoppers.....	44
Figura 44: Stopper Tipo I.....	44
Figura 45: Stopper Tipo II.....	45
Figura 46: Modelo Integrado Fixed y ISE.....	46
Figura 47: Esquema Análisis de Pushover.....	50
Figura 48: Carga concentrada en cualquier punto. FUENTE: ICHA.....	84
Figura 49: Carga concentrada en el extremo libre. FUENTE: ICHA.....	85
Figura 50: Plataformas PL5 y PL6.....	92
Figura 51: Supuesto de Dilatación por Temperatura.....	93
Figura 52: Stopper Tipo Link.....	93
Figura 53: Giro Horizontal y Vertical de Stopper Tipo Link.....	94
Figura 54: Columna de Refuerzo.....	94
Figura 55: Distancia Libre (GAP).....	95
Figura 56: Relaciones Momento Curvatura y Modelo del ASCE41-13.....	13
Figura 57: Load Patterns – Live.....	21
Figura 58: Modelación y Asignación de Carga.....	21
Figura 59: Rótula Plástica.....	21
Figura 60: Load Case Live.....	22
Figura 61: Otros Parámetros para Análisis de Pushover.....	22
Figura 62: Curva Fuerza Deformación – Análisis de Pushover.....	23

1. INTRODUCCIÓN

Chile es el país que presenta una de las mayores actividades sísmicas en el mundo. Con estas condiciones, se desarrollan estructuras de gran altura, tanto en edificación de viviendas como de instalaciones industriales.

En este sentido, las cargas sísmicas horizontales controlan el diseño estructural de edificios, siendo el análisis y diseño sísmico un área relevante de los proyectos de ingeniería estructural de equipos de instalaciones industriales.

Actualmente existe una gran cantidad de proyectos de plantas de generación eléctrica, las que abastecen principalmente al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y al Sistema Interconectado Central (SIC), donde las estructuras y equipos de las centrales generadoras deben ser diseñadas para garantizar la continuidad operacional luego de ser sometidas a los sismos de diseño establecidos en los contratos y no menos que lo estipulado en la norma sísmica industrial NCh2369.Of.2003. Por lo tanto, las estructuras y equipos no deben tener daños que signifiquen la interrupción de la operación de la central post sismo de diseño por períodos mayores entre dos y cuatro semanas. Para sismos de servicio más frecuentes, la central y sus equipos deben tener continuidad operacional sin interrupción de manera tal de satisfacer la demanda eléctrica.

Las calderas de generación de vapor, del tipo carbón pulverizado (PC), son uno de los equipos principales y de mayor monto de inversión en las centrales termoeléctricas. Las empresas generadoras en Chile han establecido, en su mayoría, que el suministro de estos equipos con sus estructuras de soporte, fundaciones y todos los componentes mecánicos bajo diseño ASME (American Society of Mechanical Engineers) sean diseñados y verificados sísmicamente mediante un modelo integrado que considera:

- a) Fundación y modelación del suelo.
- b) Estructuras de soporte de la caldera, incluyendo stoppers sísmicos exteriores a distintos niveles de la estructura donde se traspasa la carga sísmica de los componentes mecánicos colgantes de la caldera a la estructura de soporte.
- c) Equipos mecánicos soportados por la estructura de soporte de la caldera y piping.
- d) Cuerpo principal de la caldera colgante (casing), hanger bolts y todos los componentes mecánicos interiores de la caldera.

En la presente memoria de título, se realizará mediante un modelo integrado de caldera disponible, el diseño de los stoppers sísmicos exteriores de una caldera Tipo PC correspondiente a una central termoeléctrica de 350MW neto. El objetivo es evaluar el desempeño de distintos tipos de stoppers sísmicos, de manera de poder recomendar soluciones más adecuadas para cumplir con las exigencias de disponibilidad de suministro eléctrico.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Introducción

En el presente capítulo se dan a conocer los cuatro sistemas eléctricos y los tres sectores que componen a cada uno de ellos. Se presenta la capacidad instalada nacional y su respectiva participación por sistema. Para luego continuar con las ventas anuales de los dos sistemas que representan aproximadamente el 99% de las ventas a nivel nacional y posteriormente un gráfico donde se observa una tendencia de crecimiento anual de las ventas para el periodo 2007 -2016.

Luego, se exponen los principales tipos de centrales térmicas, convencionales y de ciclo combinado. Además, se explica de forma general el funcionamiento de cada una, complementado con las figuras 3 y 4 donde se muestran los principales componentes de ambas centrales.

La estructura en estudio se divide en tres sistemas, el primero corresponde a la estructura de soporte de una caldera, figura 5, el segundo es el sistema de interacción estructura de soporte – caldera, figura 6, y el tercero corresponde a la caldera con sus componentes interiores y hangers, figura 7. Finalmente la unificación de estos sistemas es lo que comúnmente se denomina “estructura de la caldera”, figura 8.

Además, se presentan los dos tipos de stoppers comúnmente utilizados para restringir los desplazamientos de una caldera luego de un sismo severo. También, se complementa con una descripción del daño e hipótesis de la falla.

Finalmente, se define qué es un modelo integrado, para qué sirve y cuáles son los componentes que se deben considerar en su modelación.

2.2. Situación Eléctrica en Chile

El mercado eléctrico está compuesto por tres sectores que en conjunto conforman el sistema eléctrico.

Los sectores de cada sistema corresponden a:

- a. Generación: Sector que produce energía mediante distintas tecnologías, hidroeléctricas, termoeléctricas, eólica, solar, entre otras.
- b. Transmisión: Sector encargado de transmitir energía a altos niveles de voltaje.
- c. Distribución: La función que cumple este sector corresponde a transmitir niveles de voltaje medio a los consumidores.

Chile, actualmente está compuesto por cuatro sistemas:

- a. Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)
- b. Sistema Interconectado Central (SIC)
- c. Sistema de Aysén
- d. Sistema de Magallanes

Al mes de Febrero de 2017, la capacidad instalada del Sistema Interconectado Central (SIC) es de 16.767,4 MW y la del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) es de 5.220,7 MW. En conjunto poseen 21.988,1 MW de potencia instalada, correspondiente a más del 99% de la capacidad total. Por lo que, el 1% restante corresponde a la potencia instalada de los sistemas de Aysén y Magallanes.

Como sigue a continuación, en la tabla 1 se presenta el detalle de ventas anuales a clientes por sistema, en la que se observa una tendencia de aporte al total vendido correspondiente a un 75% y 25% aproximadamente para SIC y SING respectivamente.

	SIC	SING	
Año	Ventas [GWh]	Ventas [GWh]	Total
2007	39.964	12.675	52.639
2008	39.580	13.219	52.799
2009	39.401	13.657	53.058
2010	41.062	13.792	54.854
2011	43.804	14.263	58.067
2012	46.282	14.832	61.114
2013	47.777	15.414	63.191
2014	49.011	15.740	64.751
2015	49.570	16.917	66.487
2016	50.456	16.960	67.416

Tabla 1: Demanda Anual SIC y SING Periodo 2007-2016 FUENTE: CNE.

A continuación, en el gráfico 1, se presenta la evolución de ventas anuales para el periodo 2007 – 2016.

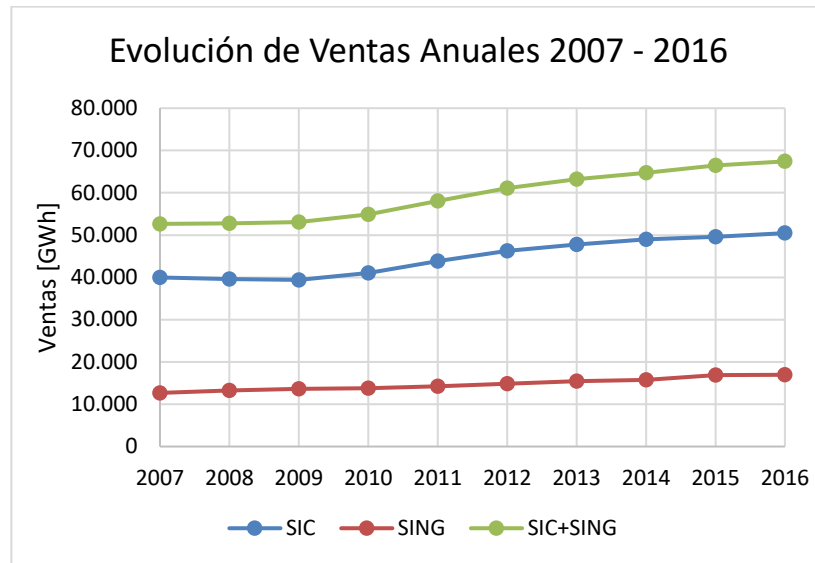


Gráfico 1: Evolución de Ventas Anuales Periodo 2007-2016.

Del gráfico expuesto se observa un aumento de la demanda eléctrica anual para cada sistema y por lo tanto, se puede decir que sigue una tendencia de crecimiento con el pasar de los años a nivel país.

A partir de la creciente tendencia de la demanda eléctrica surge la necesidad de satisfacer la demanda mediante la implementación de nuevos proyectos ya sea mediante la implementación de distintas tecnologías como hidroeléctricas, termoeléctricas, eólica, solar, entre otras.

En las figuras 1 y 2 se expone dos mapas referenciales correspondientes a cada sistema (SIC y SING) con el propósito de dar entender sobre qué zonas se extiende cada uno.

CDEC-SIC SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL



* Autorizada su circulación por resolución N°75 del 9 de abril de 2003 de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado. La edición y circulación de mapas cartas geográficas u otros impresos que se refieran o relacionen con los límites y fronteras de Chile no comprometen en modo alguno al Estado de Chile de acuerdo con el Art. 2° letra g) del DFL N° 83 de 1979 del Ministerio de Relaciones Exteriores.

Nota: Actualizado a mayo de 2014.

Figura 1: Mapa SIC.

FUENTE: Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central.

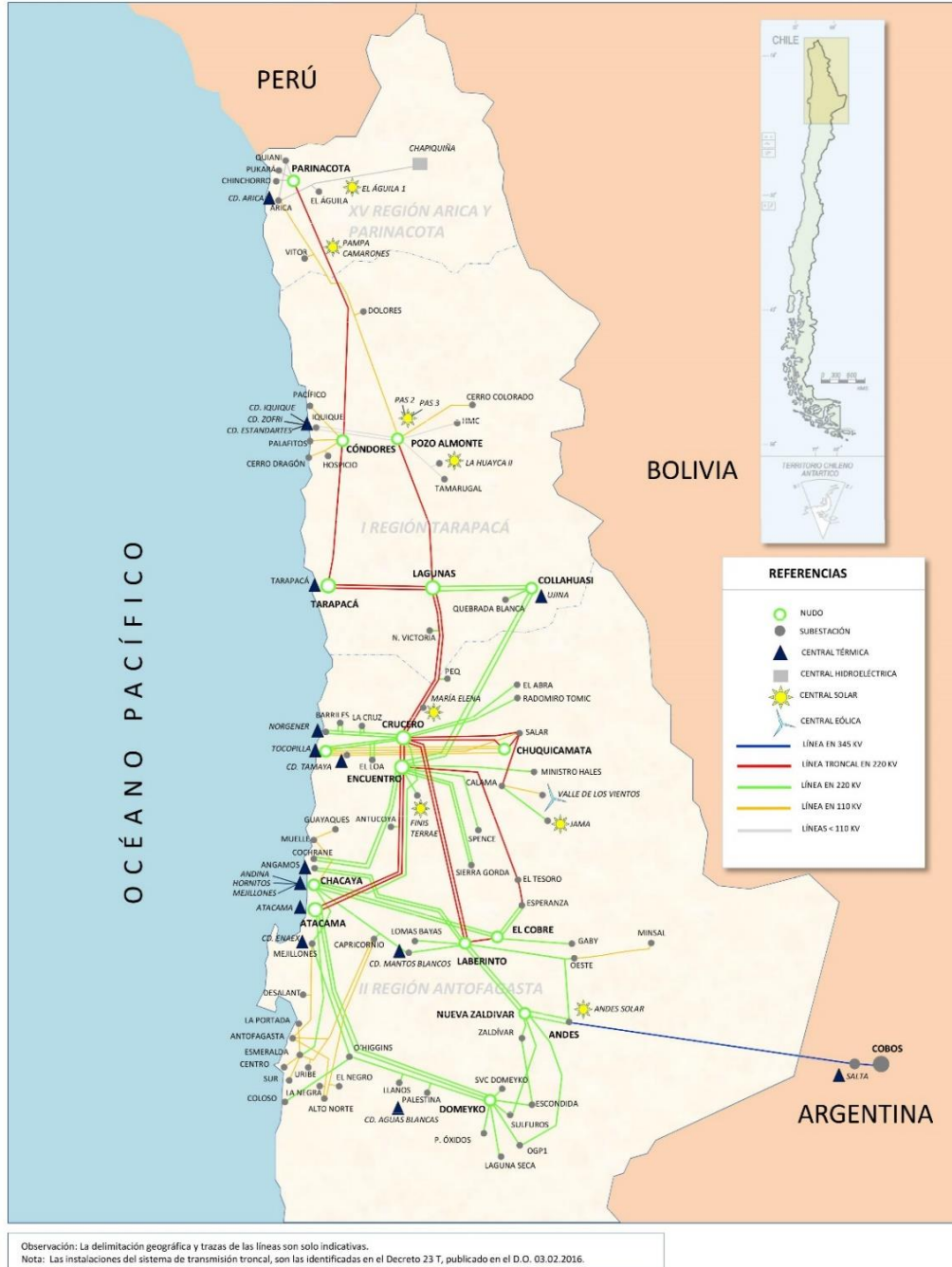


Figura 2: Mapa SING.

FUENTE: Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado del Norte Grande.

2.3. Componentes de Operación de una Central Termoeléctrica

Actualmente existe dos tipos de centrales, las convencionales y de ciclo combinado. En ambas el objetivo es generar energía eléctrica a partir de energía mecánica mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor.

A continuación se describe e ilustra de forma general para ambos tipos de centrales los principales componentes y su función dentro de la cadena de producción.

2.3.1. Centrales Térmicas Convencionales:

Desde la zona de acopio (1) se mueve el carbón mediante una cinta transportadora hasta una tolva (2) que alimenta el pulverizador o molino (3). Pulverizado el carbón este se inyecta a la caldera (4) mezclado con aire caliente para su combustión. El interior de la caldera se encuentra compuesto por una gran cantidad de tubos que forman un serpentín por el que circula agua. A partir de la combustión del carbón y del flujo de agua a través del serpentín se genera vapor. Con la combustión se generan residuos, los sólidos caen hacia el cenicero (5), finos y humos se pasan por el economizador (8), precipitador (10) y desulfurador (11), con el fin de retener los sulfuros que contienen los residuos antes de ser descargados a la atmosfera mediante la chimenea (12). En la turbina (13, 14, 15) el vapor de agua genera movimiento en las aspas que giran en solidario con el rotor del generador eléctrico (20). La tensión generada se eleva en el transformador (17) con tal que disminuir las pérdidas a los puntos de consumo, para luego pasar a las líneas de transmisión (21).

Cabe mencionar que las centrales convencionales funcionan en base a la combustión de gas natural, petróleo y carbón.



Figura 3: Central Térmica Convencional.

FUENTE: Asociación Española de la Industria Eléctrica.

2.3.2. Centrales Térmicas de Ciclo Combinado

La gran mayoría de las centrales de ciclo combinado utilizan gas natural como combustible principal, pero también se utiliza petróleo y carbón previamente gasificados. Existen algunas que tienen el sistema de gasificación integrado y se denominan por “Centrales de Gasificación Integrada con Ciclo Combinado”.

En este tipo de centrales se genera energía eléctrica mediante dos procesos termodinámicos que ocurren en la turbina de gas y turbina de vapor. La turbina de gas (2) está compuesta por un compresor de aire, cámara de combustión y cámara de expansión. El compresor comprime aire a alta presión, extraído desde la atmósfera, para mezclarlo posteriormente con el gas en la cámara de combustión (3). Los gases producidos a partir de la combustión del gas se conducen a la cámara de expansión. La energía que se genera se reparte en energía que utiliza el compresor y en energía mecánica para girar los alabes de la turbina que trabajan en solidario con el eje del generador eléctrico (4).

Los gases de salida de la cámara de expansión, es decir, de salida de la turbina de gas tienen una temperatura aproximada de 600°C, por lo que se dirigen hacia la caldera de recuperación (7), que tiene los mismos componentes de una caldera de central convencional, en donde se utiliza el gas de combustión de salida de la turbina de gas para generar vapor a partir del agua que circula por el sistema de tubos de la caldera.

El vapor generado se expande en la turbina a vapor (8) lo que genera movimiento de las aspas que giran en solidario con el rotor del generador eléctrico (9). Al igual que en la turbina a gas con tal de disminuir pérdidas por transporte se eleva la tensión en el transformador (5) para luego ser enviada a la red de transmisión mediante las líneas de transporte o transmisión de energía eléctrica (6).

El vapor que sale de la turbina se pasa por el condensador (10) que utiliza agua fría proveniente de una fuente cercana para completar el proceso de condensación. El agua utilizada para el enfriamiento se devuelve al mar o río en caso de ser de ciclo abierto o se lleva a la torre de refrigeración (11) en caso de ser de ciclo cerrado.

A continuación se presenta en la figura 4 un esquema de los componentes de este tipo de centrales.

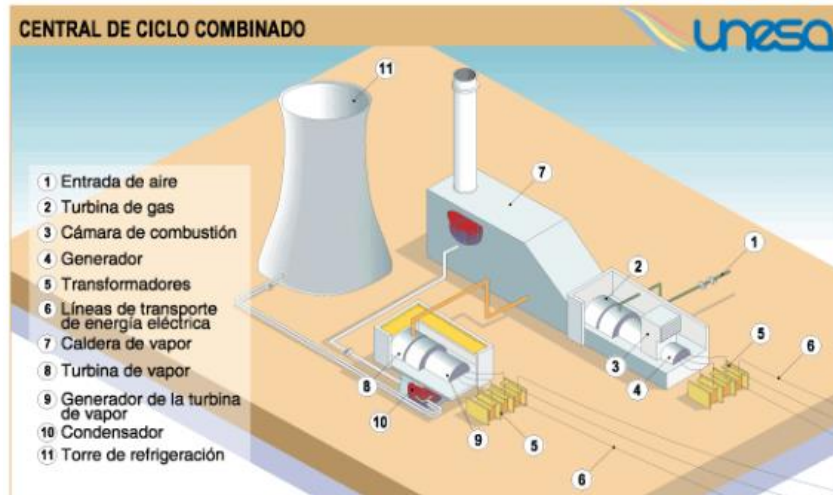


Figura 4: Central Térmica de Ciclo Combinado.

FUENTE: Asociación Española de la Industria Eléctrica.

2.4. Estructura de Caldera en Estudio

La estructura de la caldera se compone principalmente por tres sistemas. El primero está compuesto por vigas, columnas, diagonales, pedestales y fundación que en conjunto conforman la estructura de soporte para la caldera. La caldera cuelga de la estructura de soporte por lo que cuando ocurre un evento sísmico esta estructura es la que transmite el sismo a la caldera y recibe los esfuerzos en las direcciones horizontal y vertical con que reacciona la caldera producto de la acción sísmica.

A continuación, en la figura 5, se ilustra la estructura de soporte de la caldera en estudio.

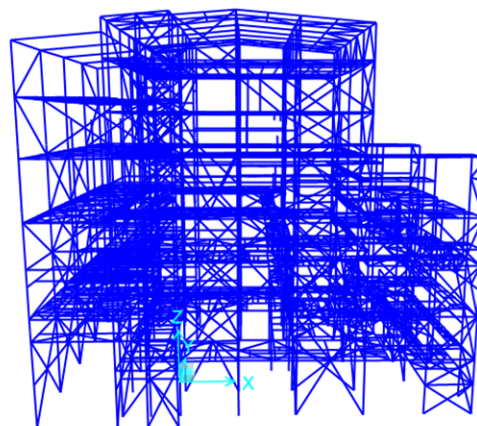


Figura 5: Estructura de Soporte de Caldera en Estudio.

El segundo sistema corresponde a los elementos de interacción entre la caldera y la estructura de soporte, vale decir, stoppers sísmicos y buckstays, figura 6. El traspaso de los esfuerzos sísmicos entre la caldera y estructura de soporte no podría ocurrir sin los componentes de interacción. Estos componentes frente a tal evento sísmico se deben comportar según su diseño debido a que son de gran importancia ya que protegen a la caldera y sus componentes interiores, por ejemplo, hay componentes de interacción que son diseñados para comportarse de forma plástica o elástica según corresponda al elemento.

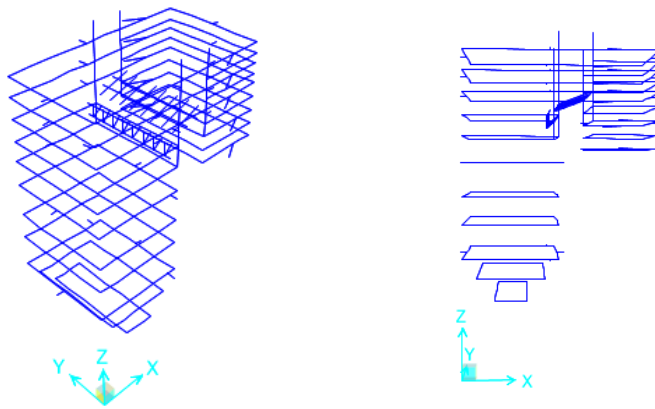


Figura 6: Estructura de Interacción Soporte – Caldera.

Por último, en la figura 7, el sistema de todos los elementos que componen la caldera, es decir, casing, hangers y todos los componentes mecánicos interiores.

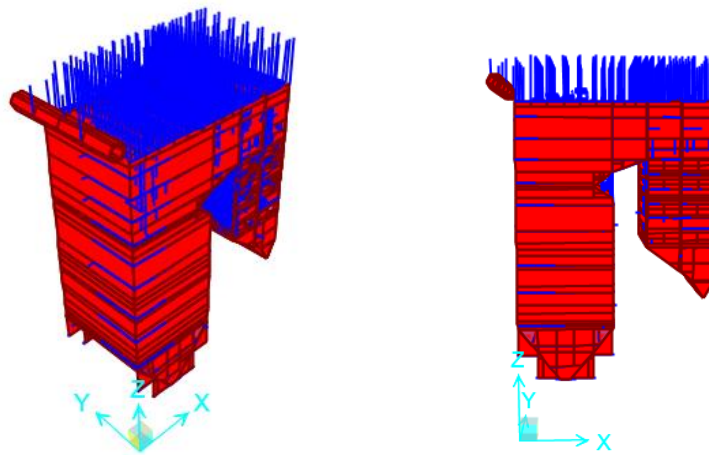


Figura 7: Caldera y Hangers.

A partir de la unificación de los tres sistemas se conforma la estructura de la caldera. En la figura 8 se ilustra la estructura ligada a la caldera en estudio.

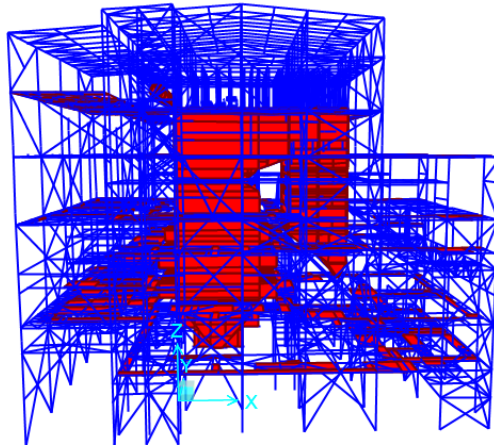


Figura 8: Estructura de la Caldera.

2.5. Antecedentes Stopper

El sistema de interacción estructura de soporte – caldera está conformado por los buckstays y stoppers sísmicos exteriores a la caldera. Estos elementos son los encargados de transmitir los esfuerzos sísmicos a la estructura de soporte generados por los desplazamientos horizontales relativos entre la caldera y la estructura de soporte debido a un evento sísmico.

Por lo tanto, los stoppers son los encargados de restringir el desplazamiento horizontal en ambos sentidos de la caldera para evitar que ésta se golpee y con ello disminuir el daño de sus componentes interiores.

En relación a lo anterior, se propone que el comportamiento de los stoppers debe ser previsto cuando ocurre un evento sísmico severo con tal de disminuir el tiempo de parada operacional de la planta.

A continuación se presenta, en las figuras 9 y 10, los dos tipos comúnmente implementados de stoppers para restringir el desplazamiento horizontal de la caldera ligando la estructura exterior (buckstays) con la estructura de soporte, luego de un sismo severo. Se describen sus características como sigue:

- a) Tipo I: Corresponde a un stopper en el que las guías nacen desde el buckstay para descargar a la plataforma mediante un elemento poste en cantiléver.
- b) Tipo II: En este caso las guías también nacen desde el buckstay pero llegan a la plataforma directamente, por lo que no necesita la implementación de un elemento tipo poste.

2.5.1. Stopper Tipo I

Descripción defecto: Daños y deformaciones en stopper

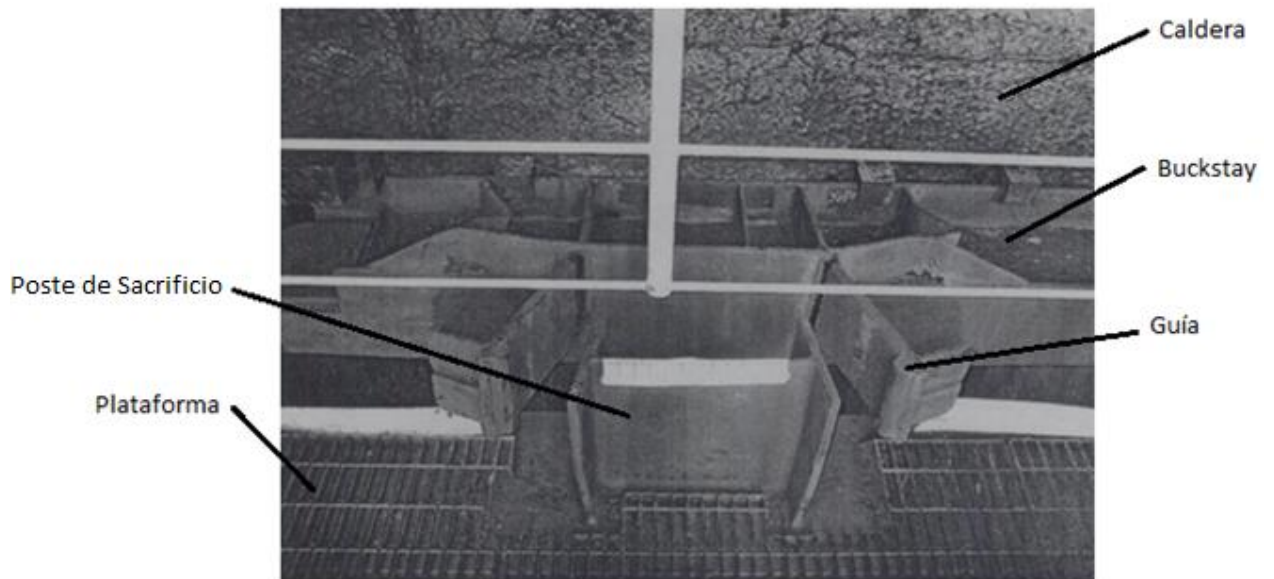


Figura 9: Stopper Tipo I con daño. FUENTE: “Atico, Peru, Mw 8.4 Earthquake of June 23, 2001”. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of ASCE.

Descripción del Daño:

Se observa que el sistema de guías-buckstay falló ya que se produjo deformación plástica permanente principalmente en los buckstays, produciéndose un giro de las guías, lo que se aprecia en la figura 9. Además, se observa pandeo local del ala y alma de la viga del buckstay. En el elemento poste de sacrificio no se observa daño en el alma pero si un giro de las alas. No se observa daño en la plataforma.

Hipótesis:

El daño observado en los buckstays de la caldera se debe a la transferencia de carga sísmica. El comportamiento del stopper sísmico no focalizó la falla plástica en el poste de sacrificio, con lo cual no se protegió al equipo y sus buckstays. La apertura de las guías se genera debido a la baja resistencia de la viga de buckstay (pandeo local de ala y alma) para recibir el traspaso de la carga sísmica, generado cuando el poste y la guía interactúan.

El diseño de este stopper no cumple con los requisitos del capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada.

2.5.2. Stopper Tipo II

Descripción defecto: Daños y deformaciones en stopper

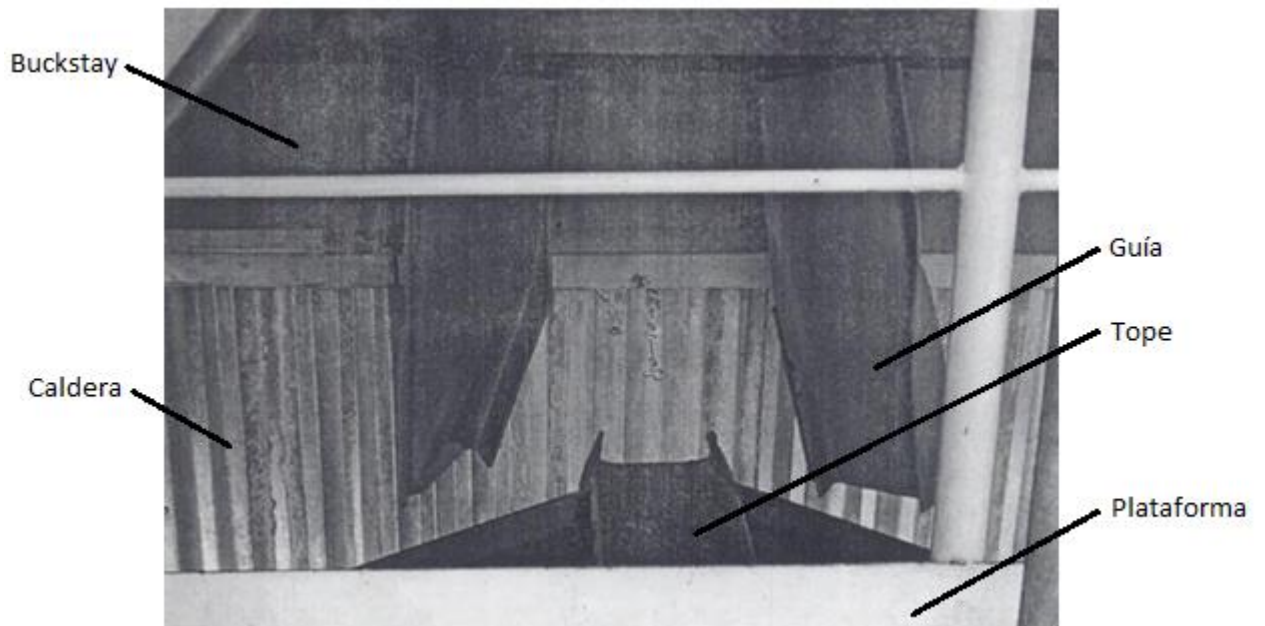


Figura 10: Stopper Tipo II con daño. FUENTE: "Atico, Peru, Mw 8.4 Earthquake of June 23, 2001".
Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering of ASCE.

Descripción del Daño:

Se observa en la figura 10, falla en las guías conectadas con el buckstay, abertura, giro y aplastamiento del alma de las guías. Lo que se traduce en pandeo lateral torsional y pandeo local del alma y ala. En el elemento de tope se observa solo pandeo local de las alas.

Hipótesis:

El daño observado en las guías se debe a la transferencia de carga sísmica en el instante en que el elemento de tope interactúa con la guía. La falla plástica del stopper se ha focalizado en las guías conectadas al buckstay, con lo cual no se puede garantizar la mantención del trabajo de la guía, el stopper está desconectado.

El diseño de este stopper no cumple con los requisitos del capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada.

2.6. Modelo Integrado

Las calderas de generación de vapor del tipo carbón pulverizado (PC) son uno de los equipos principales y de mayor monto de inversión en las centrales termoeléctricas. Las empresas generadoras en Chile, han establecido en su mayoría, que el suministro de estos equipos con sus estructuras de soporte y fundaciones, así como también todos los componentes mecánicos bajo diseño ASME (American Society of Mechanical Engineers), sean diseñados y verificados sísmicamente mediante un modelo integrado, figura 11, que considera:

- a) Fundación y modelación del suelo.
- b) Estructuras de soporte de la caldera, incluyendo stoppers sísmicos exteriores a distintos niveles de la estructura donde se traspasa la carga sísmica de los componentes mecánicos colgantes de la caldera a la estructura de soporte.
- c) Equipos mecánicos soportados por la estructura de soporte de la caldera y piping.
- d) Cuerpo principal de la caldera colgante (casing), hanger bolts, y todos los componentes mecánicos interiores de la caldera.

Mediante el modelo integrado de la caldera se obtienen los esfuerzos para el diseño de la estructura de soporte y los esfuerzos sísmicos para el diseño de los componentes mecánicos bajo norma ASME.

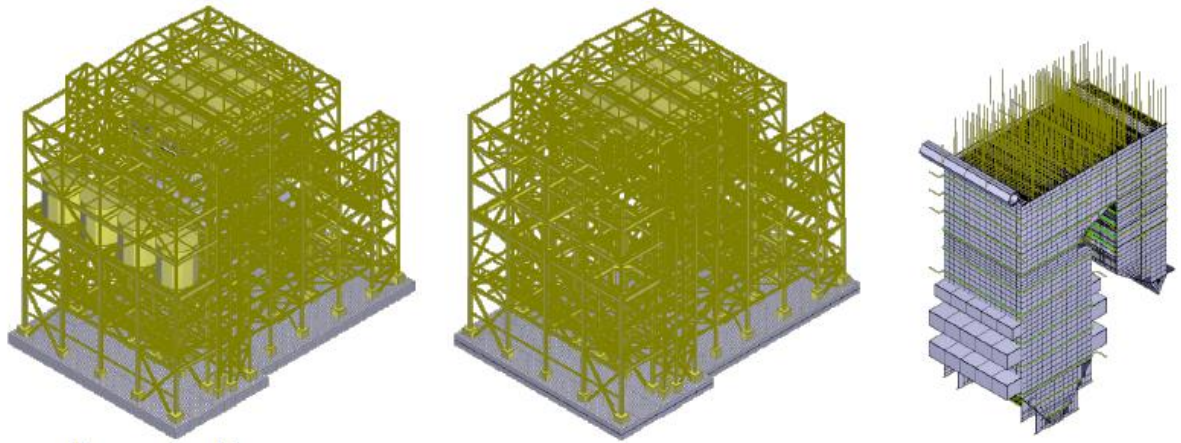


Figura 11: Modelo Integrado.

3. MODELO INTEGRADO

3.1. Introducción

En el presente capítulo se expone cual es el propósito de implementar un modelo integrado y cuáles son las características que debe cumplir para representar la estructura de la forma más real posible.

Para generar un modelo lo más cercano a la realidad es necesario saber cuáles son los principales componentes que este debe considerar. Es por esto que se presentan los componentes del furnace, cage, componentes de gran tamaño, hangers, pared de tubo y techo. También, se complementa con los supuestos con los que se modeló cada uno de los componentes.

Luego, se da a conocer la propuesta de diseño de los stoppers que incluye el comportamiento esperado de sus elementos elástico o plástico según sea el caso. Además, se incluye la modelación de las guías y columna de sacrificio de los stoppers en el modelo.

Finalmente, para realizar una modelación más completa se propone incorporar la interacción suelo estructura al modelo. La que consiste en modelar pedestales, MAT de fundación y suelo.

3.2. Descripción y Modelación – Modelo Integrado

Con la implementación de un modelo integrado se obtienen los esfuerzos para el diseño de la estructura de soporte y los esfuerzos sísmicos para el diseño de los componentes mecánicos bajo norma ASME.

Dado lo anterior, la modelación de los elementos que componen a toda la estructura debe ser, en lo posible, igual a los componentes reales. Sin embargo, en caso de no ser posible modelar algún grupo de elementos se permite utilizar propiedades de área, inercia y densidad dinámicamente equivalente con tal de representar al grupo de elementos de la estructura o equipo de la mejor forma posible. La modelación de la estructura se realiza en un programa de elementos finitos SAP2000v17.

3.2.1. Componentes Internos - FURNACE

Los paquetes de tubos colgantes tales como platen superheater (SH), secondary SH, final SH y final RH se modelan como vigas equivalentes, es decir, con apropiada área seccional, momento de inercia y densidad. Por lo que cada paquete de tubos se simplifica en un tubo equivalente.

A continuación, en la figura 12, se presenta el paquete de tubos real y su respectiva simplificación.

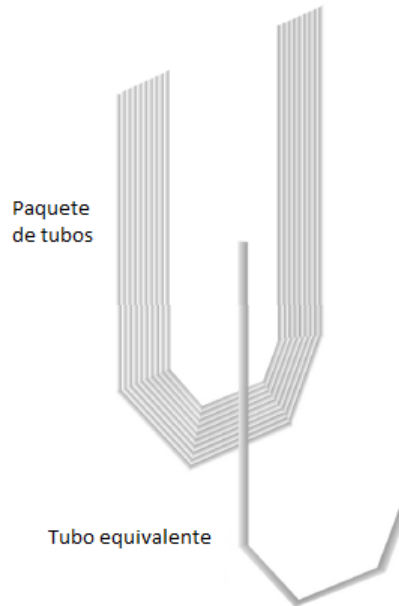


Figura 12: Simplificación de Paquete de Tubos del Furnace.

A continuación, en la figura 13, se expone la simplificación de todos los paquetes de tubos del furnace.

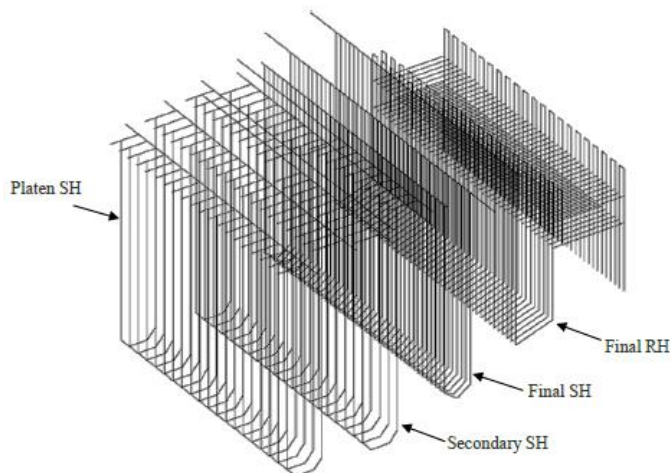


Figura 13: Tubos simplificados del Furnace.

3.2.2. Componentes Internos - CAGE

Los paquetes de tubos de primary SH y primary reheater (RH) se modelan como tubos equivalentes, es decir, con apropiada área seccional, momento de inercia y densidad. Por lo que cada paquete de tubos se simplifica en un tubo equivalente. El economizador es modelado como elementos tipo shell con espesor, densidad y constantes de elasticidad ortotrópicas dinámicamente equivalentes. Ver figuras 14 y 15, en las que se presenta el manajo de tubos y la simplificación en el modelo integrado.

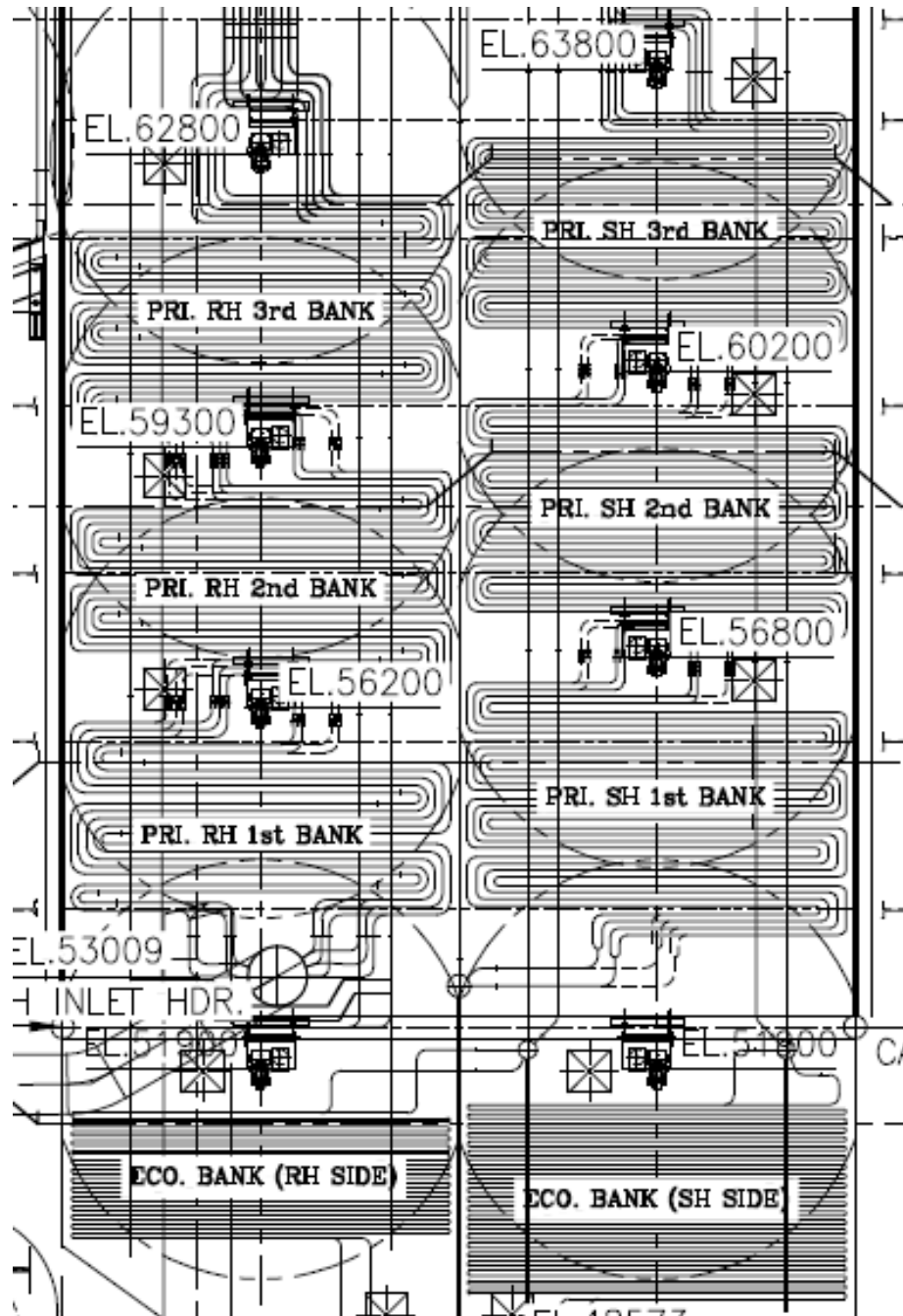


Figura 14: Paquetes de Tubos del Cage.

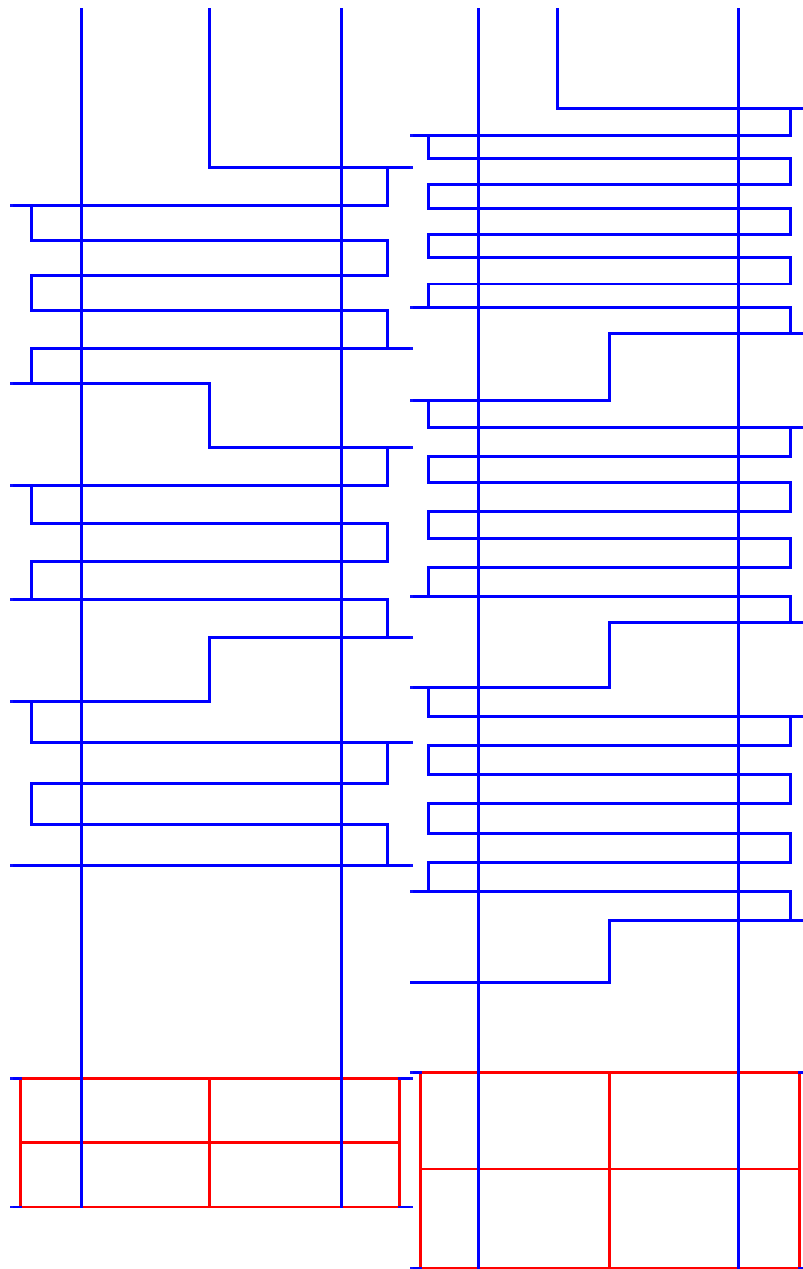


Figura 15: Simplificación de Tubos Dinámicamente Equivalentes del Cage.

3.2.3. Componentes de Gran Tamaño

Los componentes denominados por “gran tamaño” corresponden al Drum, Windbox y Ash. Se modelan como elementos tipo shell con espesor, densidad y constantes de elasticidad orto trópicas dinámicamente equivalentes.

A continuación, en la figura 16, se expone la simplificación de los componentes.

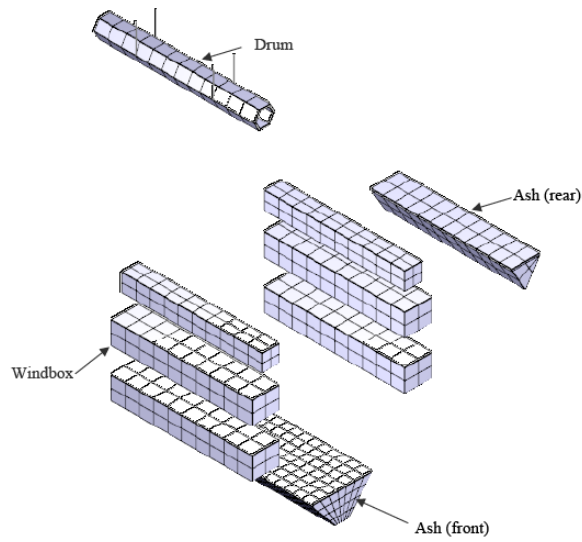


Figura 16: Componentes de Gran Tamaño.

3.2.4. Pared de Tubo y Techo de la Caldera

La pared de tubos y techo, figura 17, se modelan como elementos tipo shell con espesor, densidad y constantes de elasticidad orto trópicas dinámicamente equivalentes.

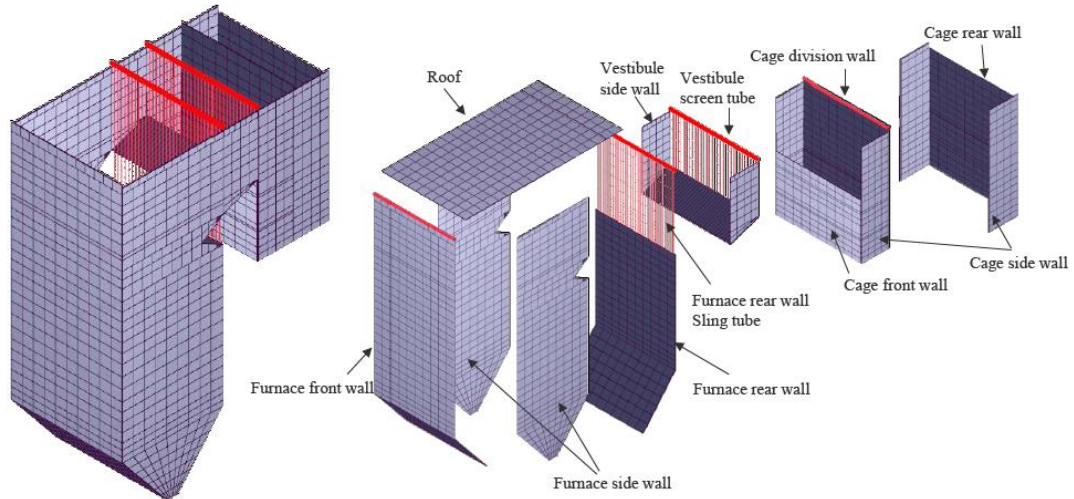


Figura 17: Pared de Tubo y Techo de la Caldera.

3.2.5. Hangers

Estos elementos corresponden a la interacción vertical entre la caldera y estructura de soporte, por lo que son modelados como elementos tipo frame. El total de hangers es de 604, los que se simplifican en 290 con equivalente área seccional y propiedades físicas.

A continuación, en la figura 18, se presenta la simplificación de los hangers.

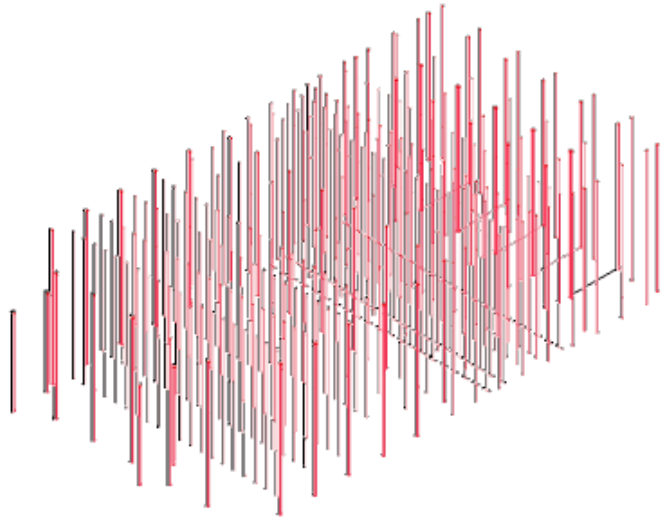


Figura 18: Hangers.

3.2.6. Masas en Modelo Integrado

A continuación se presenta la masa en el modelo de los componentes mencionados en las secciones anteriores. En cada tabla se compara la masa real con la masa en el modelo de los componentes. Se dividen según forma de modelación, vale decir, elementos tipo shell, frame, sólidos y masas puntuales.

- Masa total de elementos tipo shell:

Componente	Masa Real [ton]			Modelo [ton]
	Dead	Water	Total	
Furnace wall	638	54	692	692
Vestibule wall	46	5	51	50,1
Cage wall	175	0,8	175,8	177,3
Roof	70	0,4	70,4	70
Total	929	60,2	989,2	989,4

Tabla 2: Masas Componentes Tipo Shell.

- Masa total de elementos tipo solidos:

Componente		Masa Real [ton]			Modelo [ton]
		Dead	Water	Total	
Primary SH	1st	173	3,2	176,2	176,2
	2nd	157	2,1	159,1	159,1
	3rd	145	1,4	146,4	146,4
Primary RH	1st	100	0,6	100,6	100,6
	2nd	104	0,6	104,6	104,6
	3rd	118	0,3	118,3	118,3
Economizer	RH side	112	18	130	130
	SH side	168	27	195	195,1
Drum		177	25	202	202
Windbox		344	-	344	344
Pri. SH pendant tube		22	0,3	22,3	22,3
Ash	Furnace	361	-	361	361,1
	Cage	88	-	88	88
Total				2147,5	2147,7

Tabla 3: Masa Componentes Tipo Sólidos.

- Masa total de elementos tipo frame:

Componente	Modelo [ton]
Hangers	61,3
Buckstays and stoppers	460,5
Platen SH	66
Secondary SH	66,8
Final SH	45,5
Final RH	118,3
Furnace hopper headers	14,9
Furnace front wall inlet header	3,9
Platen 1 SH inlet headers	4,2
Platen 1 SH outlet headers	7,2
Platen 2 SH inlet headers	4,6
Platen 2 SH outlet headers	6,7
Final SH inlet header	5,6
Other headers and pipe	154,7
Total	1020,2

Tabla 4: Masa Componentes Tipo Frame.

- Masas puntuales:

Componente	Modelo [ton]
Pipes attached to drum	130,6
Pipes attached to eco. sling outlet header	8,5
Pipes attached to furnace FW outlet header	2,5
Pipes attached to furnace SW outlet header	10,8
Pipes attached to furnace RW outlet header	2,6
Pipes attached to furnace roof inlet header	8,1
Pipes attached to vestibule SW outlet header	5,3
Pipes attached to vestibule screen outlet header	7,1
Pipes attached to division wall inlet header	4,1
Pipes attached to RH front sling outlet header	0,7
Pipes attached to RH rear sling outlet header	0,7
Pipes attached to cage SW outlet header	3,4
Etc	117,5
Total	301,9

Tabla 5: Masas Puntuales.

3.3. Propuesta de diseño

El sistema de stoppers sísmicos exteriores transfiere carga sísmica desde la estructura de soporte a la caldera colgante a través de elementos rigidizadores (buckstays). El objetivo principal del sistema de stoppers es de proteger el equipo mecánico (diseño ASME) controlando el nivel de carga sísmica que se transfiere a la caldera, evitándose que esta tenga colisión con la estructura y con ello minimizar daños en sus componentes internos (tuberías a presión). La utilización del modelo integrado, permite realizar el diseño de las estructuras soportantes y a su vez determinar las solicitaciones sísmicas en los componentes mecánicos bajo diseño ASME, de manera que en una etapa posterior estos esfuerzos sísmicos se combinen con las solicitaciones de temperatura y presión que establece el diseño ASME.

A partir de este trabajo se busca realizar un aporte en cuanto al diseño y comportamiento de los stoppers sísmicos exteriores de calderas a carbón.

Se propone establecer una metodología de diseño de stoppers sísmicos de calderas, de manera que sirva de referencia para el diseño y suministro de futuras calderas en Chile.

Se espera que la metodología de análisis y diseño de calderas, estructuras y componentes mecánicos, mediante un modelo integrado sea incorporado en las especificaciones de contratos EPC de centrales termoeléctricas. De lo anterior, dar cuenta de que la implementación de un modelo integrado para el diseño de los stoppers sísmicos es una metodología recomendable para representar la complejidad de un equipo con su estructura y componentes mecánicos de manera de obtener diseños sísmicos en elementos de sacrificio, en los cuales se garantice un comportamiento plástico localizado en el sistema de stoppers y protegiendo al equipo mecánico para no generar daño con el sismo de diseño y lograr la continuidad operacional requerida por los inversionistas de la central eléctrica, así como también minimizar una falla al suministro de energía (perjuicio a la población, industria y seguridad nacional).

Antes de comenzar con la propuesta de diseño se define los elementos que componen el sistema de stoppers sísmicos, que se describe a continuación.

- a) Guías
- b) Columna de sacrificio
- c) Buckstays
- d) Plataformas de estructura de soporte horizontal.

El sistema está compuesto por estos cuatro elementos, buckstays son las vigas de apoyo de las columnas de sacrificio, y las plataformas que es desde donde nacen las guías de los stoppers. A continuación en la figura 19 se ilustra cada elemento de la propuesta de diseño.

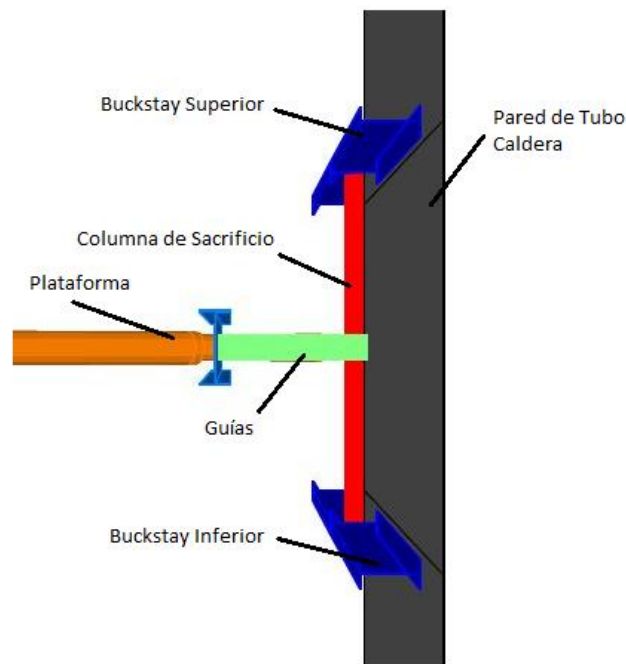


Figura 19: Propuesta de Diseño.

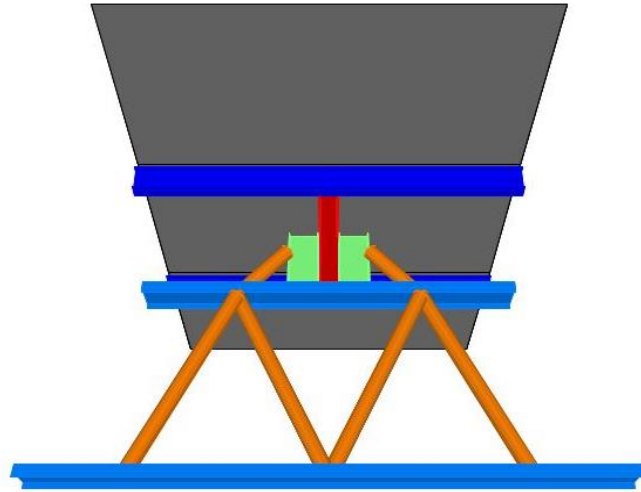


Figura 20: Vista General Propuesta de Diseño.

La propuesta de diseño establece que el modelo integrado de la caldera debe considerar que los stoppers sísmicos exteriores tendrán un comportamiento plástico localizado con el sismo de diseño. Se define por diseño que el elemento que debe plastificarse sea la columna de sacrificio, por lo que cumple el rol de fusible. A partir de la plastificación del elemento se pretende controlar el máximo de carga sísmica que se transfiere de la estructura de soporte a la caldera colgante, evitando dañar los componentes interiores de la caldera. Además, en tal caso luego del sismo de diseño, el sistema de stoppers sísmicos deberá considerar que los elementos de sacrificio serán reemplazados en el corto plazo (menor a cuatro semanas) para la puesta en servicio de la central.

3.4. Modelación Stopper

Debido a que los stoppers sísmicos exteriores cumplen la función de transferir carga sísmica de la estructura de soporte a la caldera colgante, surge la necesidad de incorporarlos en el modelo integrado.

Para comenzar, se debe entender cómo trabaja el stopper frente a los desplazamientos relativos de la caldera con la estructura de soporte, impuestos por el sismo. Debido a que la caldera cuelga de la estructura de soporte a través de los hangers, su comportamiento se puede asimilar al de un gran péndulo y por lo tanto, la caldera queda libre a desplazarse en el plano horizontal. El sistema de stoppers sísmicos controla estos desplazamientos relativos de la caldera colgante y al mismo tiempo controla el nivel de carga que se transfiere al equipo y sus tuberías a presión

Es por esto que surge la necesidad de implementar un sistema de interacción estructura de soporte – caldera colgante mediante un modelo integrado que sea capaz de representar el comportamiento y permita determinar los desplazamientos relativos con las transferencias de cargas sísmicas entre la caldera y la estructura de soporte.

El sistema de interacción está compuesto por los buckstays y stoppers sísmicos, en el que cada stopper está compuesto por dos guías y una columna de sacrificio que trabajan cuando ocurre un evento sísmico. Cabe mencionar que cada guía restringe el desplazamiento en una dirección, es decir, nunca trabajan las dos guías al mismo tiempo. Por lo que cuando el desplazamiento es en +X o -X solo trabaja una guía correspondiente en cada caso.

Es por esto, que en el modelo integrado se considera solo una de las guías para representar el comportamiento sin incurrir en subestimación de esfuerzos y deformaciones. La modelación simplificada consiste en utilizar solo una guía conectada a la columna de sacrificio que cumple con restringir los desplazamientos para el sismo en X o Y según corresponda.

Para modelar los componentes de los stoppers se debe tener en cuenta el sentido de los ejes locales de los elementos tipo frame. Que corresponden a la figura 21, donde 1 es el eje principal, 2 es el eje menor y 3 el eje mayor. Lo anterior permite en el modelo que los frames trabajen en el eje fuerte según la dirección deseada, se debe tener cuidado especial ya que un elemento orientado erróneamente tendrá un comportamiento diferente, y por ende, a pesar de utilizar la sección transversal adecuada se obtendrán resultados erróneos.

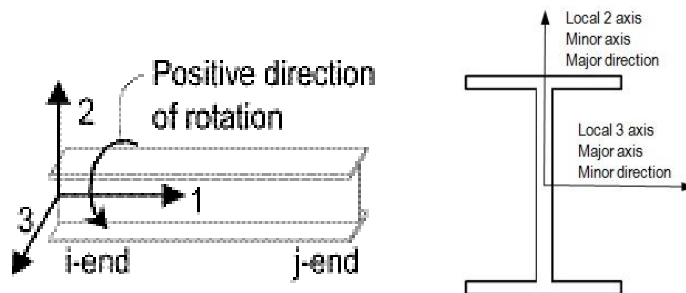


Figura 21: Ejes Locales Frames.

En la figura 22, se presenta un ejemplo de la forma en que trabaja el stopper sísmico propuesto anteriormente. En ellas se presenta el caso de un stopper sísmico que restringe el desplazamiento en X (traspaso de esfuerzos de corte guía-columna de sacrificio), y que deja libre en las direcciones Y y Z el desplazamiento de la caldera colgante (análogo para el caso de stopper que restringe desplazamiento en Y de la caldera).

Dado lo anterior, una vez asignados los ejes locales se procede a asignar releases, figura 23, a la columna de sacrificio en sus dos extremos y a la guía en la unión con la columna

(guía en voladizo) con tal de representar el comportamiento real del stopper. Por lo que, la rótula generada en los extremos de la columna de sacrificio y en la unión de la guía con esta, solo permite el traspaso de corte.

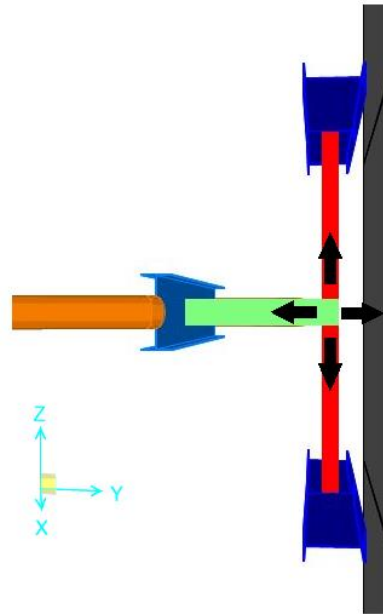


Figura 22: Grados de Libertad de los Stoppers.

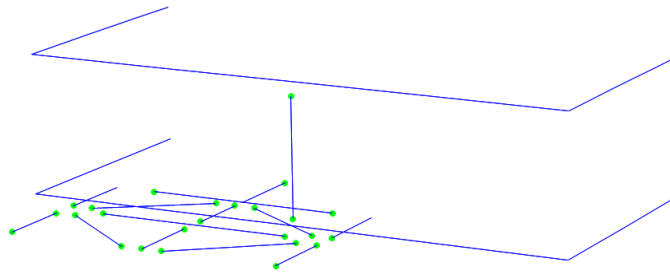


Figura 23: Releases Guía y Columna de Sacrificio.

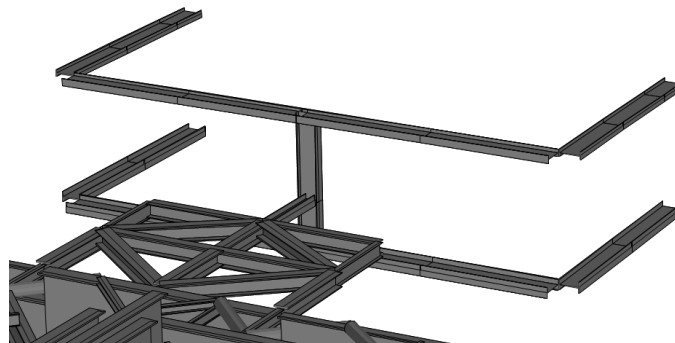


Figura 24: Simplificación en Modelo.

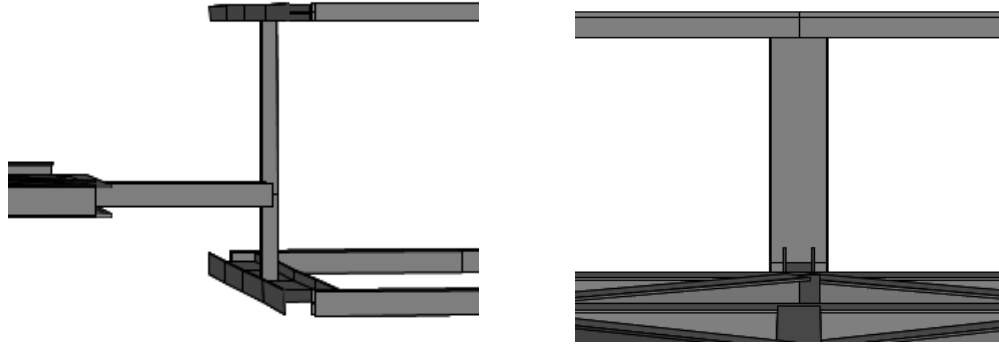


Figura 25: Propuesta de Stopper Simplificada.

La columna de sacrificio y guías se modelan como elementos tipo frame de acero de propiedades isotrópicas como sigue a continuación.

Material	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [MPa]
ASTM A572	344,738	448,159	199.947,98

Tabla 6: Propiedades del Acero.

3.5. Incorporación Interacción Suelo Estructura

El modelo integrado Fixed tiene como característica principal que las columnas que llegan al nivel de piso están empotradas en su base. Supuesto que no es muy cercano a la realidad debido a que los pedestales, MAT de fundación y suelo se deforman. Lo anterior produce un comportamiento diferente de la estructura con respecto al modelo Fixed. Figura 26, modelo que considera supuesto de columnas empotradas en la base.

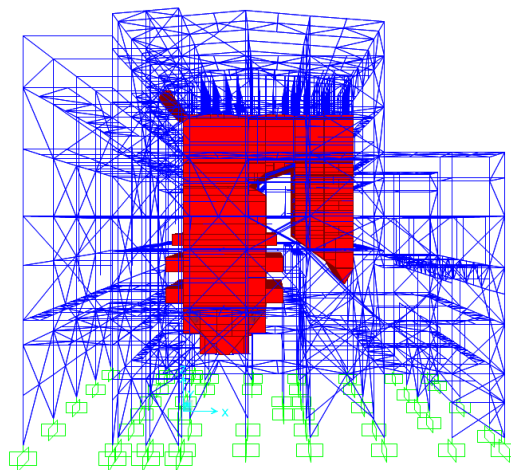


Figura 26: Modelo Integrado Fixed.

En segunda etapa del análisis se incorporó al modelo integrado la interacción suelo estructura con tal de obtener los resultados lo más cercanos a la realidad en relación a desplazamientos y esfuerzos. Modelo integrado con interacción suelo estructura (ISE)

Para modelar la interacción suelo estructura se comienza por quitar los empotramientos de la base de las columnas. El MAT de fundación se modela como elemento Shell – Thick, de hormigón y de espesor de 2,5 metros. Como sigue a continuación, son 51 columnas que llegan al suelo por lo tanto se modela cada pedestal como elemento sólido rígido de hormigón unido al joint inferior de cada columna. La geometría y distribución de los pedestales se encuentra en la tabla 7 y figura 27.

Pedestal	L [m]	B [m]	H [m]
P1	2	2	1,75
P2	2	2	1,75
P3	2,2	2,2	1,75
P4	2	2	1,75
P5	2,4	2,4	1,75
P6	1,8	1,8	1,75
P7	1,8	1,8	1,75
P8	1,45	1,45	1,75
P9	1,3	1,3	1,75
P10	2	2	1,75
P11	1,8	1,8	1,75
P12	2	2	1,75
P14	2,2	2,2	1,75
P15	1,8	1,8	1,75
P16	1,8	1,8	1,75
P17	1,6	1,6	1,75
P18	2,2	2,2	1,75
P19	2	2	1,75
P20	1,8	1,8	1,75
P21	2	2	1,75
P22	1,8	1,8	1,75
P23	1,8	1,8	1,75
P25	2	2	1,75
P26	1,45	1,45	1,75
P27	1,6	1,6	1,75
P28	2	2	1,75
P29	1,45	1,45	1,75
P30	1,6	1,6	1,75
P31	1,45	1,45	1,75

Tabla 7: Dimensiones Pedestales.

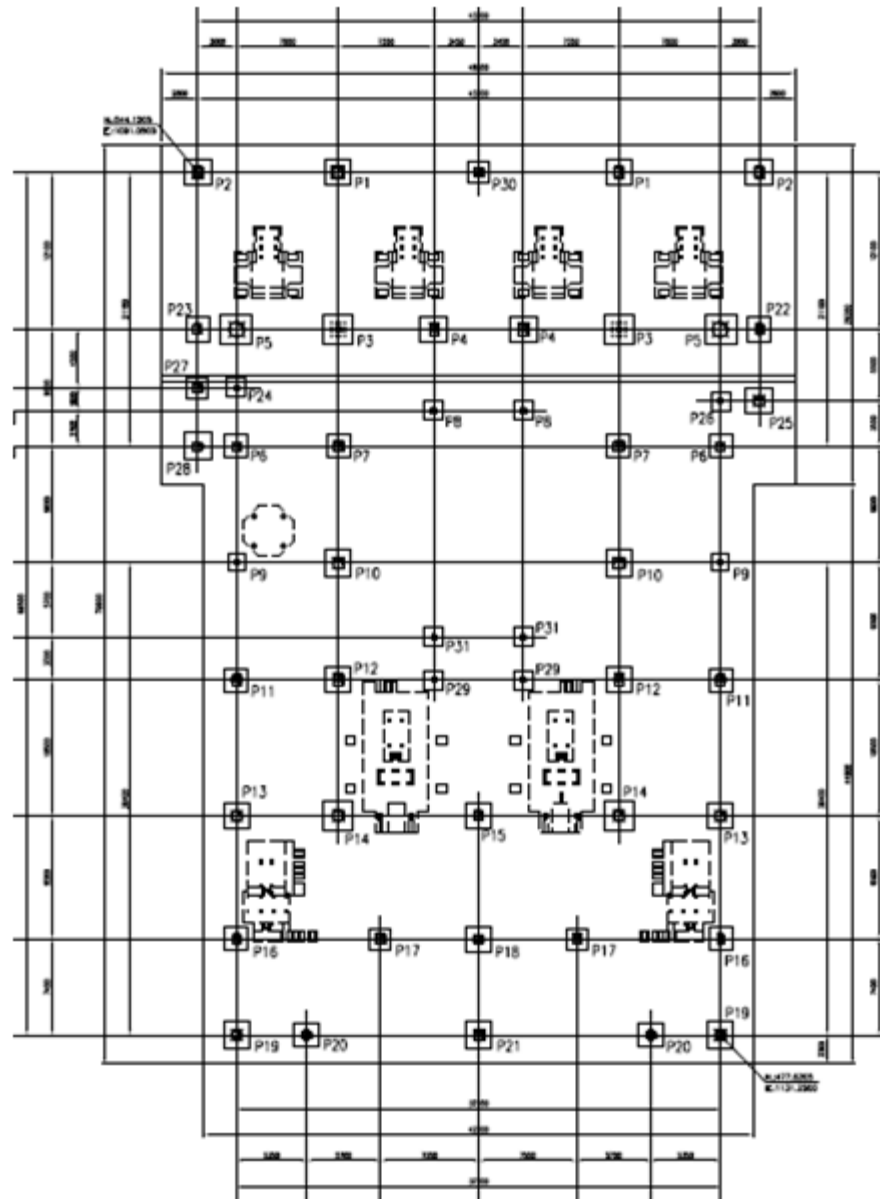


Figura 27: Distribución Pedestales y Geometría MAT.

Una vez incorporada la modelación de los pedestales y el MAT de fundación se procede a incorporar resortes que representan la rigidez del suelo.

El MAT de fundación de la caldera tiene dimensiones de largo y ancho promedio de 72 y 45 metros respectivamente. Además, existen equipos adyacentes de gran envergadura como son la fundación del turbogenerador (STG) y edificio STG produciéndose una superposición de los bulbos de presión en el suelo bajo las fundaciones. En consecuencia, la recomendación del ingeniero geotécnico, establece que el módulo de reacción del suelo es variable por lo que se procede a dividir la fundación en distintas zonas de módulo de reacción que representan el suelo, figura 28.

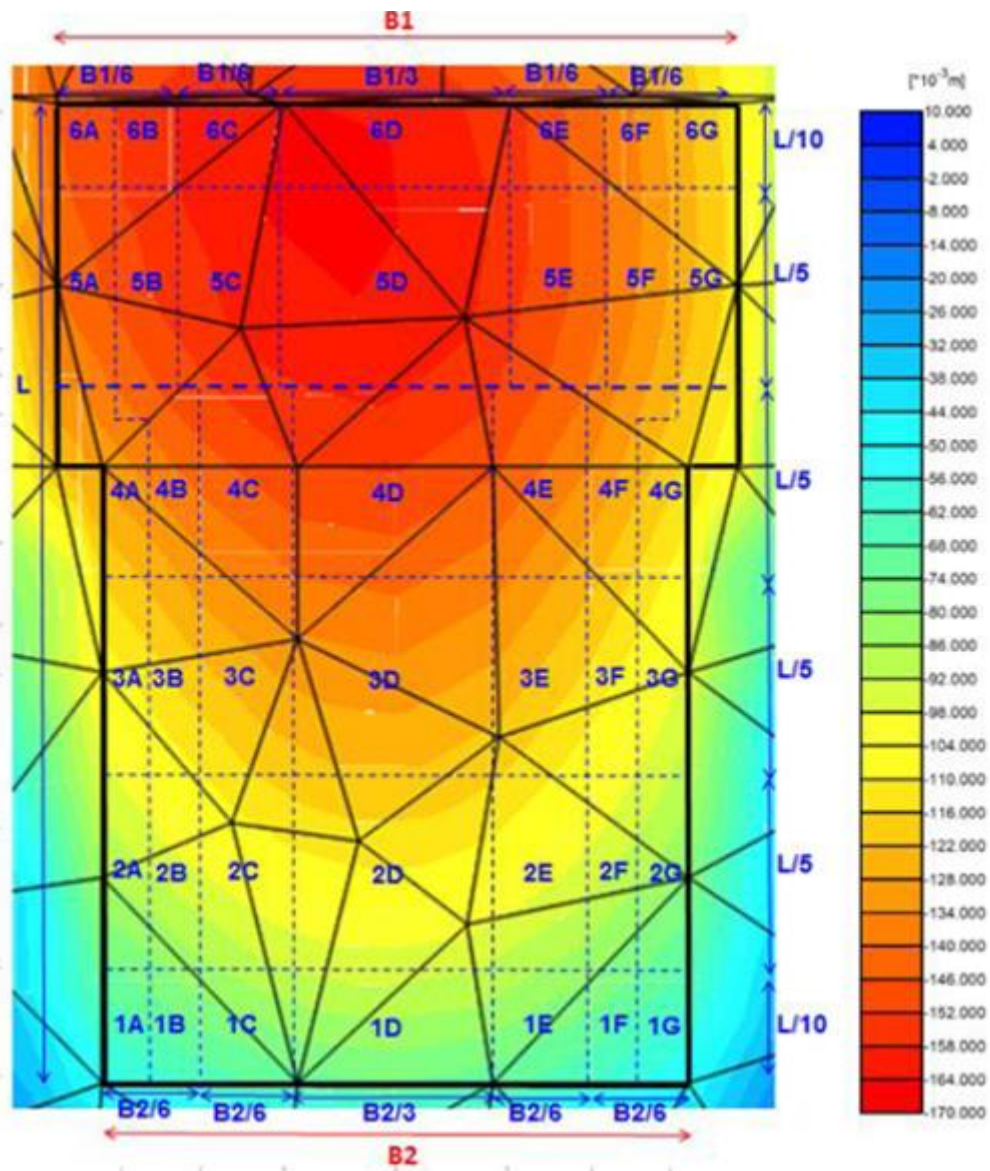


Figura 28: Zonas y asentamientos estáticos.

Cada zona tiene distinto módulo de reacción vertical (K_z). Así también, con los parámetros, módulo de deformación del suelo, poisson y sección en planta de cada zona, se calculan los resortes que restringen el movimiento lateral de la caldera (K_x , K_y).

Una vez modelado el MAT de fundación, pedestales y resortes de cada zona se da por finalizada la modelación de la interacción suelo estructura. A continuación, en la figura 29, se presenta el modelo integrado con su correspondiente interacción suelo estructura (ISE).

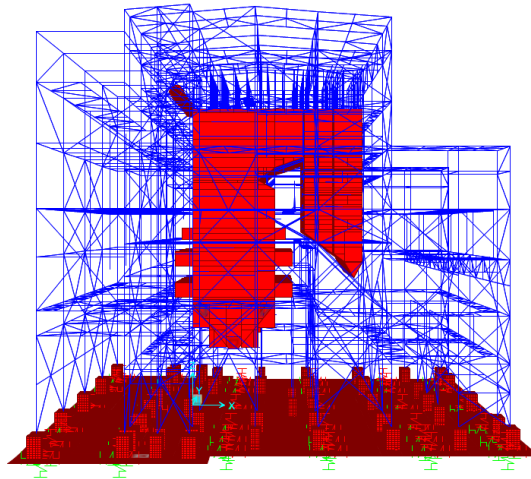


Figura 29: Modelo con Interacción Suelo Estructura (ISE)

3.5.1. Materiales

Las propiedades de los materiales de los pedestales y MAT de fundación son:

- Hormigón: H-40 con 90% de nivel de confianza.
 Resistencia a la compresión en probeta cilíndrica: $f'_c=35 \text{ MPa}$
 Módulo de Elasticidad: $E_c=27806 \text{ MPa}$
 Densidad: $w_c = 2500 \text{ kg/m}^3$
 Peso Unitario: $\gamma_h = 24.52 \text{ kN/m}^3$

- Acero de Refuerzo: A630-420H
 Tensión de Fluencia: $f_y=420 \text{ MPa}$
 Módulo de Elasticidad: $E_s= 200.000 \text{ MPa}$

3.5.2. Parámetros Geotécnicos

Las propiedades del suelo para el diseño de la fundación son:

- Angulo de fricción: $\Phi=41^\circ$
- Módulo de Poisson: $\nu=0,3$
- Coeficiente de Cohesión: $c=0 \text{ MPa}$
- Promedio de Modulo de Deformación: $E=49 \text{ MPa}$
- Tensión Admisible Estática: $q_D = 0,78 \text{ MPa}$
- Tensión Admisible Sísmica: $q_E = 1,02 \text{ MPa}$

4. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO SÍSMICO

4.1. Introducción

Actualmente existen una gran cantidad de proyectos de plantas de generación eléctrica, las que abastecen principalmente al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y al Sistema Interconectado Central (SIC), donde las estructuras y equipos de las centrales generadoras deben ser diseñadas para garantizar la continuidad operacional luego de ser sometidas a los sismos de diseño establecidos en los contratos y no menos que lo estipulado en la norma sísmica industrial NCh2369.Of.2003. Por lo tanto, las estructuras y equipos no deben presentar daños que signifiquen la interrupción de la operación de la central post sismo de diseño por períodos mayores entre dos y cuatro semanas. Para sismos de servicio más frecuentes, la central y sus equipos deben tener continuidad operacional sin interrupción de manera tal de satisfacer la demanda eléctrica.

4.2. Análisis Modal Espectral

4.2.1. Espectro de Diseño NCh2369of2003

a) Parámetros generales:

- Categoría de Riesgo de la estructura: C1
- Factor de Importancia: $I=1,2$
- Tipo de Suelo: II
- Zonificación Sísmica: Zona 3; $A_0=0,4g$
- Parámetros de diseño de espectro de respuesta: $T^*=0,35$; $n=1,33$; $\xi=3\%$
- Coeficiente sísmico máximo $C_{max}(R,\xi)$:

R	C _{max}
	$\xi = 3\%$
1,0	0,68
1,5	0,59
2,5	0,42

Tabla 8: Coeficiente Sísmico Máximo

- Factor de Modificación de Respuesta: $R=1,5$ y $R=2,5$

b) Espectro

El espectro de diseño propuesto en la norma NCh2369of2003 se define a partir de los parámetros sísmicos y lo estipulado en el capítulo 5.4.

$$S_a = \frac{2,75 \cdot A_o \cdot I}{R} \cdot \left(\frac{T}{T}\right)^n \cdot \left(\frac{0,05}{\xi}\right)^{0,4}$$

El espectro está limitado al valor de la siguiente expresión $I \cdot C_{\max} \cdot g$, por lo que el valor de la aceleración S_a no debe ser mayor a este límite. Lo anterior, se debe a una manera de evitar el sobre dimensionamiento de estructuras y así mantener un estándar de diseño dúctil.

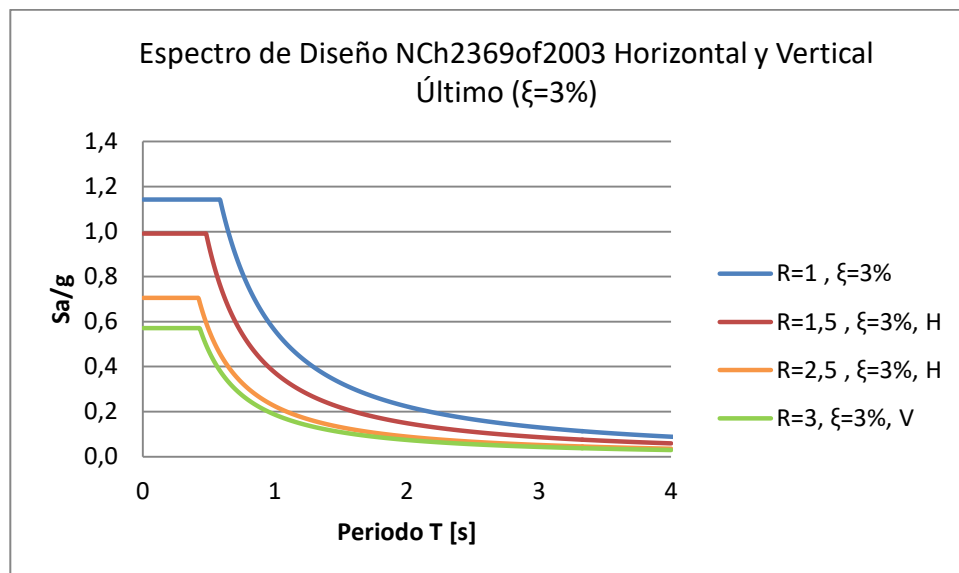


Gráfico 2: Espectro de Diseño Último NCh2369of2003 (ξ=3%).

4.2.2. Espectro de Diseño ASCE7-10

a) Parámetros generales:

- Categoría de Riesgo de la estructura: IV
- Factor de Importancia: I=1,5
- Tipo de Suelo: C
- Categoría de diseño sísmico: D
- Parámetros de diseño de espectro de respuesta: SDS=1s y SD1=0,5s
- Factor de Modificación de Respuesta: R=1,5 y R=2,5

b) Espectro:

Para determinar el espectro de aceleraciones se utilizan los parámetros generales y lo estipulado en el capítulo 11 del ASCE7-10.

Debido a que el espectro de la norma ASCE7-10 considera un amortiguamiento del 5% es que se debe adaptar el espectro para utilizar un amortiguamiento de un 4% para para el sismo vertical. A continuación, se presenta el espectro original de diseño y el adaptado para obtener los esfuerzos para el diseño de la estructura.

- Espectro ASCE7-10:

$$S_a = \begin{cases} 0,6g \cdot \frac{I}{R} & 0,1[s] \leq T \leq 0,5[s] \\ \frac{0,3}{T} g \cdot \frac{I}{R} & 0,5[s] < T \leq 1,8[s] \\ \frac{0,54}{T^2} g \cdot \frac{I}{R} & 1,8[s] < T \end{cases}$$

- Espectro ASCE7-10 Adaptado:

$$S_a = \begin{cases} 0,6g \cdot \frac{I}{R} \cdot \left(\frac{0,05}{\xi}\right)^{0,4} & 0,1[s] \leq T \leq 0,5[s] \\ \frac{0,3}{T} g \cdot \frac{I}{R} \cdot \left(\frac{0,05}{\xi}\right)^{0,4} & 0,5[s] < T \leq 1,8[s] \\ \frac{0,54}{T^2} g \cdot \frac{I}{R} \cdot \left(\frac{0,05}{\xi}\right)^{0,4} & 1,8[s] < T \end{cases}$$

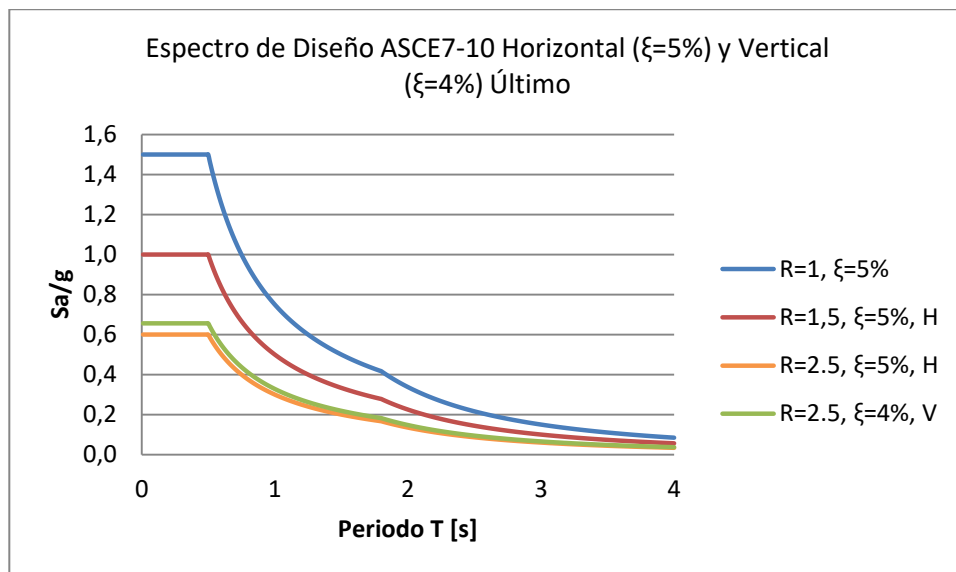


Gráfico 3: Espectro de Diseño ASCE7-10 ($\xi=4\%$ y 5%).

4.2.3. Comentarios Espectro de Diseño

La norma de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales NCh2369of2003 establece en el capítulo 1 sección 1.2 lo siguiente:

“Esta norma no se aplica a otros tipos de estructuras tales como centrales nucleares, **centrales de energía eléctrica y líneas de transmisión**, presas, tranques de relaves, puentes, túneles, muelles gravitacionales, muros de contención, líneas de ductos enterradas, etc.”

Actualmente la norma de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales NCh2369of2003 deja fuera de alcance estructuras y equipos de generación eléctrica. En consecuencia, para el diseño de este tipo de estructuras es necesario aplicar otro criterio de diseño, como el espectro propuesto por la NCh2369 actualizada, que si incluye en el capítulo 14 centrales de generación eléctrica.

Como sigue a continuación, en el gráfico 4, se presentan los espectros de diseño elásticos últimos de las normas NCh2369of2003 y ASCE7-10 para un nivel de amortiguamiento de un 3% y 5% respectivamente y en base a los parámetros generales de diseño mencionados anteriormente. Se observa que el espectro de diseño de la norma ASCE7-10 impone mayores aceleraciones que el espectro de la norma NCh2369of2003 lo que se traduce en una mayor sollicitación a la estructura y por lo tanto permite realizar un diseño más conservador.

A partir de lo anterior, se establece que para este trabajo de título el espectro de diseño a utilizar es el propuesto por la norma ASCE7-10. Ver gráfico 4.

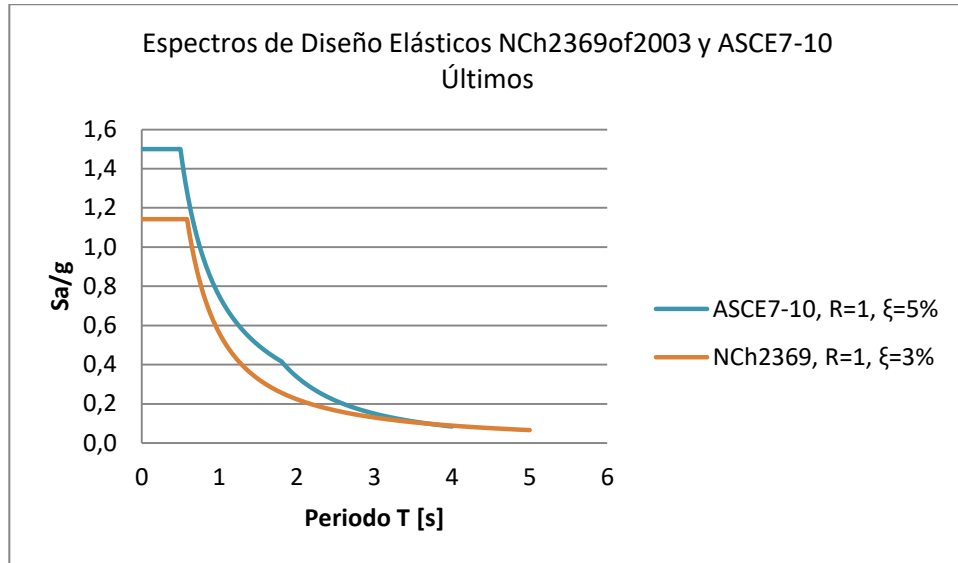


Gráfico 4: Espectros Elásticos ASCE7-10 y NCh2369of2003.

Debido a que la propuesta de diseño considera que las guías de los stoppers permanecen elásticas y las columnas de sacrificio plastifican para el sismo de diseño es necesario imponer diferentes valores del factor de modificación del espectro. Por lo que se propone para el diseño de las guías y columnas de sacrificio, $R=1,5$ y $2,5$ respectivamente.

La diferencia en el nivel de sollicitación para el diseño de ambos elementos radica principalmente en el comportamiento esperado de los stoppers en base a la propuesta de diseño. Como las guías deben permanecer siempre elásticas se diseñan para una mayor sollicitación y con ello sobredimensionar su resistencia. En cambio, se requiere que las columnas de sacrificio plastifiquen por lo que diseñan para un nivel más bajo de sollicitaciones.

La pregunta que surge es; ¿Se plastifica la columna de sacrificio? La respuesta es que el análisis modal espectral es un análisis lineal elástico, por lo que no considera el comportamiento fuera del rango elástico de los elementos. Por lo tanto, cuando un elemento o la estructura incursionan en el rango inelástico el análisis modal espectral pierde validez. Es por esto que se propone realizar una estimación de las deformaciones plásticas de las columnas de sacrificio, se verá en el capítulo 6 sección 6.5.

5. DISEÑO DE STOPPERS

5.1. Introducción

Antes de comenzar a diseñar los stoppers es necesario conocer a cabalidad la estructuración del modelo. Es por esto que en el presente capítulo se comienza por dar a conocer la disposición de las plataformas y buckstays, que cumplen un rol muy importante en la modelación de los stoppers.

Una vez comprendida la configuración de la estructura de la caldera, se propone la distribución y orientación, de las guías y columnas de sacrificio en el modelo. Dado lo anterior y de la realización del análisis modal espectral se obtienen las solicitaciones para realizar un prediseño de los stoppers.

Finalmente, se presentan los supuestos, consideraciones para el diseño y también la norma utilizada. Además, se incorpora la verificación de fluencia de las columnas de sacrificio a partir de los gráficos fuerza deformación obtenidos a partir de un análisis de pushover y diagramas momento curvatura generados a partir de las recomendaciones de la norma ASCE41-13.

5.2. Disposición Plataformas y Buckstays

La estructura de soporte horizontal está compuesta por 7 plataformas. Por lo que en cada una de ellas se pretende generar stoppers que trabajen en X o Y siempre y cuando los equipos mecánicos que van conectados a la caldera lo permitan. Las plataformas se denominan con la abreviatura PL y enumeradas desde 0 a 6 en orden ascendente siendo la primera y la última, PL0 y PL6 respectivamente. En la tabla 9 se presenta la cota correspondiente a cada plataforma.

Plataformas	Z [m]
PL0	8,9
PL1	16,9
PL2	26,2
PL3	31,1
PL4	36,5
PL5	40,1
PL6	46,5

Tabla 9: Plataformas.

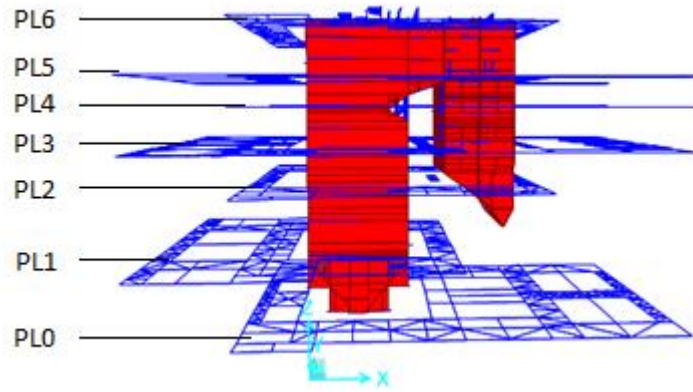


Figura 30: Plataformas

A continuación, se presenta una vista en planta de cada una de las plataformas que componen la estructura de soporte. Ver figuras 31, 32, 33, 34, 35, 36 y 37.

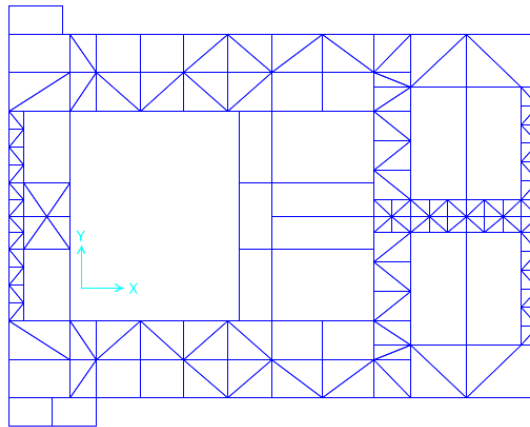


Figura 31: Plataforma - PL0.

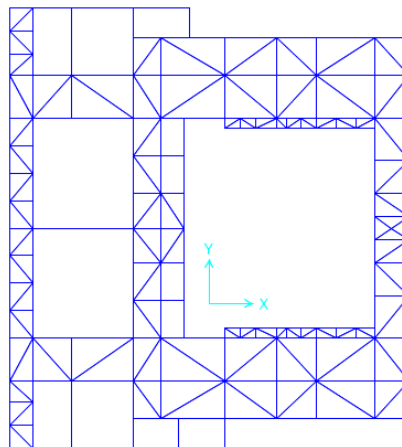


Figura 32: Plataforma - PL1.

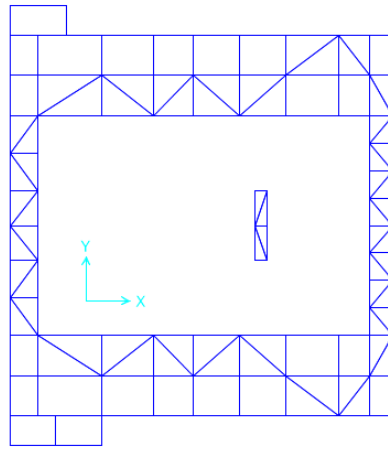


Figura 33: Plataforma - PL2.

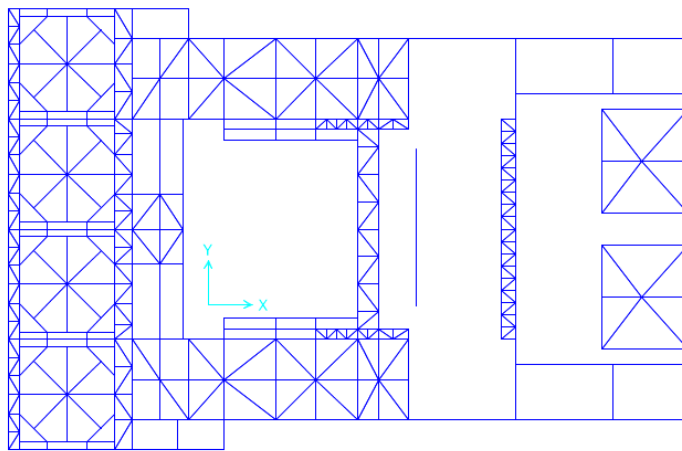


Figura 34: Plataforma - PL3.

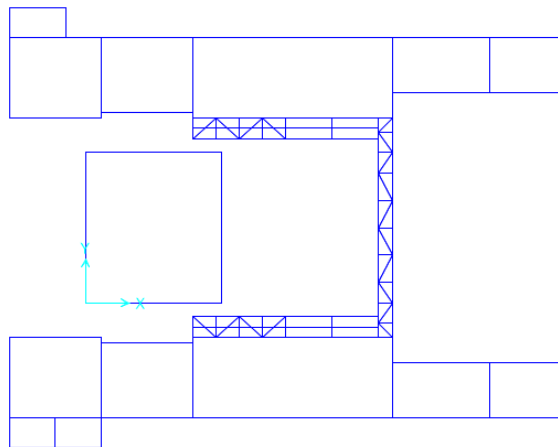


Figura 35: Plataforma - PL4.

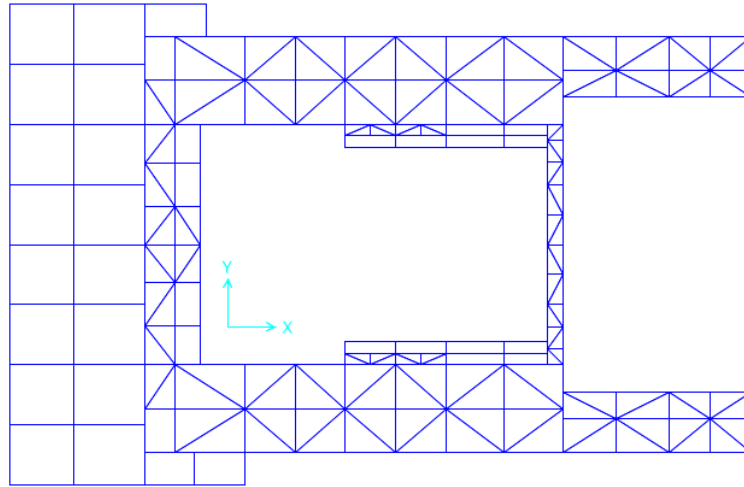


Figura 36: Plataforma - PL5.

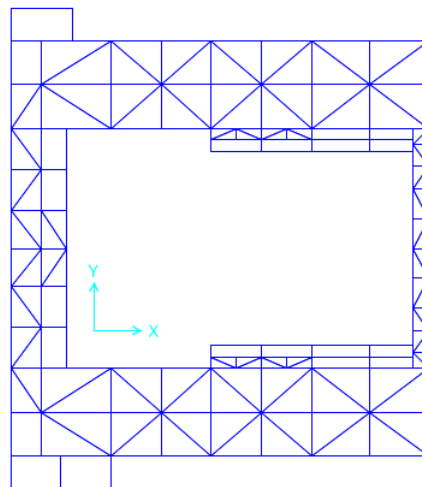


Figura 37: Plataforma - PL6.

Por su parte los buckstays, componentes del sistema de interacción estructura caldera, suman un total de 17 repartidos entre el furnace, cage o en ambos. En la tabla 10, se expone la ubicación y cota correspondiente a cada buckstay que compone la caldera. Además, en la figura 38 se presenta la ubicación de los buckstays y plataformas, en verde y azul respectivamente. El sistema de interacción estructura de soporte - caldera (plataformas - buckstays), correspondiente a los stoppers sísmicos exteriores, se presenta en las secciones 5.3.1 y 5.3.2.

Tipo	Zona	Cota [mm]
Buckstay 1	Furnace	10.900
Buckstay 2	Furnace	13.900
Buckstay 3	Furnace	16.660
Buckstay 4	Furnace	21.400
Buckstay 5	Furnace	25.190
Buckstay 6	Furnace	30.000
Buckstay 7	Cage	31.900
Buckstay 8	Furnace	33.600
Buckstay 9	Cage	33.800
Buckstay 10	Cage	35.800
Buckstay 11	Furnace	36.600
Buckstay 12	Cage	37.800
Buckstay 13	Furnace y Cage	39.800
Buckstay 14	Cage	41.200
Buckstay 15	Furnace y Cage	42.700
Buckstay 16	Cage	44.000
Buckstay 17	Furnace y Cage	45.600

Tabla 10: Zonificación Buckstays.

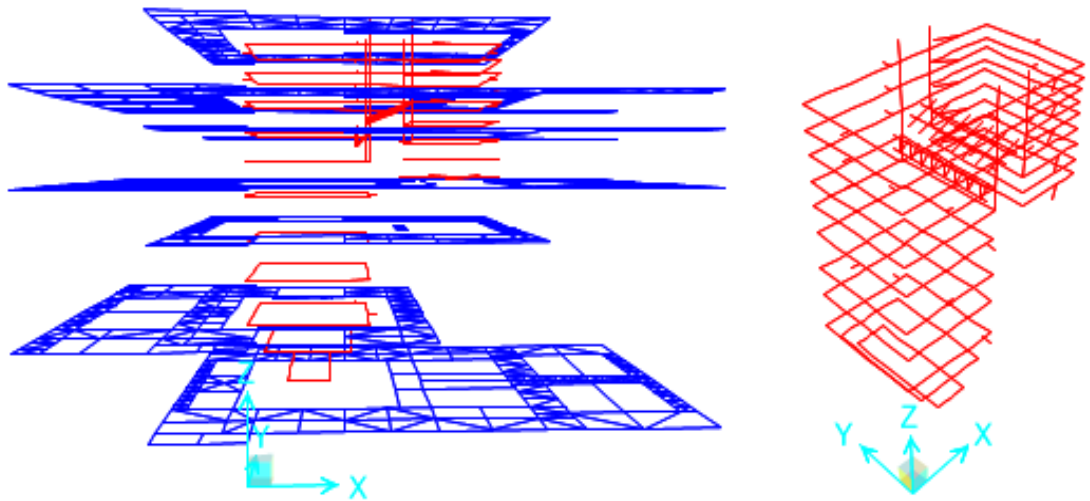


Figura 38: Buckstays.

5.3. Disposición Guías y Columnas de Sacrificio (Stoppers)

Para no intervenir los componentes mecánicos que van conectados a la caldera se debe ver la posibilidad de instalar el nuevo sistema de stoppers sísmicos, vale decir, guías saliendo desde las plataformas y columnas de sacrificio entre buckstays.

De lo anterior se propone un total de 25 stoppers, 14 en la dirección “X” y 11 en la dirección “Y”, distribuidos en 5 de las 7 plataformas.

En la presente tabla se resume la distribución de stoppers por plataforma y dirección de trabajo.

Plataforma	# RX	# RY
PL0	0	0
PL1	2	2
PL2	0	0
PL3	2	4
PL4	2	1
PL5	4	2
PL6	4	2
	14	11

Tabla 11: Distribución Stoppers por Plataforma.

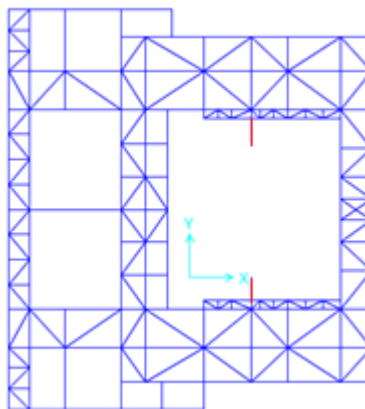


Figura 39: PL1 con Stoppers.

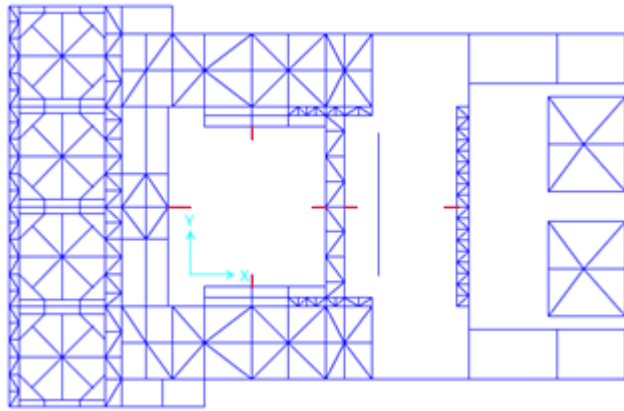


Figura 40: PL3 con Stoppers.

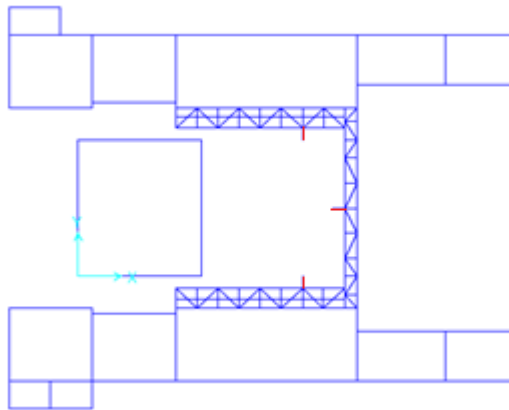


Figura 41: PL4 con Stoppers.

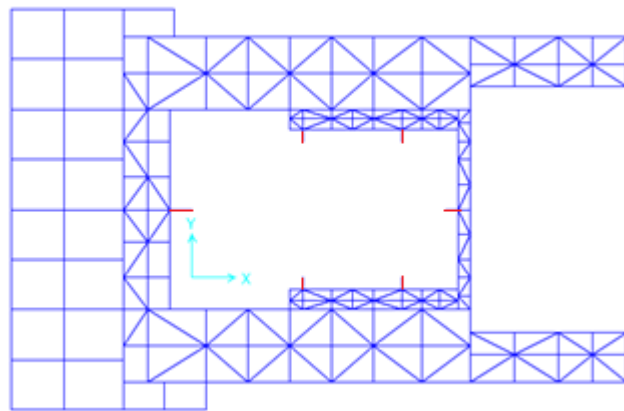


Figura 42: PL5 con Stoppers.

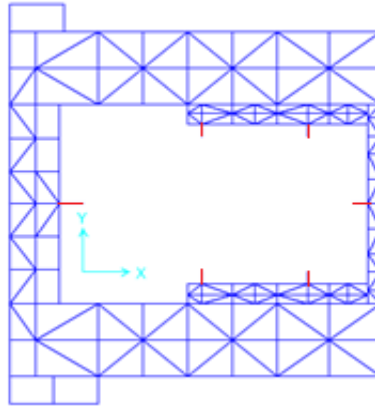


Figura 43: PL6 con Stoppers.

El objetivo de los stoppers es evitar el daño de la caldera y de sus componentes internos mediante un control de los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte frente a un sismo. Por lo tanto, es insuficiente si solo se utiliza el tipo de stopper propuesto en el capítulo 3 sección 3.3 para controlar los desplazamientos. En consecuencia, surge la necesidad de implementar un tipo más de stoppers que no se presentó anteriormente pero que de igual forma tiene como base un elemento de sacrificio que plastifica de forma controlada y un elemento que siempre permanece elástico. A continuación, en las figuras 44 y 45, se presentan los dos tipos de stoppers sísmicos exteriores modelados.

5.3.1. Stopper Tipo I

Sistema compuesto por guías en cantiléver que nacen desde la plataforma y una columna de sacrificio con apoyos fijos entre dos buckstays, este corresponde a la propuesta de diseño realizada en la sección 3.4. En la figura 42 se presenta este tipo de stopper con la simplificación de las guías en el modelo.

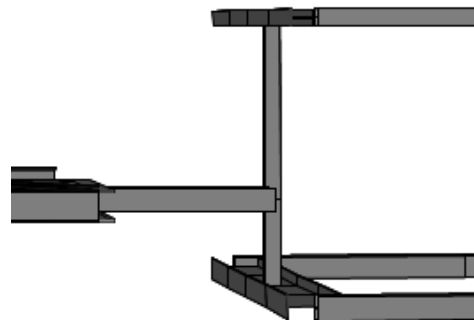


Figura 44: Stopper Tipo I.

5.3.2. Stopper Tipo II

Sistema compuesto por guías en cantiléver que nacen desde la plataforma y una columna de sacrificio empotrada en un solo buckstay. Este tipo de stopper se utilizó solo en casos estrictamente necesarios, es decir, casos en que las plataformas, buckstays o equipos mecánicos impiden la instalación de un stopper tipo I. Al igual que en el caso anterior presenta este tipo de stopper con la simplificación de las guías en el modelo. Ver figura 43.

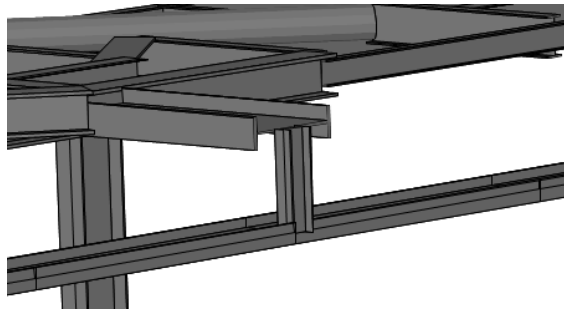


Figura 45: Stopper Tipo II.

5.4. Solicitaciones para Diseño

Una vez incorporados los stoppers en el modelo integrado se procede a realizar el análisis modal espectral a la estructura en el programa de elementos finitos para obtener los esfuerzos que permitirán realizar el diseño de las columnas de sacrificio y guías de los stoppers. Esta etapa corresponde a un proceso iterativo en el que la rigidez de los stoppers se varía hasta que los esfuerzos y deformaciones sean consistentes con el comportamiento esperado para el sistema de stoppers de la caldera. Se espera que las columnas de sacrificio plastifiquen y que la caldera se desplace en forma controlada. Por lo tanto, se controla el traspaso de carga sísmica a la caldera colgante y sus componentes internos a presión.

Se realiza el análisis en dos modelos, uno con interacción suelo estructura (pedestales, MAT de fundación y suelo) y otro en el que las columnas están empotradas en la base. La finalidad de estudiar estos dos modelos es dar a conocer la importancia que tiene incorporar a un modelo integrado la interacción suelo estructura a partir de la influencia que tiene en los resultados. A continuación se presentan los dos modelos analizados. Ver figura 46.

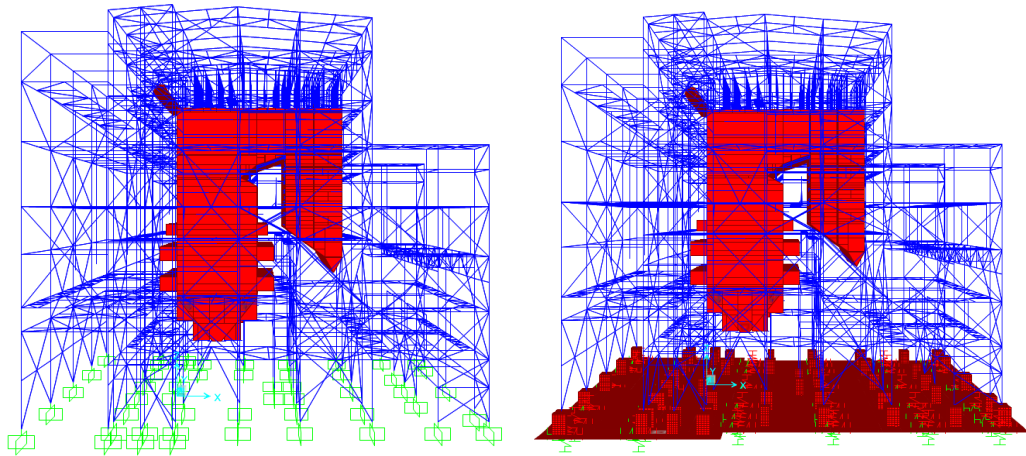


Figura 46: Modelo Integrado Fixed y ISE.

Para el análisis se utiliza el espectro de diseño de la norma ASCE7-10 para dos factores de modificación de respuesta $R=2,5$ y $1,5$, en ambas direcciones horizontales y $R=2,5$ vertical. Ver gráfico 5.

A partir del análisis se obtiene los esfuerzos para el diseño de los stoppers para los dos sismos de diseño reducidos. En la tabla 12 se presenta la sollicitación correspondiente a cada stopper según plataforma.

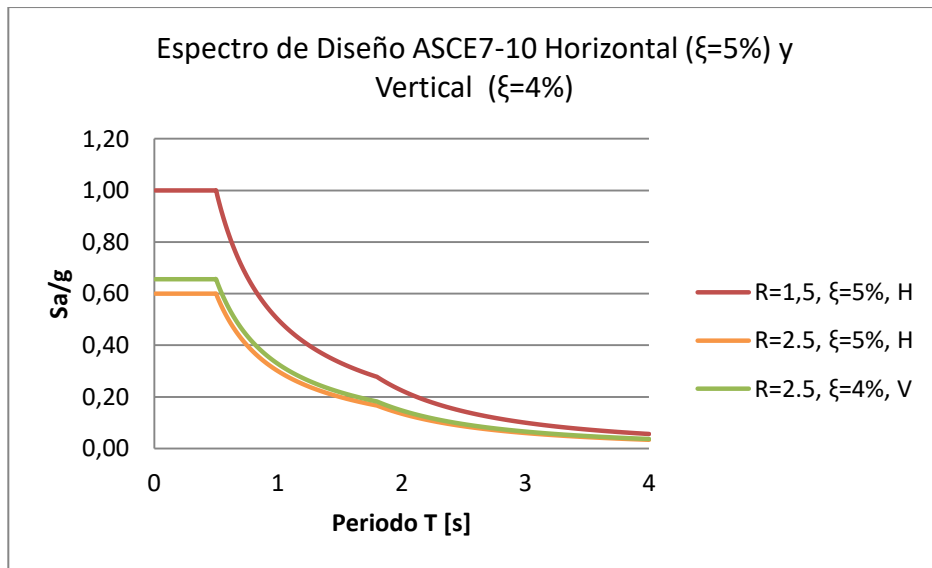


Gráfico 5: Espectros Análisis Modal Espectral.

		R=2,5		R=1,5	
		Fixed	ISE	Fixed	ISE
Plataforma	Stopper	F [tonf]	F [tonf]	F [tonf]	F [tonf]
PL1	RX1-1	31,7	34,3	52,8	57,2
	RX1-2	31,7	34,2	52,8	57,1
	RY1-1	203,2	185,7	338,4	309,5
	RY1-2	276,9	255,1	461,6	425,1
PL3	RX3-1	27,6	29,8	46,2	49,7
	RX3-2	27,5	29,7	45,8	49,5
	RY3-1	37,4	14,9	62,4	24,8
	RY3-2	94,7	70,1	157,9	116,8
	RY3-3	87,6	59,4	146,1	99,0
	RY3-4	69,4	54,6	115,6	91,0
PL4	RX4-1	28,6	30,9	47,6	51,4
	RX4-2	28,5	30,7	47,5	51,2
	RY4-1	164,8	112,2	258,1	186,9
PL5	RX5-1	39,1	46,3	65,2	77,1
	RX5-2	39,2	42,3	65,3	70,4
	RX5-3	42,7	46,0	71,2	76,7
	RX5-4	39,1	42,2	65,2	70,3
	RY5-1	36,5	12	60,8	20,0
	RY5-2	121,7	81,3	202,8	133,4
PL6	RX6-1	40,7	43,8	67,8	73,0
	RX6-2	28,9	31,1	48,2	51,9
	RX6-3	40,5	43,7	67,6	72,8
	RX6-4	28,8	31	48,0	51,7
	RY6-1	35,3	13,7	58,97	22,7
	RY6-2	36,2	17,8	60,30	29,7

Tabla 12: Fuerzas Solicitantes para Diseño.

Se observa que los esfuerzos obtenidos para un factor de modificación de respuesta $R=1,5$ son mayores aproximadamente en 1,67 veces respecto a los obtenidos para $R=2,5$. Recordar, que el factor de importancia es $I=1,5$ y la forma del espectro ASCE7-10 es del tipo $S_a I/R$, por lo tanto para llevar de un espectro a otro basta con multiplicar por el factor $R/I=1,67$ y se obtiene como resultado los esfuerzos para el espectro elástico.

- Espectro elástico: $S_a \cdot \frac{I}{R} = S_a \cdot \frac{1,5}{1,5} = S_a$
- Espectro inelástico: $S_a \cdot \frac{I}{R} = S_a \cdot \frac{1,5}{2,5} = \frac{S_a}{1,67}$

Complementando lo anterior otro aspecto que es importante destacar es la influencia de la interacción suelo estructura en la orientación de los stoppers ya que se observa que los esfuerzos aumentan un 8% aproximadamente para los stoppers que trabajan en la dirección X y una disminución desde un 30% hasta un 60% para los stoppers que trabajan en la dirección Y.

De los resultados obtenidos de aumentos y disminuciones de cargas sísmicas en los sistemas de stoppers sísmicos, en principio se puede comentar:

- Con el modelo Fixed se podría realizar el diseño de la estructura de soporte de la caldera y su envío a fabricación (actividad crítica en contratos EPC).
- Con el modelo ISE, hay un aumento de solicitaciones sísmicas en el sistema de stoppers del 8% en el sentido X (longitudinal) y una importante disminución de entre un 30% hasta un 60% en el sentido Y (transversal).
- Un aumento de solicitaciones sísmicas de un 8% en stoppers y estructura de acero, entre el modelo Fixed y modelo ISE, probablemente en la verificación final cumplirá la estructura de acero fabricada a partir del modelo Fixed o en caso de ser requerido en algunos elementos estructurales se deberá realizar refuerzos en terreno.
- El diseño y verificación de los componentes mecánicos y a presión del equipo bajo norma ASME, se debe realizar con el modelo ISE.

5.5. Diseño Stoppers

La propuesta de diseño de los stoppers establece que la columna de sacrificio debe plastificar y que las guías permanezcan siempre elásticas. Dado lo anterior se debe realizar un diseño que asegure incursión en el rango inelástico de la columna de sacrificio y elasticidad de las guías.

La metodología que se propone es diseñar las guías para los esfuerzos obtenidos a partir del espectro con $R=1,5$ y así obtener una sobre resistencia por parte de estas, con lo que se asegura un comportamiento elástico. A su vez, las columnas de sacrificio deben plastificar para las solicitaciones obtenidas a partir del espectro de diseño con $R=2,5$. Además, se propone diseñar secciones compactas para obtener una respuesta dúctil cuando se supera el límite elástico como ocurre en el caso de las columnas. Se presenta, en el gráfico 6, la influencia del comportamiento de una sección de acuerdo al nivel de esbeltez.

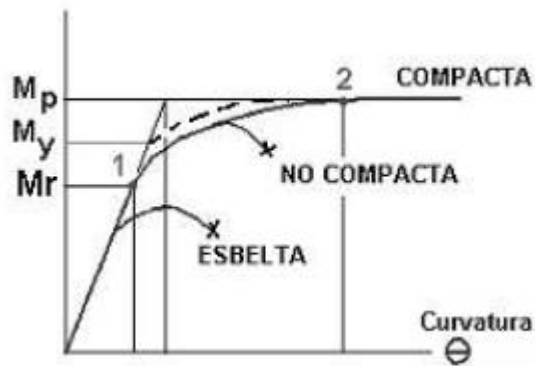


Gráfico 6: Comportamiento según nivel de esbeltez.

El diseño de las guías se realiza mediante la norma AISC360-10 y para un factor de utilización máximo $FU \leq 1,05$, tanto para corte como para flexión. Además, se utiliza la mayor solicitación entre los modelos sin y con interacción suelo estructura para un factor de modificación de respuesta $R=1,5$.

Lo que sigue es diseñar las columnas de sacrificio, pero la pregunta que surge es, ¿Cómo diseñar un elemento para que entre en el rango inelástico y que tenga un comportamiento controlado?

Se propone diseñar preliminarmente mediante la norma AISC360-10 cumpliendo con las siguientes condiciones:

- Sección Compacta.
- $M_y \leq M_{solicitante}$
- $FU \leq 3$ para Flexión y Corte

La primera condición exige proponer secciones que presenten una respuesta dúctil cuando se supera el límite de fluencia. La segunda, asegurar que la sección entre en el rango inelástico. Y por último, la tercera propone un límite superior para controlar el uso de secciones que puedan llegar a la rotura para el momento solicitante. De lo anterior se obtiene una referencia de las dimensiones de la sección de la columna de sacrificio. Cabe destacar que si se impone que $FU \leq 1,05$ producto de los factores de reducción de la norma la sección diseñada para este nivel de esfuerzos no incursiona en el rango de plastificación.

Luego, para comprobar el comportamiento y cuantificar la plastificación de cada elemento se propone generar los diagramas momento curvatura utilizando la metodología recomendada por la norma ASCE41-13 y curva fuerza deformación a partir de un análisis de pushover. Para el diseño se considera la mayor carga entre los modelos Fixed y ISE para $R=2,5$. Las planillas de cálculo se adjuntan en el capítulo Anexos sección A3.

El análisis de pushover es un método de análisis no lineal estático en el que la estructura se somete a una deformación controlada que aumenta monótonamente a través del estado elástico e inelástico hasta alcanzar el estado último. A continuación, en la figura 47, se presenta un esquema del análisis en el que se evidencia un aumento de la deformación hasta que la columna llega al estado último. Lo anterior, permite obtener la curva fuerza deformación ($F-\Delta$) y con ella comprobar si el elemento plastifica para el nivel de esfuerzos $F(R=2,5)$. La metodología que se utilizó para el análisis de pushover se adjunta en el capítulo de Anexos sección A5.

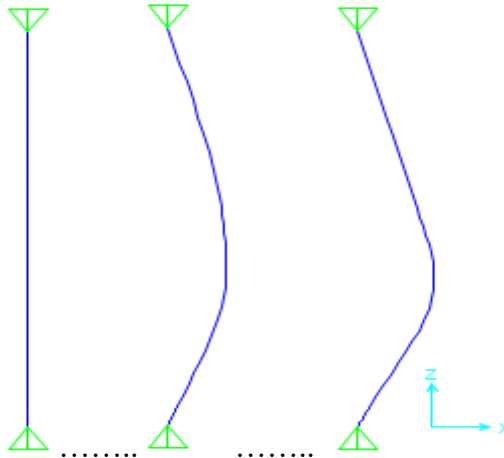


Figura 47: Esquema Análisis de Pushover.

5.5.1. Columnas de Sacrificio

A continuación, en la tabla 13, se presenta la sección que corresponde a cada una de las columnas de sacrificio a partir de la metodología anteriormente mencionada. Los perfiles propuestos en la tabla se obtienen a partir de las planillas de cálculo que se adjuntan en el capítulo Anexos secciones A1 y A2.

Plataforma	Stopper	H [mm]	B [mm]	tw [mm]	tf [mm]	FU Flexión	FU Corte
PL1	RY1-1	500	200	16	20	1,717	2,152
	RY1-2	500	250	16	20	2,012	2,958
	RX1-1	200	140	6	9	1,713	2,305
	RX1-2	200	140	6	9	1,713	2,305
PL3	RX3-1	300	200	6	9	1,749	0,948
	RX3-2	300	200	6	9	1,749	0,948
	RY3-1	300	200	9	12	1,608	0,797
	RY3-2	450	250	10	14	1,711	1,141
	RY3-3	400	250	10	14	1,844	1,916
	RY3-4	400	200	9	14	1,749	1,655
PL4	RX4-1	250	140	6	9	1,754	1,051
	RX4-2	250	140	6	9	1,754	1,051
	RY4-1	450	250	10	14	3,046	1,849
PL5	RX5-1	250	140	6	9	1,787	2,235
	RX5-2	200	140	6	9	2,965	2,138
	RX5-3	250	140	6	9	1,787	2,235
	RX5-4	200	140	6	9	2,965	2,138
	RY5-1	200	140	6	9	1,840	2,216
	RY5-2	300	200	9	12	2,994	2,820
PL6	RX6-1	400	200	9	12	1,656	1,053
	RX6-2	300	200	6	11	1,835	1,424
	RX6-3	400	200	9	12	1,656	1,053
	RX6-4	300	200	6	11	1,835	1,424
	RY6-1	300	180	10	14	1,828	1,048
	RY6-2	300	180	10	14	1,828	1,048

Tabla 13: Dimensiones Columnas de Sacrificio.

A continuación se presentan las curvas fuerza deformación ($F-\Delta$) y momento curvatura ($M-\phi$) para cada elemento según plataforma. Cada curva se intersecta con el nivel de esfuerzos solicitante para el sismo Y se intersecta con los niveles de esfuerzos para sismo de servicio y de diseño para determinar el comportamiento del elemento. Recordar que el sismo de diseño corresponde al espectro ASCE7-10 para un factor de modificación de respuesta $R=2,5$ y el sismo de servicio corresponde al 20% del sismo elástico, niveles de esfuerzos en naranja y verde respectivamente.

- PL1: Diagramas momento curvatura y curvas pushover.

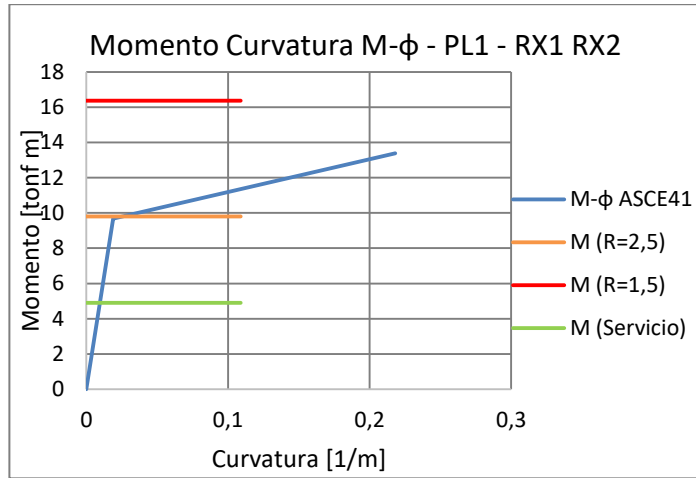


Gráfico 7: Momento Curvatura M-φ - PL1 - RX1 RX2.

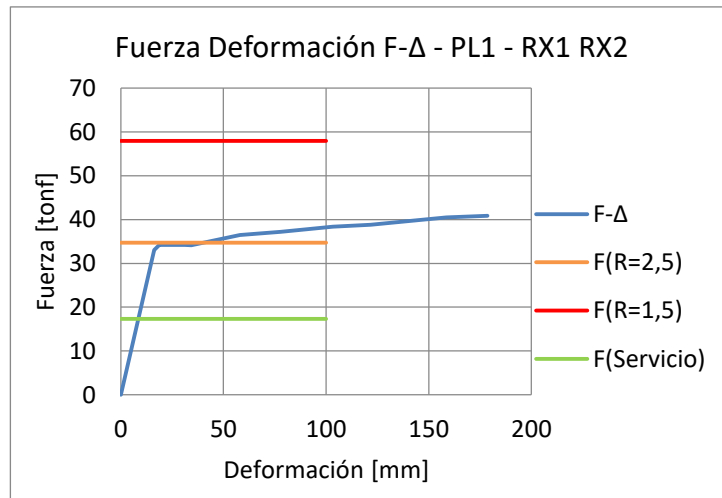


Gráfico 8: Fuerza Deformación F-Δ - PL1 - RX1 RX2.

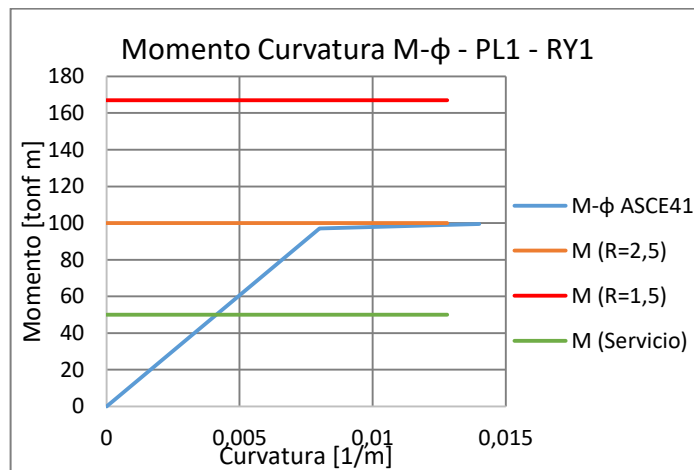


Gráfico 9: Momento Curvatura M-φ - PL1 - RY1.

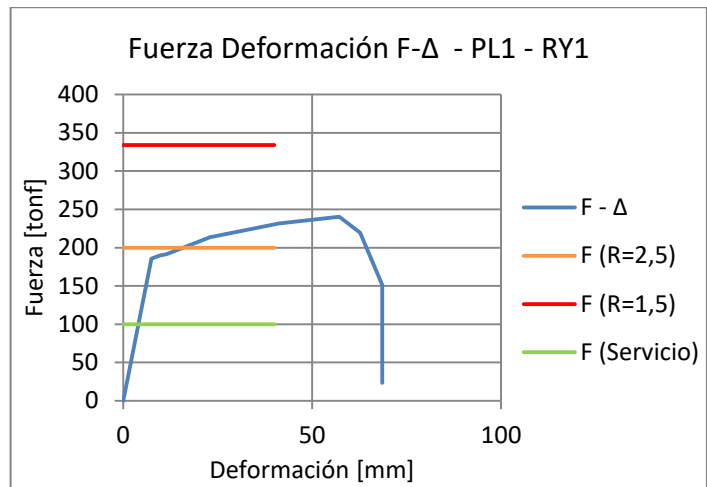


Gráfico 10: Fuerza Deformación F- Δ - PL1 - RY1.

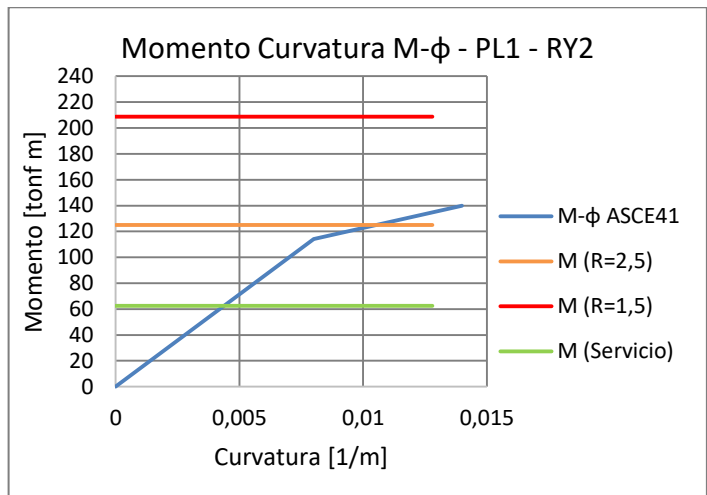


Gráfico 11: Momento Curvatura M- ϕ - PL1 - RY2.

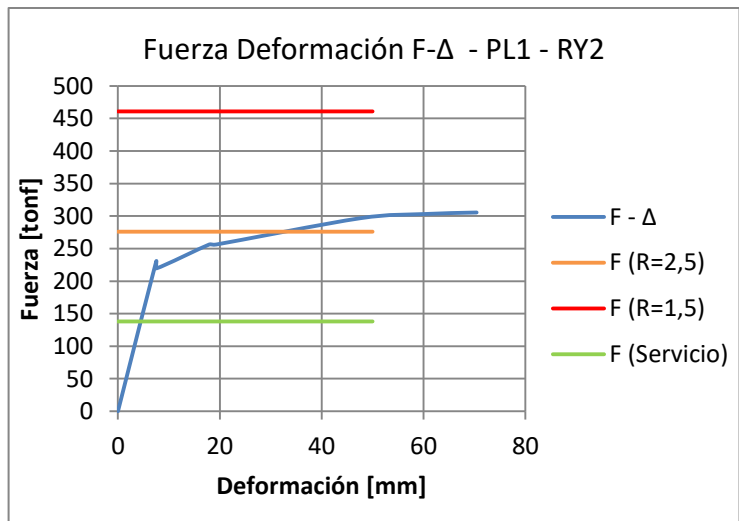


Gráfico 12: Fuerza Deformación F- Δ - PL1 - RY2.

- PL3: Diagramas momento curvatura y curvas pushover.

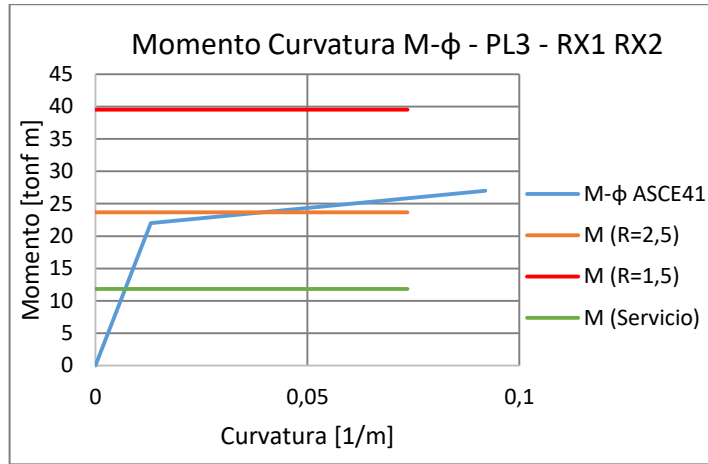


Gráfico 13: Momento Curvatura M-φ - PL3 - RX1 RX2.

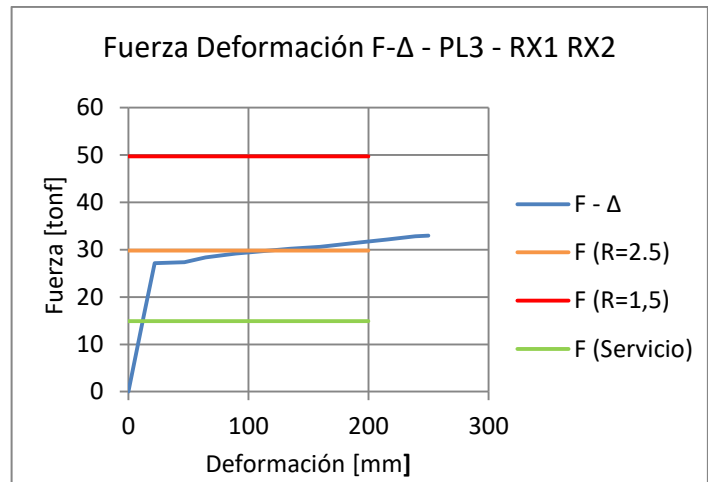


Gráfico 14: Fuerza Deformación F-Δ - PL3 - RX1 RX2.

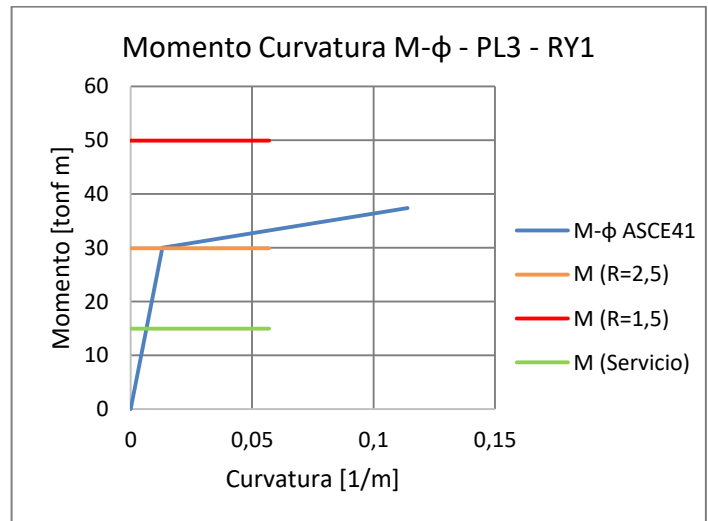


Gráfico 15: Momento Curvatura M-φ - PL3 - RY1.

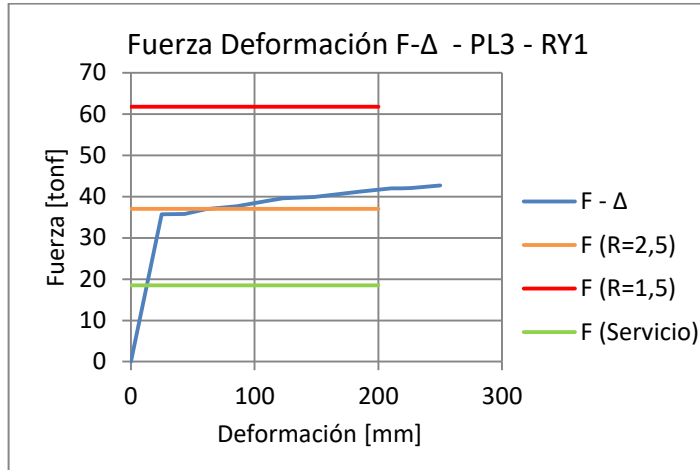


Gráfico 16: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY1.

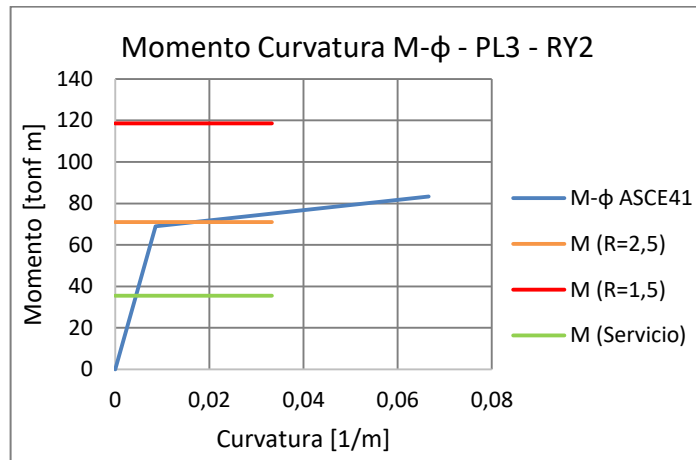


Gráfico 17: Momento Curvatura M- ϕ - PL3 - RY2.

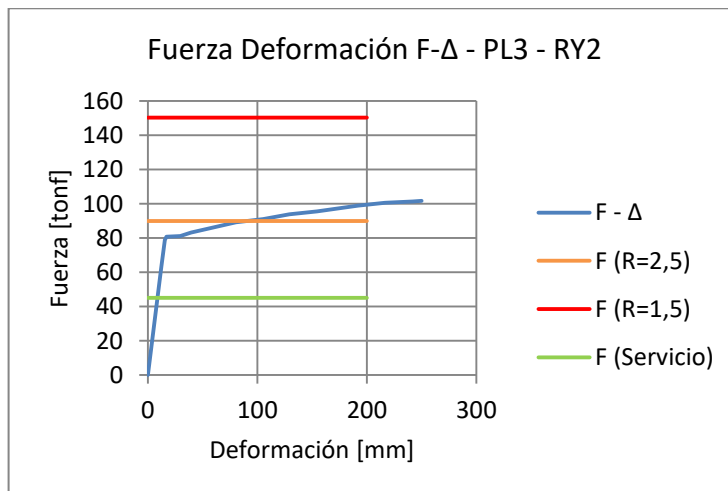


Gráfico 18: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY2.

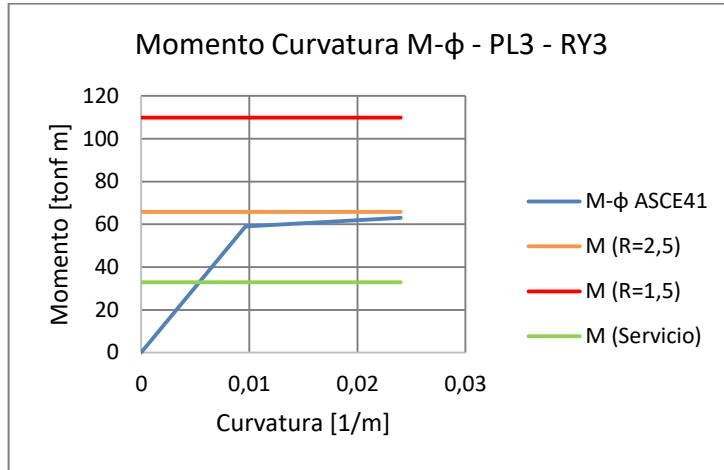


Gráfico 19: Momento Curvatura $M-\phi$ - PL3 - RY3.

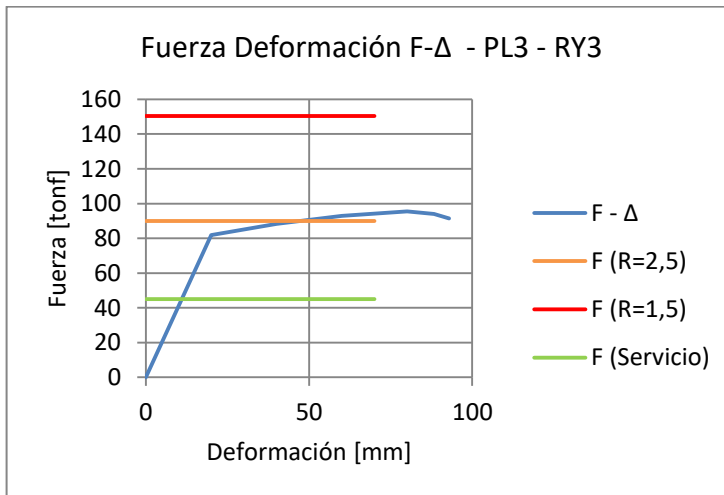


Gráfico 20: Fuerza Deformación $F-\Delta$ - PL3 - RY3.

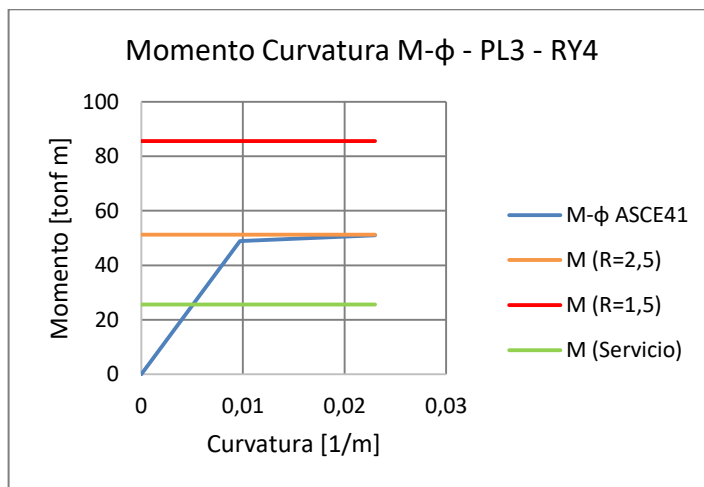


Gráfico 21: Momento Curvatura $M-\phi$ - PL3 - RY4.

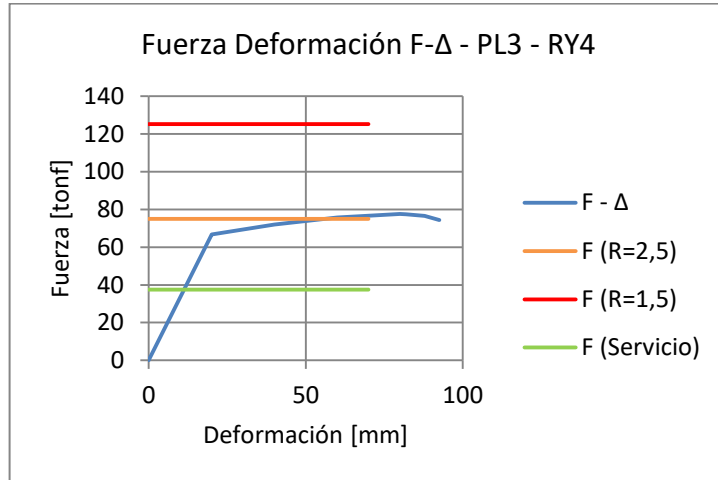


Gráfico 22: Fuerza Deformación F- Δ - PL3 - RY4.

- PL4: Diagramas momento curvatura y curvas pushover.

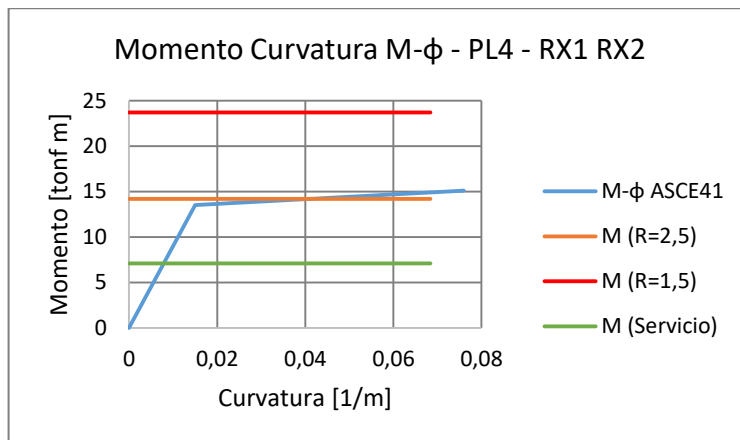


Gráfico 23: Momento Curvatura M- ϕ - PL4 - RX1 RX2.

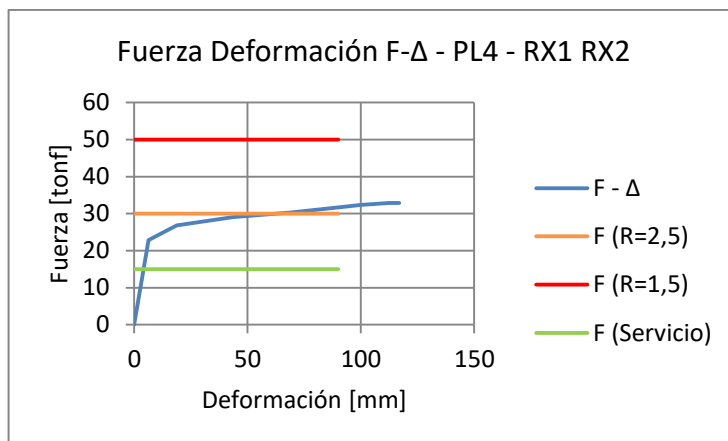


Gráfico 24: Fuerza Deformación F- Δ - PL4 - RX1 RX2.

- PL5: Diagramas momento curvatura y curvas pushover.

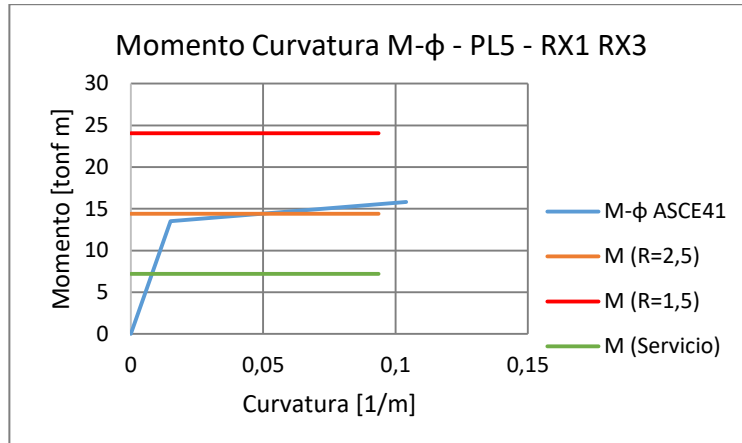


Gráfico 25: Momento Curvatura M-φ - PL5 - RX1 RX3.

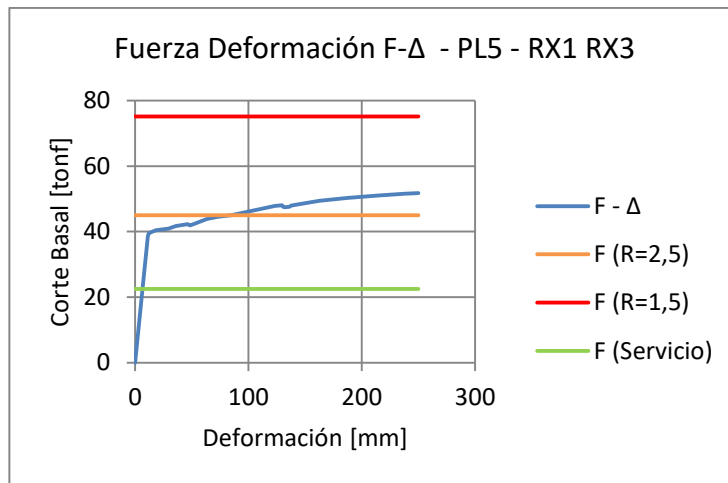


Gráfico 26: Fuerza Deformación F-Δ - PL5 - RX1 RX3.

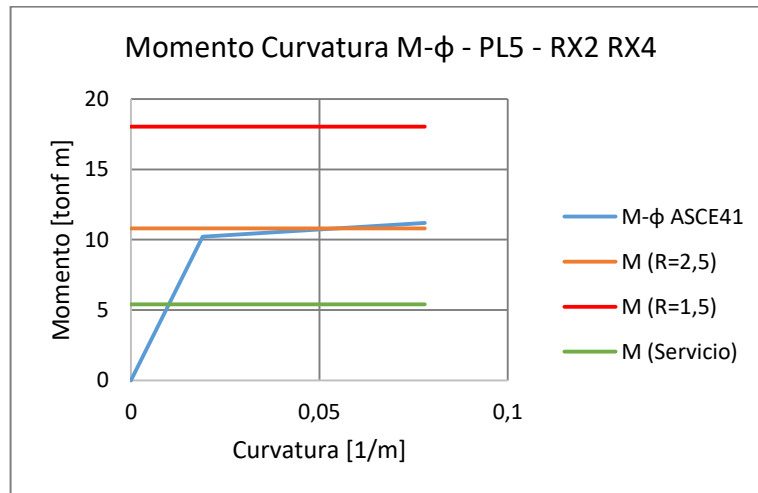


Gráfico 27: Momento Curvatura M-φ - PL5 - RX2 RX4.

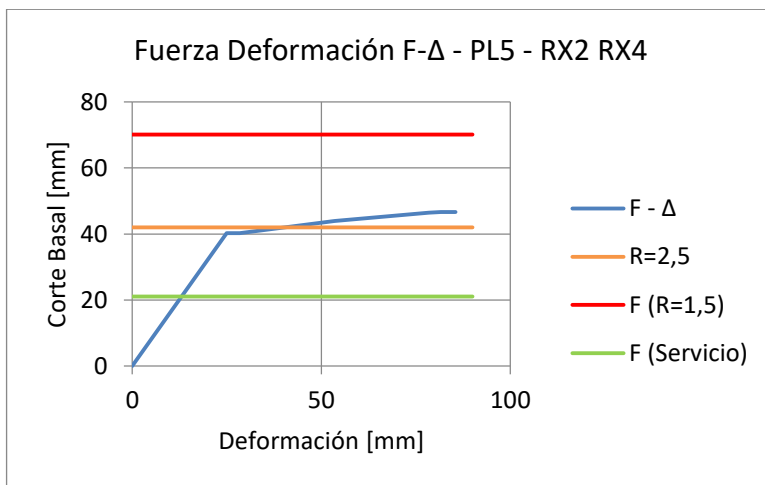


Gráfico 28: Fuerza Deformación F- Δ - PL5 - RX2 RX4.

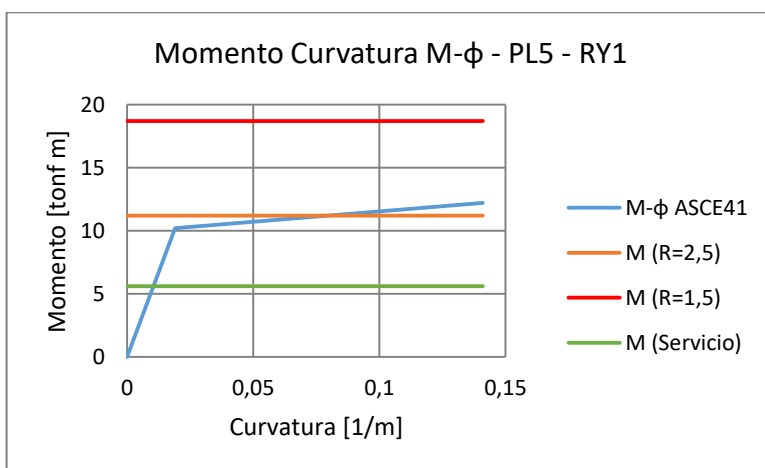


Gráfico 29: Momento Curvatura M- ϕ - PL5 - RY1.

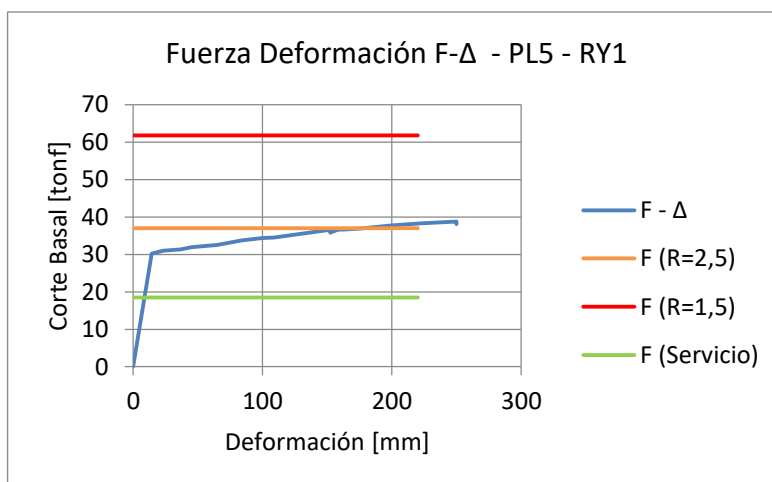


Gráfico 30: Fuerza Deformación F- Δ - PL5 - RY1.

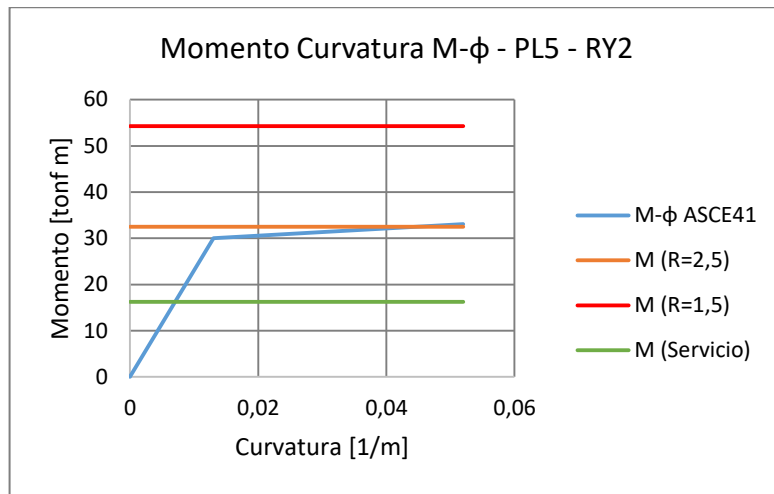


Gráfico 31: Momento Curvatura M-φ - PL5 - RY2.

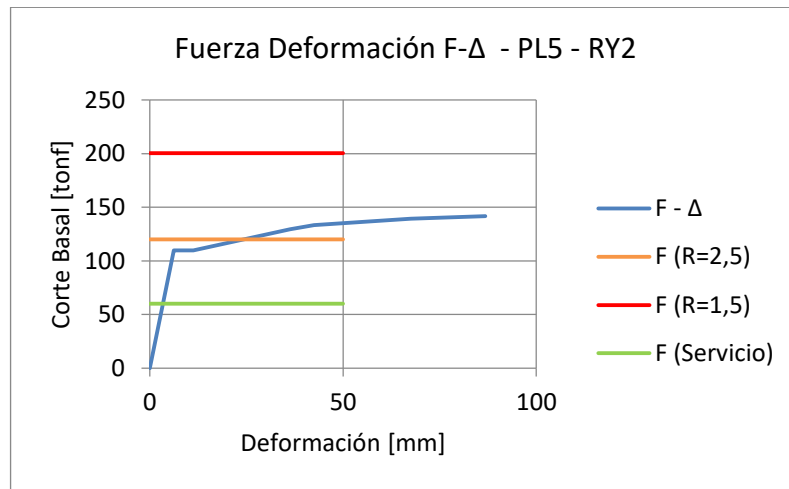


Gráfico 32: Fuerza Deformación F-Δ - PL5 - RY2.

- PL6: Diagramas momento curvatura y curvas pushover.

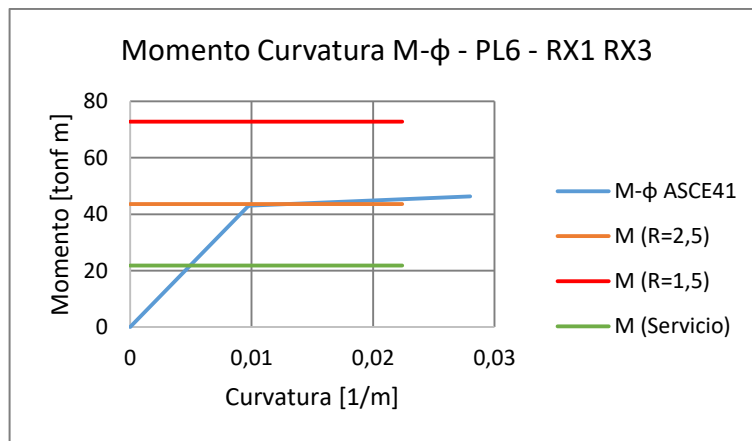


Gráfico 33: Momento Curvatura M-φ - PL6 - RX1 RX3.

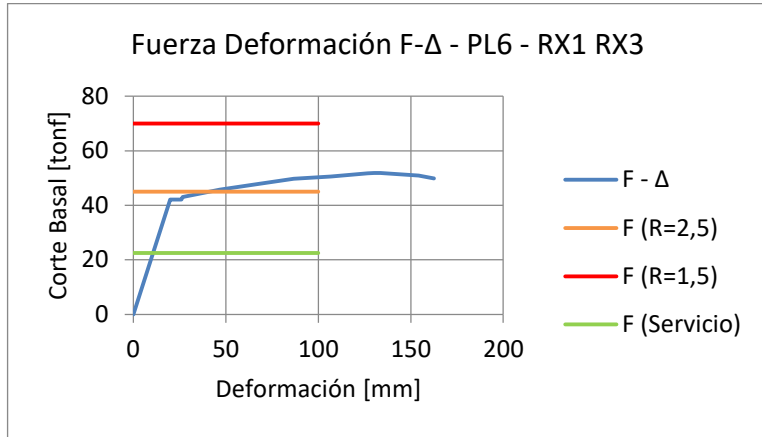


Gráfico 34: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RX1 RX3.

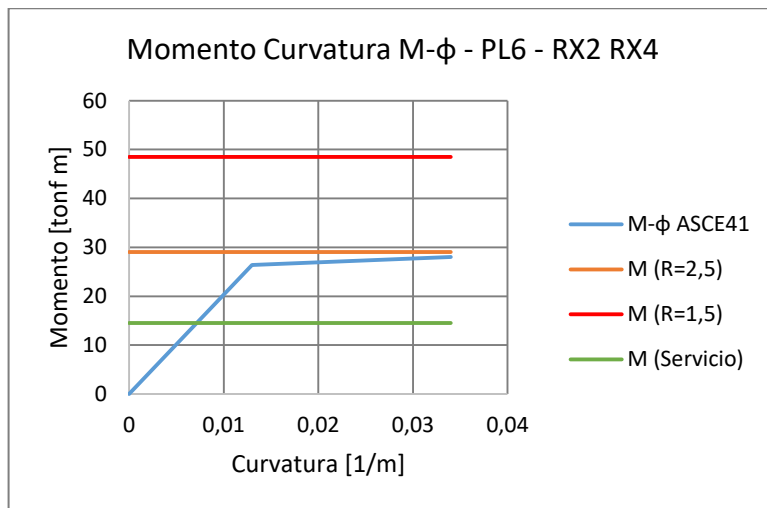


Gráfico 35: Momento Curvatura M- ϕ - PL6 - RX2 RX4.

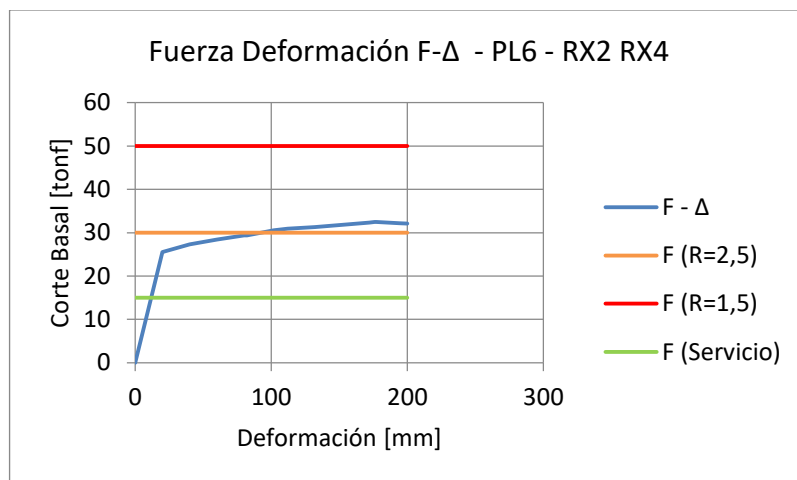


Gráfico 36: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RX2 RX4.

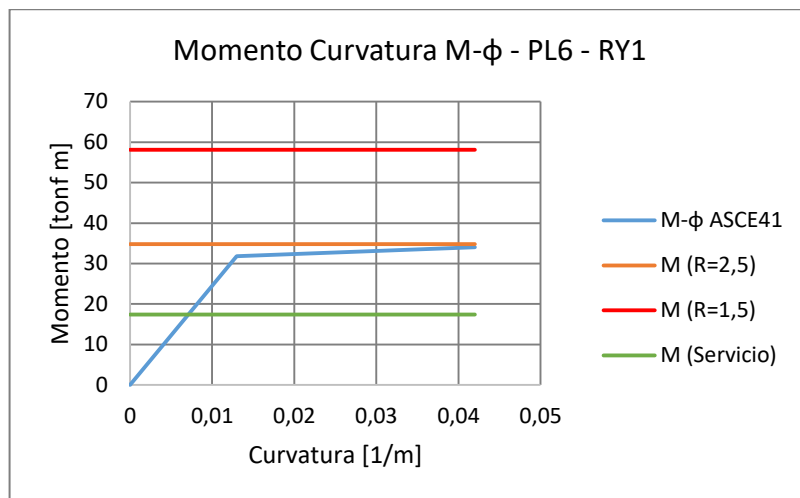


Gráfico 37: Momento Curvatura M- ϕ - PL6 - RY1.

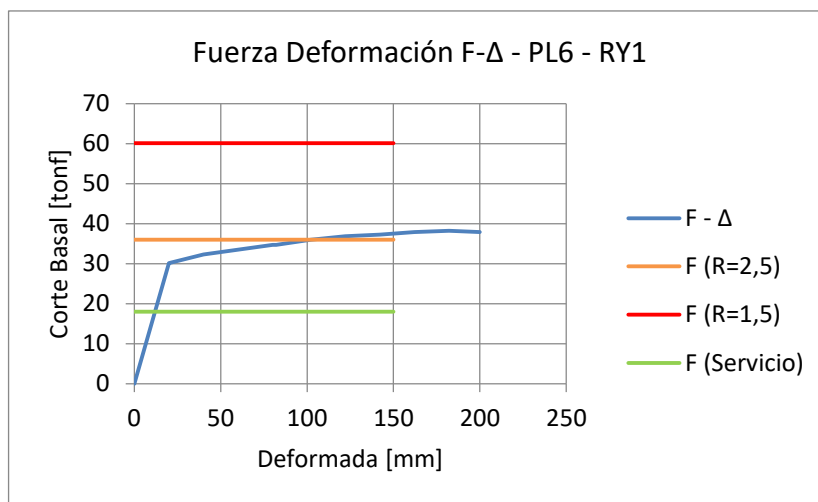


Gráfico 38: Fuerza Deformación F- Δ - PL6 - RY1.

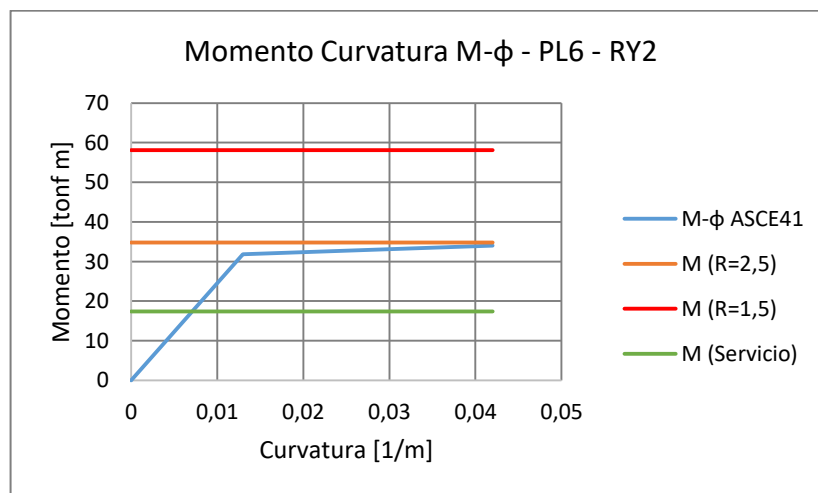


Gráfico 39: Momento Curvatura M- ϕ - PL6 - RY2.

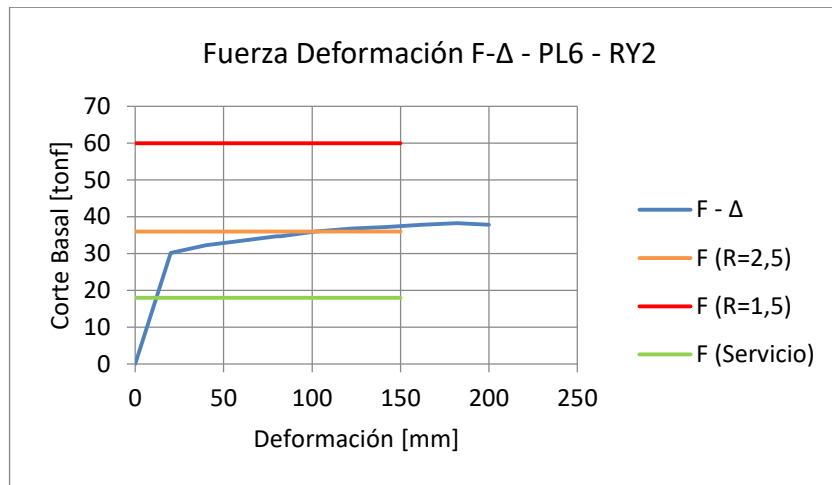


Gráfico 40: Fuerza Deformación F-Δ - PL6 - RY2.

Dado que en la metodología de diseño la segunda condición es que $M_y \leq M_{solicitante}$ se observa en los diagramas de momento curvatura ($M-\phi$) que todas las secciones para las solicitaciones $F(R=2,5)$ plastifican. Complementando lo anterior, las columnas de sacrificio se encuentran en un rango de plastificación de entre un 5% hasta un 105% aproximadamente. Lo anterior se debe a que cuando se propone un límite superior del factor de utilización $FU \leq 3$ se controla la sobre plastificación de la columna, es decir, momento último menor al solicitante ($M_u \leq M_{solicitante}$). Se considera aceptable una sobre plastificación de hasta un 10% debido a la incertidumbre que existe de la solicitación cuando ocurre un sismo severo ($M_u \leq 1,1M_{solicitante}$). Para los casos en que se supera el momento último se entiende como una falla en los stoppers sísmicos que se controla debido a la reserva de resistencia que tienen los buckstays, pared de tubo y componentes mecánicos interiores al ser diseñados para un nivel de esfuerzos de no daño $F(R=1,5)$.

Para comprobar los resultados expuestos anteriormente se complementa mediante los gráficos fuerza deformación ($F-\Delta$) obtenidos de un análisis de pushover a cada una de las columnas de sacrificio. De los gráficos $F-\Delta$ se observa que las columnas de sacrificio plastifican y además se puede cuantificar su deformación.

Plataforma	Stopper	Δ_{push} [mm]
PL1	RX1-1	18,3
	RX1-2	18,3
	RX1-1	17,3
	RX1-2	32,4
PL3	RX3-1	64,4
	RX3-2	64,4
	RX3-1	60,5
	RX3-2	91,2
	RX3-3	50,0
	RX3-4	20,8
PL4	RX4-1	43,8
	RX4-2	43,8
	RX4-1	40,7
PL5	RX5-1	85,0
	RX5-2	25,0
	RX5-3	85,0
	RX5-4	25,0
	RX5-1	108,7
	RX5-2	19,2
PL6	RX6-1	27,0
	RX6-2	82,0
	RX6-3	27,0
	RX6-4	82,0
	RX6-1	82,2
	RX6-2	82,2

Tabla 14: Deformaciones Pushover.

5.5.2. Guías

A continuación se presentan las dimensiones de las guías obtenidas del diseño para los esfuerzos $F(R=1,5)$ mediante la norma AISC360-10. Los perfiles que se presentan en la tabla 15 se obtienen a partir de las planillas de cálculo que se adjuntan en el capítulo Anexos sección A4.

Plataforma	Stopper	H [mm]	B [mm]	tw [mm]	tf [mm]	FU Flexión	FU Corte
PL1	RX1-1	1000	420	46	82	0,988	0,676
	RX1-2	1250	500	46	82	1,050	0,729
	RY1-1	750	265	13	17	1,050	0,383
	RY1-2	750	265	13	17	1,050	0,383
PL3	RX3-1	600	200	12	20	0,947	0,589
	RX3-2	600	200	12	20	0,947	0,589
	RY3-1	1000	400	18	30	0,823	0,515
	RY3-2	1000	400	18	30	0,937	1,029
	RY3-3	1000	400	18	30	0,937	1,029
	RY3-4	900	300	15	20	1,032	0,767
PL4	RX4-1	600	200	12	20	0,947	0,589
	RX4-2	600	200	12	20	0,947	0,589
	RY4-1	1000	400	18	30	0,937	1,029
PL5	RX5-1	750	265	13	17	0,932	0,638
	RX5-2	750	265	13	17	0,932	0,638
	RX5-3	750	265	13	17	0,932	0,638
	RX5-4	750	265	13	17	0,932	0,638
	RY5-1	1000	400	18	30	0,823	0,515
	RY5-2	1000	400	18	30	0,852	0,936
PL6	RX6-1	750	265	13	17	0,944	0,638
	RX6-2	750	265	13	17	0,944	0,638
	RX6-3	750	265	13	17	0,944	0,638
	RX6-4	750	265	13	17	0,944	0,638
	RY6-1	1000	400	18	30	0,935	0,585
	RY6-2	1000	400	18	30	0,935	0,585

Tabla 15: Diseño Guías Elásticas.

6. RESULTADOS

6.1. Introducción

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir del análisis modal espectral de los modelos integrados sin fundación (Fixed) y con interacción suelo estructura (ISE), ambos con el sistema de stoppers sísmicos incorporado. También, se complementan los resultados del análisis para el modelo sin stoppers disponible que no cuenta con la modelación de los stoppers sísmicos y en su reemplazo se utiliza elementos links del tipo constraint. Por lo tanto se muestra como varían los periodos fundamentales y cantidad de modos para alcanzar el 90% de participación de la masa según la modelación. Para la confección de las tablas de los modos se consideran aquellos que tienen una participación mayor al 1% de la masa debido a la gran cantidad de modos de la estructura.

Luego, se procede a determinar los desplazamientos relativos entre la caldera y las plataformas para los tres modelos y con ello graficar la deformada de la caldera en los planos XY, YZ y XZ, con tal de tener una representación del comportamiento global de la caldera. Se presentan los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte. Como es de esperarse se cumple que los mayores desplazamientos se producen en la zona inferior de la caldera y van disminuyendo a medida que aumenta la altura de control (se reproduce el efecto péndulo de la caldera).

6.2. Modelo Fixed

6.2.1. Modos

A partir del análisis modal de la estructura se observa que se cumple con el 90% de participación de la masa para las direcciones X e Y en el modo 165 y para las tres direcciones en el modo 194 (X, Y y Z). La gran cantidad de modos se debe a que la estructura no posee diafragmas rígidos de piso como ocurre en un edificio de hormigón armado, donde aproximadamente el 90% de la masa se mueve dentro de los primeros 20 modos.

Dada la gran cantidad de modos se confecciona la tabla 16 considerando los modos que involucran una participación mayor al 1% de la masa.

De la tabla los modos principales de la estructura corresponden al 85 con un 31% de participación de la masa en X y el modo 62 con un 51% en Y. Dado lo anterior, los periodos fundamentales de la estructura son $T_x=1,065s$ y $T_y=1,344s$. Como el presente estudio se ha enfocado en la caldera y es la estructura que queremos excitar con el fin de

conocer su comportamiento es que los periodos de vibración de la caldera también son importantes por lo que tenemos que:

- Modo 13 Caldera en X: $T_{cx}=2,334s$
- Modo 62 Estructura de soporte y Caldera en Y: $T_y=1,344$
- Modo 63 Caldera en Y: $T_{cy}=1,305s$
- Modo 85 Estructura de Soporte en X: $T_x=1,065$

OutputCase	Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
MODAL	13	2,334	27%	0%	0%	28%	1%	0%
MODAL	14	2,056	5%	0%	0%	33%	1%	0%
MODAL	62	1,344	0%	51%	0%	33%	53%	0%
MODAL	63	1,305	0%	15%	0%	33%	67%	0%
MODAL	67	1,228	0%	3%	0%	33%	70%	0%
MODAL	69	1,183	4%	0%	0%	37%	70%	0%
MODAL	74	1,138	2%	0%	0%	39%	70%	0%
MODAL	85	1,065	31%	0%	0%	71%	73%	0%
MODAL	87	1,049	8%	0%	0%	80%	73%	0%
MODAL	101	0,941	4%	0%	0%	85%	74%	0%
MODAL	115	0,830	0%	2%	0%	86%	76%	0%
MODAL	120	0,795	0%	2%	0%	86%	79%	0%
MODAL	122	0,774	0%	3%	0%	86%	82%	0%
MODAL	130	0,706	2%	0%	0%	88%	82%	0%
MODAL	157	0,444	0%	0%	15%	91%	85%	17%
MODAL	158	0,439	0%	2%	4%	91%	86%	21%
MODAL	159	0,434	0%	0%	18%	91%	86%	39%
MODAL	163	0,396	0%	0%	10%	92%	87%	52%
MODAL	164	0,391	0%	0%	8%	92%	87%	60%
MODAL	165	0,380	0%	3%	0%	92%	90%	60%
MODAL	168	0,351	0%	2%	0%	93%	92%	61%
MODAL	176	0,267	0%	0%	2%	95%	93%	65%
MODAL	179	0,240	0%	0%	2%	96%	94%	67%
MODAL	182	0,211	0%	0%	2%	96%	95%	70%
MODAL	185	0,180	0%	0%	3%	97%	96%	73%
MODAL	188	0,148	0%	0%	4%	98%	98%	77%
MODAL	191	0,123	0%	0%	6%	99%	98%	83%
MODAL	194	0,090	0%	0%	10%	99%	99%	93%
MODAL	197	0,066	0%	0%	3%	100%	100%	96%
MODAL	200	0,031	0%	0%	3%	100%	100%	99%

Tabla 16: Modos Modelo Fixed.

6.2.2. Desplazamientos Caldera

Para determinar los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte se establecen seis planos de control. Estos seis planos corresponden a las plataformas PL1, PL2, PL3, PL4, PL5 y PL6, y también a los nodos pertenecientes a la caldera correspondientes a esos niveles. Como las plataformas se encuentran distribuidas en toda la extensión de la caldera hay planos que tienen desde 8 hasta 16 nodos de control. Es el caso de los planos que cubren el furnace, cage o ambos juntos.

Por lo tanto, en la tabla 17 se presentan los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte. Como es de esperarse se cumple que los mayores desplazamientos se producen en la zona inferior de la caldera y disminuyendo a medida que se va aumentando la altura de control (se reproduce el efecto péndulo de la caldera).

Para complementar el análisis se grafican los desplazamientos en los tres planos representativos de la caldera, es decir, plano XY, XZ y por último YZ. Se observa de la deformada en el plano XY y XZ, gráficos 41 y 42, que la caldera tiende a girar, más en la zona inferior y gradualmente menos a medida que se acerca la zona superior. Además, si se observa el gráfico 43 (deformada plano YZ) se refleja el hecho de que la caldera se flecta.

Modelo Fixed			R=2,5	
			Δx [mm]	Δy [mm]
PL1	NP/NB	42598/166	-124,8	-41,3
	NP/NB	J513/167	-124,4	-103,5
	NP/NB	J461/122	-125,1	-98,5
	NP/NB	42595/121	-125,5	-41,3
PL2	NP/NB	J786/6975	-106,0	-59,1
	NP/NB	J750/6969	-107,1	-58,4
	NP/NB	J791/6974	-110,8	-85,3
	NP/NB	J755/6968	-112,2	-85,3
PL3	NP/NB	J1014/2159	-93,6	-41,6
	NP/NB	J920/2158	-94,5	-41,4
	NP/NB	42671/2747	-100,7	-52,0
	NP/NB	J936/3106	-103,9	-52,0
	NP/NB	42670/7171	-102,0	-67,3
	NP/NB	42650/3595	-104,0	-67,3
	NP/NB	42670/5127	-102,0	-74,1
	NP/NB	42650/4893	-104,0	-74,2
PL4	NP/NB	42758/6973	-93,3	-37,5
	NP/NB	42758/6996	-93,1	-42,2
	NP/NB	42739/6967	-94,9	-37,3

	NP/NB	42739/6997	-94,8	-42,0
	NP/NB	42758/7023	-94,1	-47,1
	NP/NB	42739/3597	-95,7	-46,8
	NP/NB	42760/6990	-93,3	-61,1
	NP/NB	42744/4904	-95,0	-61,2
PL5	NP/NB	42784/7350	-86,6	-32,2
	NP/NB	42781/5087	-86,7	-32,3
	NP/NB	42821/7367	-89,0	-49,7
	NP/NB	42810/4895	-88,2	-49,7
PL6	NP/NB	43484/141	-80,3	-30,5
	NP/NB	43481/94	-82,4	-30,5
	NP/NB	43501/235	-79,9	-37,1
	NP/NB	43490/133	-81,4	-37,1

Tabla 17: Desplazamientos Relativos Caldera - Estructura de Soporte Modelo Fixed.

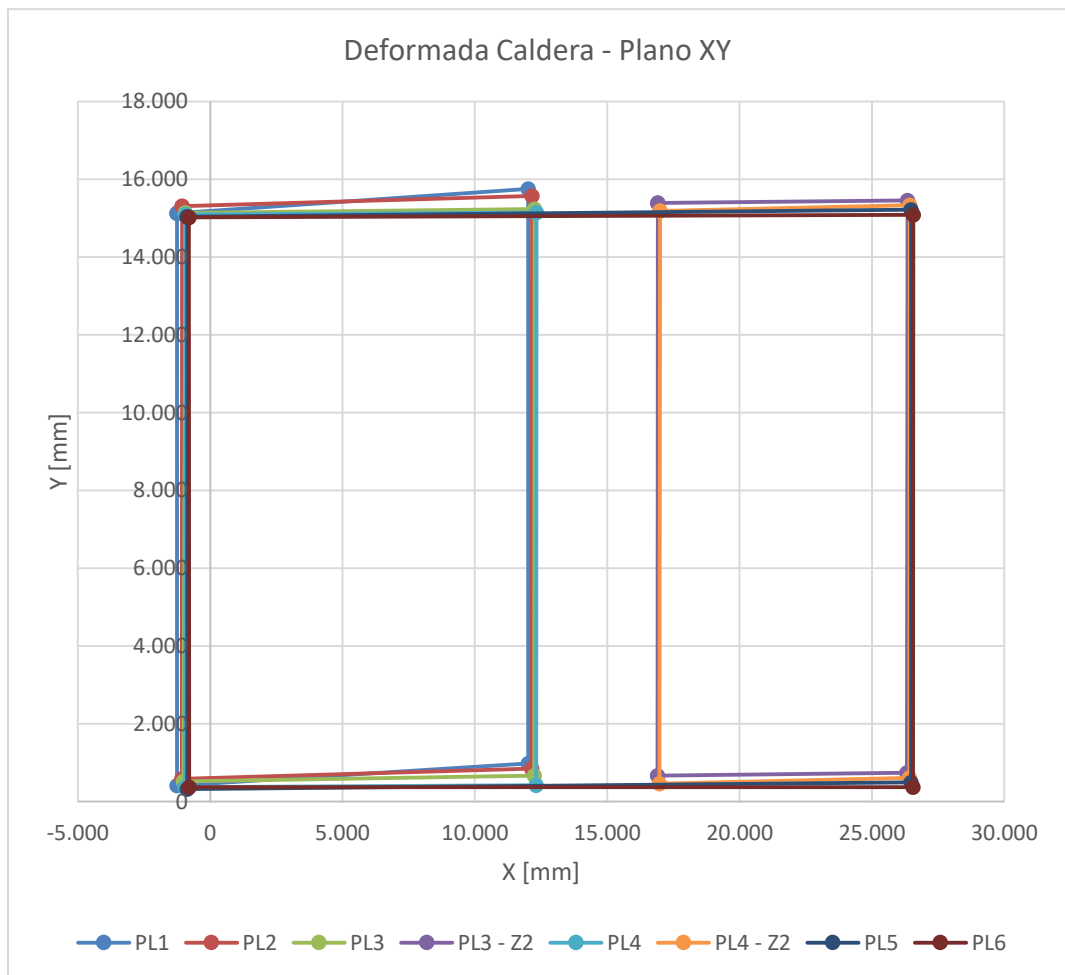


Gráfico 41: Deformada Caldera Modelo Fixed - Plano XY. Factor de Amplificación: 10.

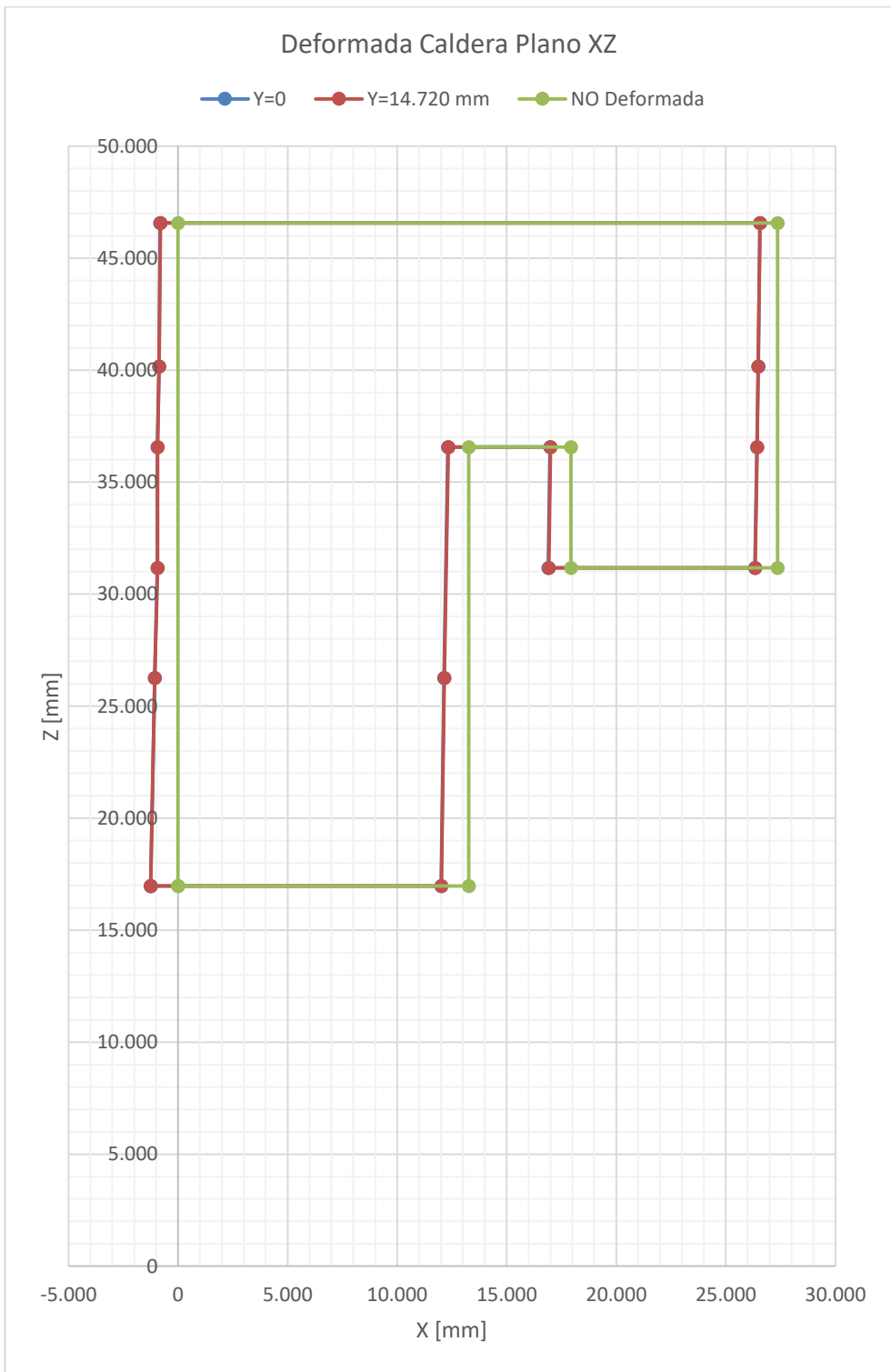


Gráfico 42: Deformada Caldera Modelo Fixed - Plano XZ. Factor de Amplificación: 10.

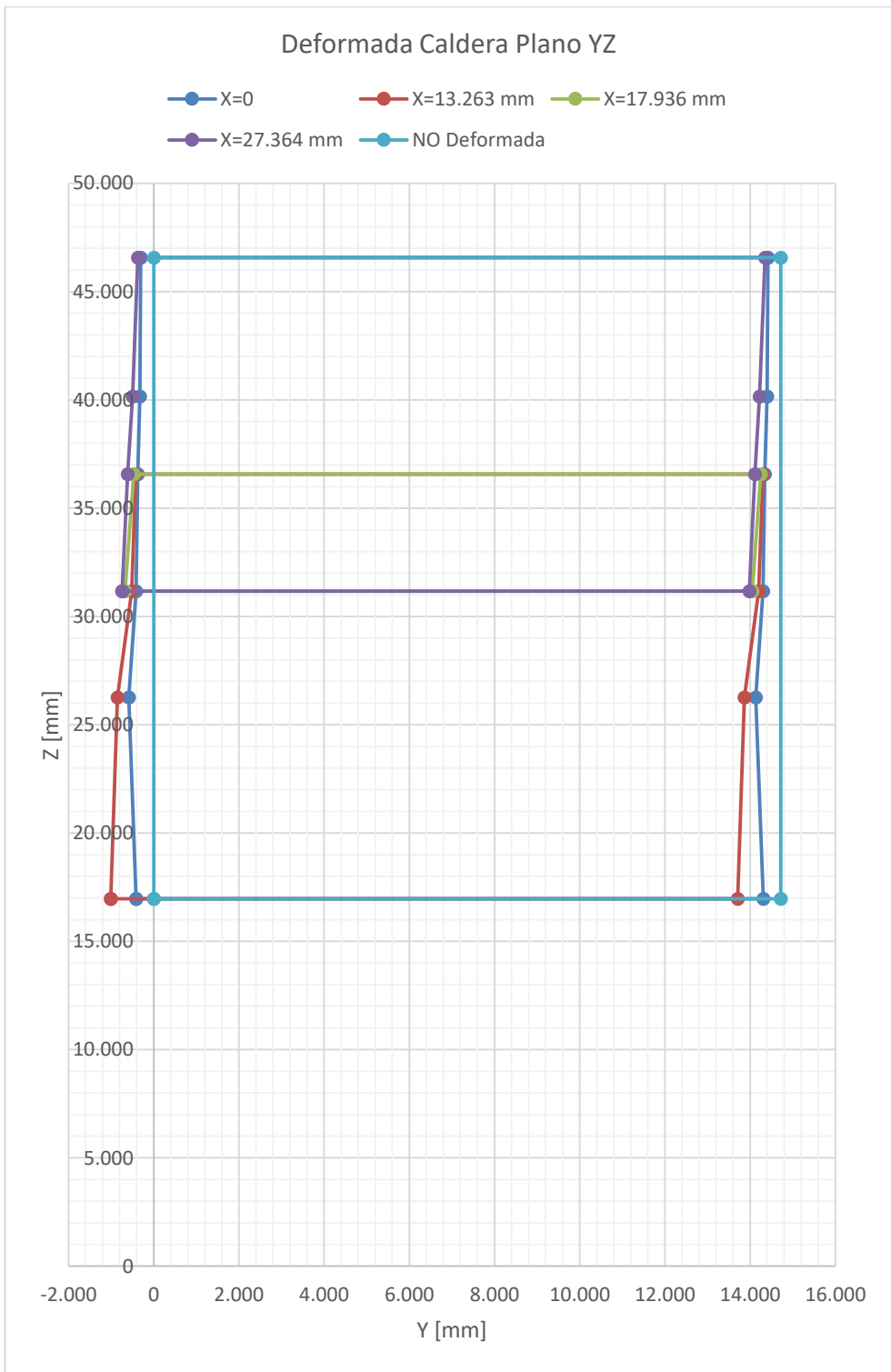


Gráfico 43: Deformada Caldera Modelo Fixed - Plano YZ. Factor de Amplificación: 10.

6.3. Modelo ISE

6.3.1. Modos

Se observa que se alcanza el 90% de participación de la masa para las tres direcciones X, Y y Z en el modo 184, menor al caso anterior Fixed. Y, que el 90% para la dirección Z se cumple en el modo 169, nuevamente antes que en el caso Fixed. Esta menor cantidad de modos en la que se alcanza el 90% de la masa se debe a la menor rigidez de la estructura producto de la incorporación del suelo, fundación y pedestales. Lo anterior se ve reflejado en el aumento de los periodos comparados con la estructura Fixed.

Al igual que en la sección 6.2.2, debido a la gran cantidad de modos se confecciona la tabla 18 considerando los modos que involucran una participación mayor al 1% de la masa.

De la tabla los modos principales de la estructura corresponden al 12 con un 14% de participación de la masa en X y el modo 26 con un 36% en Y. Por lo que los periodos fundamentales de la estructura son $T_x=2,360s$ y $T_y=1,594s$. Como el presente estudio se ha enfocado en la caldera y es la estructura que queremos excitar con el fin de conocer su comportamiento es que los periodos de vibración de la caldera también son importantes por lo que tenemos que:

- Modo 12 Caldera en X: $T_{cx}=2,360s$
- Modo 26 Fundación, Estructura de soporte y Caldera Y: $T_y=1,594$
- Modo 69 Estructura de Soporte en X: $T_x=1,212$
- Modo 76 Estructura de Soporte en X: $T_{sx}=1,143$

OutputCase	Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
MODAL	12	2,360	14%	0%	0%	15%	0%	0%
MODAL	14	2,060	2%	0%	0%	17%	1%	0%
MODAL	26	1,594	0%	36%	0%	17%	37%	0%
MODAL	69	1,212	13%	0%	0%	31%	37%	0%
MODAL	76	1,143	8%	0%	0%	40%	37%	0%
MODAL	145	0,574	0%	0%	69%	43%	40%	72%
MODAL	164	0,393	0%	0%	4%	45%	43%	82%
MODAL	167	0,359	0%	0%	3%	45%	45%	86%
MODAL	169	0,343	0%	0%	5%	45%	45%	91%
MODAL	175	0,289	0%	3%	0%	48%	50%	98%
MODAL	181	0,226	0%	12%	0%	54%	64%	99%
MODAL	182	0,221	12%	1%	0%	67%	65%	99%
MODAL	183	0,207	18%	7%	0%	85%	72%	100%

MODAL	184	0,206	7%	19%	0%	92%	91%	100%
MODAL	185	0,203	6%	0%	0%	98%	92%	100%
MODAL	186	0,183	0%	7%	0%	98%	99%	100%

Tabla 18: Modos Modelo ISE.

6.3.2. Desplazamientos Caldera

Para determinar los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte se establecen seis planos control. Estos seis planos corresponden a las plataformas PL1, PL2, PL3, PL4, PL5 y PL6, y también a los nodos pertenecientes a la caldera correspondientes a esas cotas. Como las plataformas se encuentran distribuidas en toda la extensión de la caldera hay planos que tienen desde 8 hasta 16 nodos de control. Es el caso de los planos que cubren solo el furnace, cage o ambos juntos.

Por lo tanto, en la tabla 19 se presentan los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte. Como es de esperarse se cumple que los mayores desplazamientos se producen en la zona inferior de la caldera y disminuyendo a medida que se va aumentando la altura de control (se reproduce el efecto péndulo de la caldera).

Para complementar el análisis se grafican los desplazamientos en los tres planos representativos de la caldera, es decir, Plano XY, XZ y por ultimo YZ. Se observa de la deformada en el plano XY y XZ, gráficos 44 y 45, que la caldera tiende a girar, más en la zona inferior y gradualmente menos a medida que se acerca la zona superior. Además, si se observa el grafico 46 (deformada plano YZ) se refleja el hecho de que la caldera se flecta.

Modelo ISE			R=2,5	
			Δx [mm]	Δy [mm]
PL1	NP/NB	42598/166	-127,9	-34,5
	NP/NB	J513/167	-127,7	-93,0
	NP/NB	J461/122	-128,3	-96,5
	NP/NB	42595/121	-128,3	-34,5
PL2	NP/NB	J786/6975	-107,8	-38,0
	NP/NB	J750/6969	-108,7	-37,7
	NP/NB	J791/6974	-111,6	-75,5
	NP/NB	J755/6968	-113,1	-75,5
PL3	NP/NB	J1014/2159	-95,0	-21,0
	NP/NB	J920/2158	-95,9	-21,1
	NP/NB	42671/2747	-102,3	-36,0
	NP/NB	J936/3106	-104,6	-36,1
	NP/NB	42670/7171	-102,6	-46,6

	NP/NB	42650/3595	-104,4	-46,7
	NP/NB	42670/5127	-102,6	-47,1
	NP/NB	42650/4893	-104,4	-47,2
PL4	NP/NB	42758/6973	-93,0	-22,3
	NP/NB	42758/6996	-92,8	-17,6
	NP/NB	42739/6967	-94,6	-22,5
	NP/NB	42739/6997	-94,4	-17,8
	NP/NB	42758/7023	-93,8	-18,9
	NP/NB	42739/3597	-95,4	-19,1
	NP/NB	42760/6990	-93,2	-41,5
	NP/NB	42744/4904	-94,8	-41,5
PL5	NP/NB	42784/7350	-86,2	-4,1
	NP/NB	42781/5087	-86,0	-4,2
	NP/NB	42821/7367	-86,7	-30,9
	NP/NB	42810/4895	-88,3	-30,4
PL6	NP/NB	43484/141	-78,4	-0,4
	NP/NB	43481/94	-80,2	-0,4
	NP/NB	43501/235	-79,1	-14,2
	NP/NB	43490/133	-80,4	-14,2

Tabla 19: Desplazamientos Relativos Caldera - Estructura de Soporte Modelo ISE.

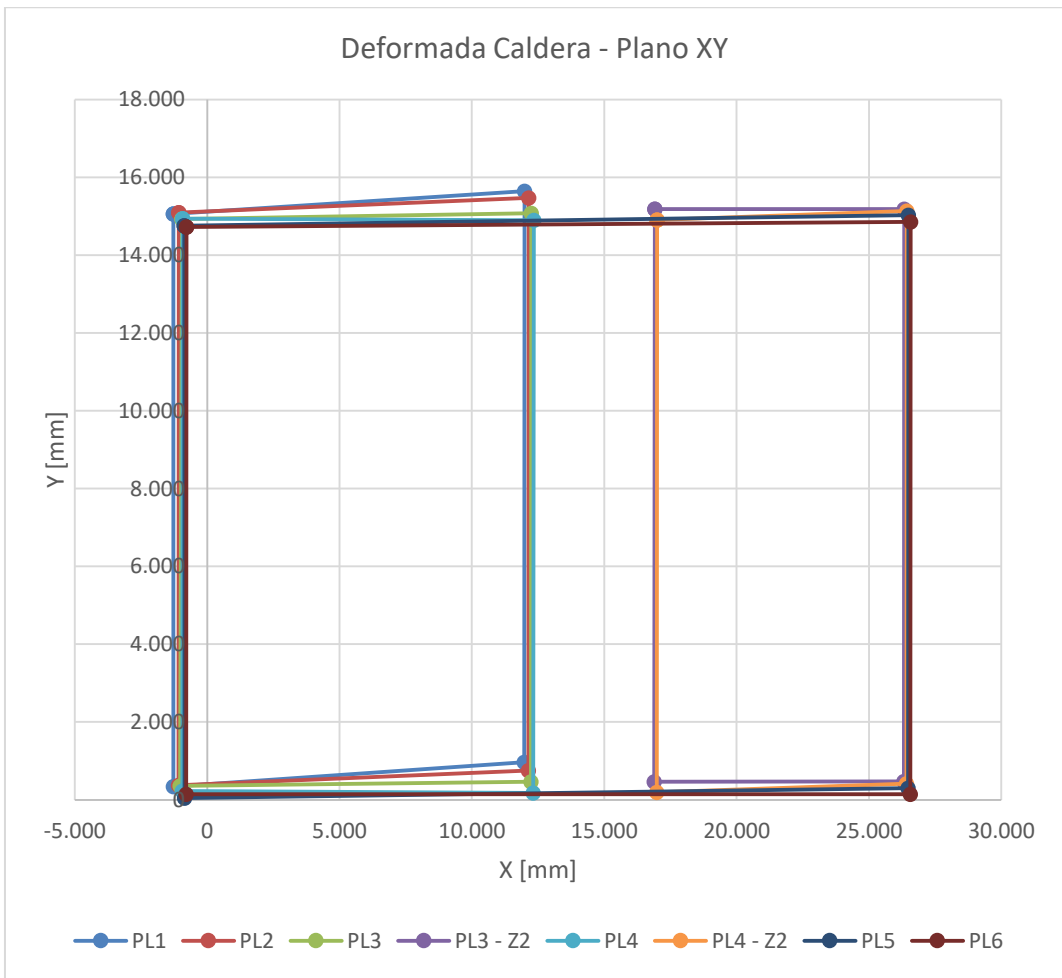


Gráfico 44: Deformada Caldera Modelo ISE - Plano XY. Factor de Amplificación: 10.

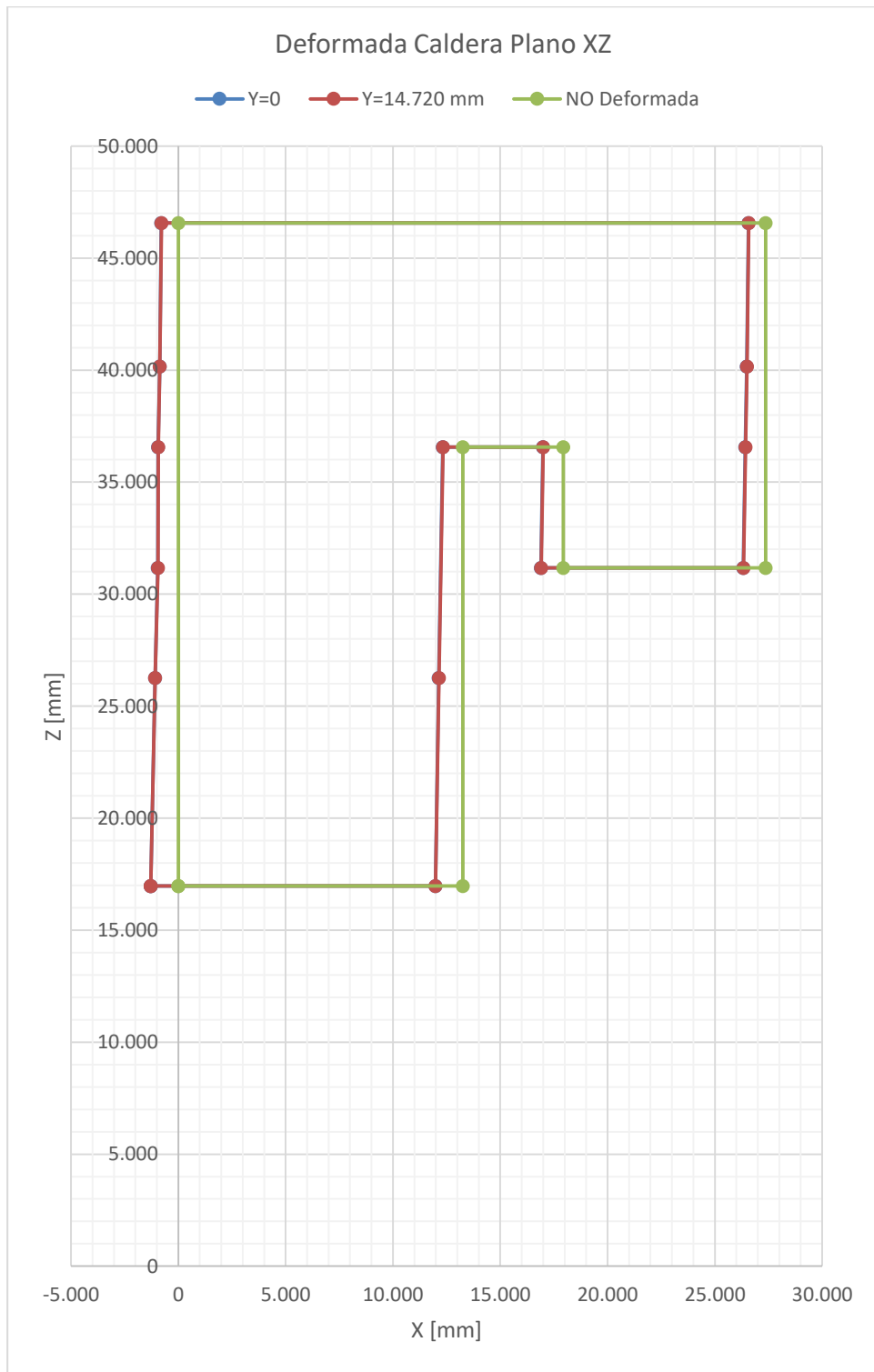


Gráfico 45: Deformada Caldera Modelo ISE - Plano XZ. Factor de Amplificación: 10.



Gráfico 46: Deformada Caldera Modelo ISE - Plano YZ.

6.4. Modelo Sin Stoppers

Este modelo corresponde a un modelo fixed en el cual no se ha incorporado el sistema de stoppers sísmicos exteriores y en su lugar se han definido elementos link tipo constraint que obligan a que se igualen deformaciones entre buckstay de caldera colgante y viga de plataforma que se conecta.

El objetivo de realizar el análisis con esta modelación sin stoppers es evaluar la magnitud de las fuerzas que se generan en comparación con un modelo integrado en el cual se ha incorporado el sistema de stoppers sísmicos y en el que mediante un proceso iterativo de análisis y diseño se logra la definición del sistema de stoppers que cumpla con los requisitos del capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada.

6.4.1. Modos

La participación de masa correspondiente al 90% en las direcciones X e Y se alcanza en el modo 86 y para Z en el modo 98. Dado lo anterior se asegura un 90% de participación de masa de la estructura.

Al igual que en las secciones anteriores, debido a la gran cantidad de modos se confecciona la tabla 20 considerando los modos que involucran una participación mayor al 1% de la masa.

De la tabla, los modos principales de la estructura corresponden al 27 con un 72% de participación de la masa en X y el modo 30 con un 62% en Y. Por lo que los periodos fundamentales de la estructura son $T_x=1,263s$ y $T_y=1,237s$.

- Modo 27 Estructura de soporte y caldera en X: $T_x=1,263s$
- Modo 30 Estructura de soporte y caldera en Y: $T_y=1,237s$

Dado lo anterior, se observa que más del 60% de la masa se encuentra concentrada en solo dos modos. Esta concentración de masa se debe a que el Modelo Sin Stoppers no cuenta con stoppers sísmicos exteriores modelados a diferencia de los modelos Fixed e ISE, y en su reemplazo se utilizan joint constraint tipo body entre los buckstays y las plataformas. Los joint constraint tipo body hacen que los desplazamientos entre dos nodos sean como los de un sólido rígido, en consecuencia no habrá desplazamientos relativos entre ellos. A partir de ello se genera un aumento de la rigidez de la estructura (no real) que queda reflejado en la disminución de los periodos fundamentales.

Esta modelación del sistema de stoppers no es adecuada para el análisis y diseño de los stoppers sísmicos, más aún se obtienen fuerzas sísmicas en los stoppers que alcanzan

hasta 200% mayores de los que se obtienen con un modelo integrado en el cual se han incorporado los elementos de sacrificio con tu trabajo plástico para el sismo de diseño.

OutputCase	Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
MODAL	27	1,263	72%	0%	0%	74%	1%	0%
MODAL	30	1,237	0%	62%	0%	74%	63%	0%
MODAL	41	1,148	0%	6%	0%	76%	77%	0%
MODAL	45	1,116	4%	0%	0%	81%	77%	0%
MODAL	54	0,934	3%	0%	0%	85%	77%	0%
MODAL	82	0,407	0%	0%	40%	92%	86%	43%
MODAL	85	0,366	0%	0%	19%	93%	89%	62%
MODAL	86	0,349	0%	4%	0%	93%	93%	62%
MODAL	97	0,113	0%	0%	12%	99%	99%	89%
MODAL	100	0,066	0%	0%	9%	100%	100%	97%

Tabla 20: Modos Modelo Sin Stoppers.

6.4.2. Desplazamientos Caldera

Para determinar los desplazamientos relativos entre la estructura de soporte y caldera se utilizó la misma metodología que para los modelos Fixed e ISE.

			R=2,5	
Modelo Sin Stoppers			Δx [mm]	Δy [mm]
PL1	NP/NB	42598/166	-69,6	-14,0
	NP/NB	J513/167	-66,5	-73,1
	NP/NB	J461/122	-66,7	-77,7
	NP/NB	42595/121	-69,6	-14,0
PL2	NP/NB	J786/6975	-52,9	-25,7
	NP/NB	J750/6969	-53,2	-25,2
	NP/NB	J791/6974	-57,9	-51,0
	NP/NB	J755/6968	-59,0	-51,0
PL3	NP/NB	J1014/2159	-41,9	-7,4
	NP/NB	J920/2158	-42,6	-6,8
	NP/NB	42671/2747	-48,9	-12,5
	NP/NB	J936/3106	-49,6	-12,5
	NP/NB	42670/7171	-63,3	-25,1
	NP/NB	42650/3595	-63,7	-25,2
	NP/NB	42670/5127	-63,4	-23,7
	NP/NB	42650/4893	-63,8	-23,8
PL4	NP/NB	42758/6973	-38,0	-6,4
	NP/NB	42758/6996	-39,5	-1,3

	NP/NB	42739/6967	-38,6	-6,2
	NP/NB	42739/6997	-40,1	-1,1
	NP/NB	42758/7023	-46,9	-2,0
	NP/NB	42739/3597	-47,2	-1,8
	NP/NB	42760/6990	-46,3	-17,4
	NP/NB	42744/4904	-46,8	-17,4
PL5	NP/NB	42784/7350	-31,2	-0,8
	NP/NB	42781/5087	-36,7	-0,9
	NP/NB	42821/7367	-34,9	-11,7
	NP/NB	42810/4895	-34,2	-11,7
PL6	NP/NB	43484/141	-33,4	0,4
	NP/NB	43481/94	-34,6	0,4
	NP/NB	43501/235	-26,7	1,8
	NP/NB	43490/133	-27,3	1,8

Tabla 21: Desplazamientos Relativos Caldera - Estructura de Soporte.

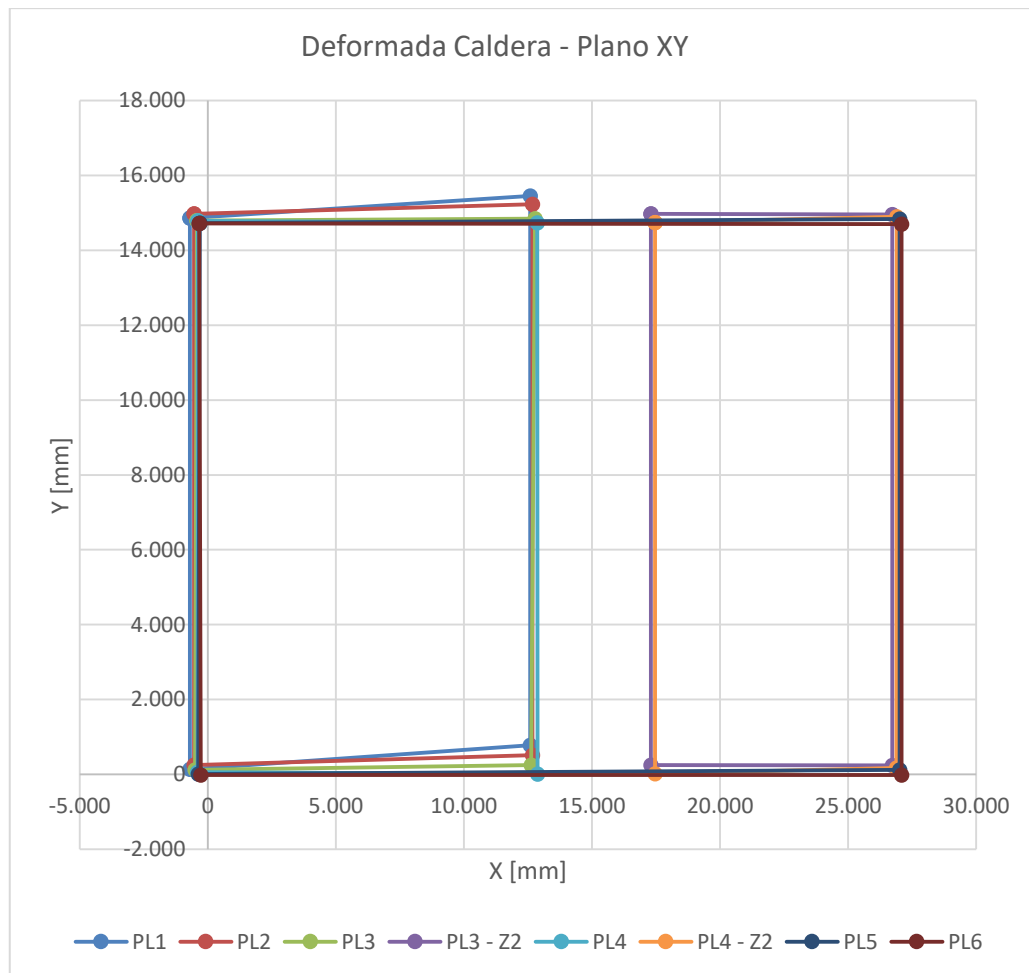


Gráfico 47: Deformada Caldera - Plano XY. Factor de Amplificación: 10.

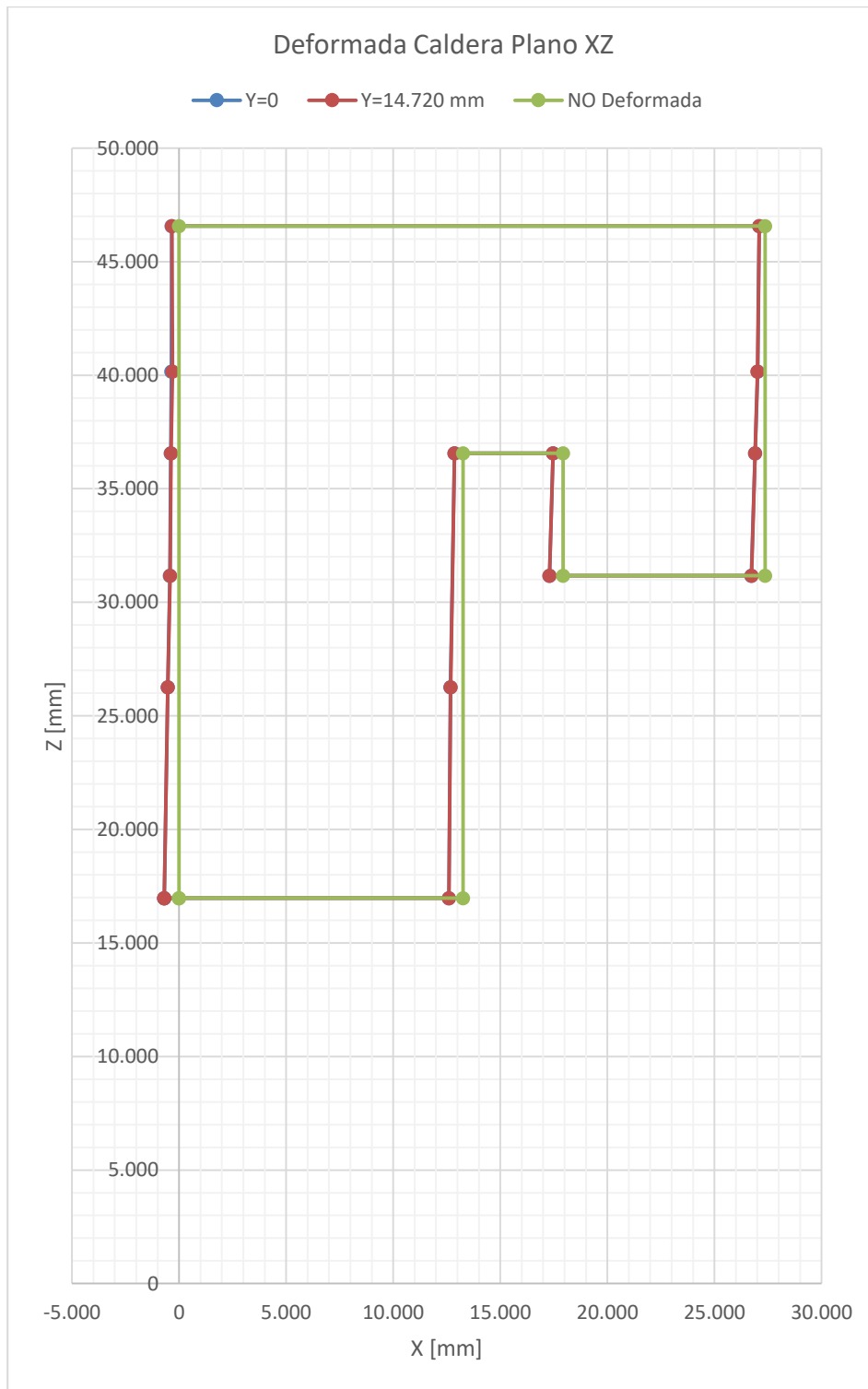


Gráfico 48: Deformada Caldera - Plano XZ. Factor de Amplificación: 10.

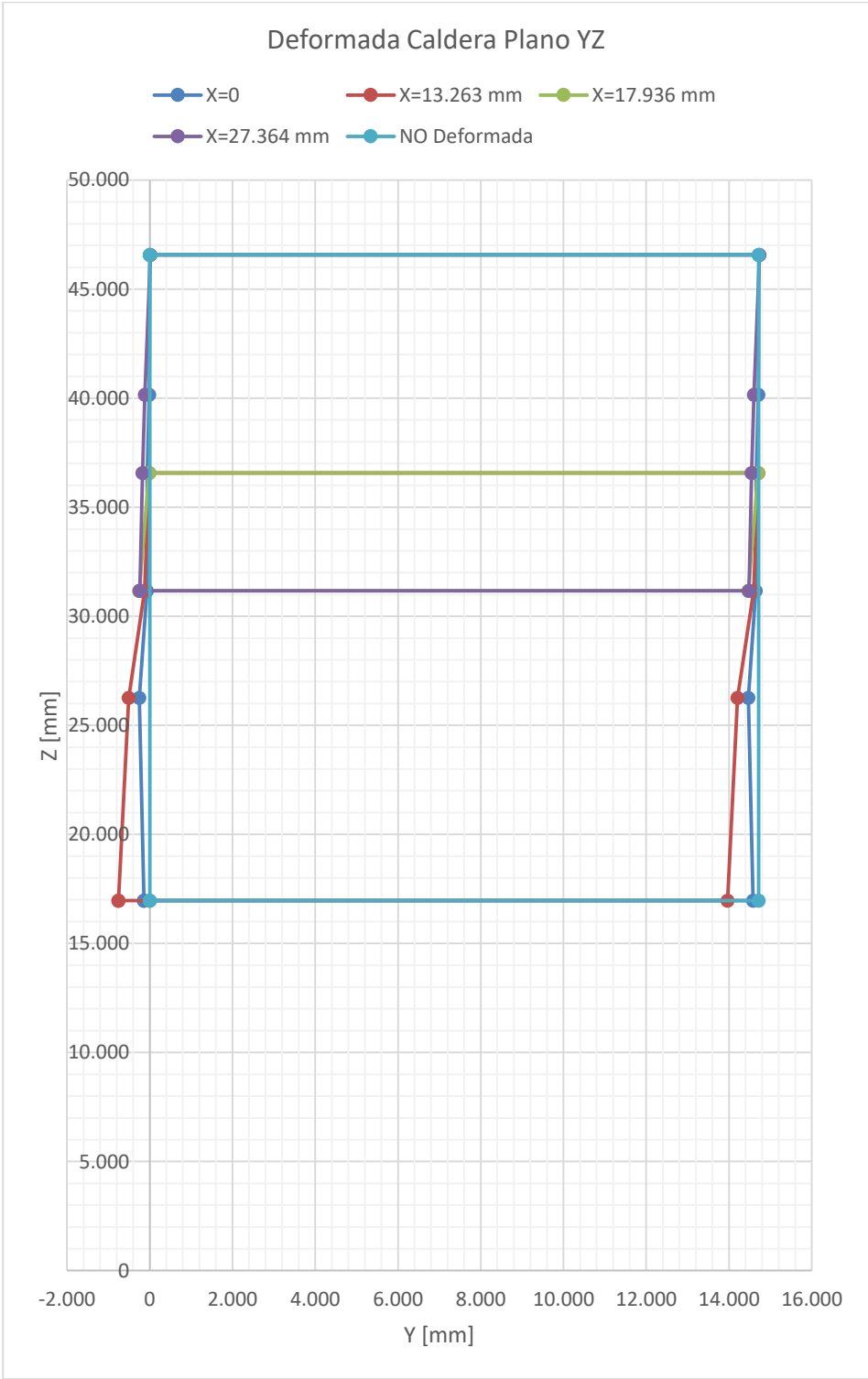


Gráfico 49: Deformada Caldera - Plano YZ. Factor de Amplificación: 10.

6.5. Deformaciones Columnas de Sacrificio

El análisis modal espectral es un análisis lineal elástico, por lo que no considera el comportamiento más allá del rango elástico de los elementos. A continuación se explica con más detalle la diferencia de resultados de deformaciones elástica a plástica del sistema de stoppers.

En el gráfico 50 se presenta la curva fuerza deformación (F- Δ) para una sección tipo de columna de sacrificio. La curva está compuesta por una zona elástica y otra plástica, en azul y negro respectivamente. La recta roja corresponde a la sollicitación y la recta amarilla a la proyección de la recta elástica.

Entonces, cuando se determina deformaciones mediante un análisis modal espectral lo que entregará como resultado el programa será el punto de intersección entre la proyección de la elástica (amarilla) y la sollicitación (roja). Por lo tanto, al obtener las deformaciones de un elemento que debe plastificar a partir de un análisis modal se incurre en una subestimación de las deformaciones debido a que la deformación real corresponde a la intersección entre la sollicitación (roja) y la curva plástica (negra), de donde se obtiene que $\Delta_{Modal} < \Delta_{Plástica}$.

Del gráfico se determina para una sección que plastifica lo siguiente:

- $\Delta_{Modal} \approx 30 [mm]$
- $\Delta_{Plástica} \approx 100 [mm]$
- $Diferencia = \Delta_{Plástica} - \Delta_{Modal} = 70 [mm]$

En consecuencia, se propone un procedimiento para realizar una estimación de las deformaciones plásticas de las columnas de sacrificio.

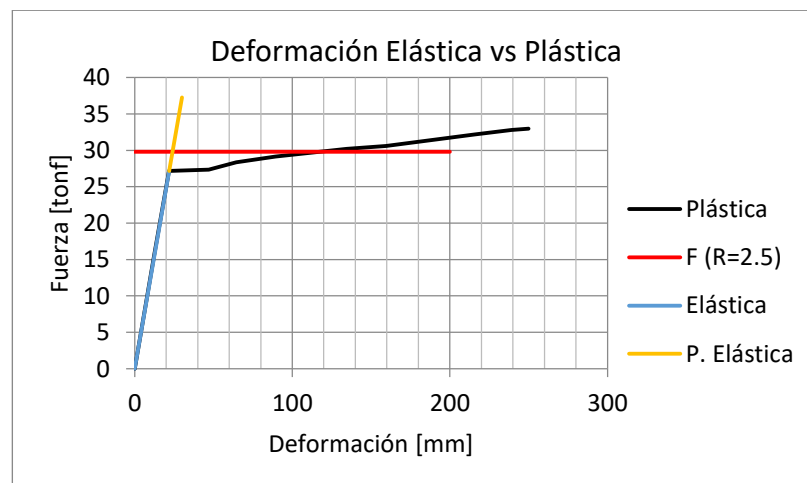


Gráfico 50: Deformación Elástica vs Plástica.

El sistema de stoppers sísmicos que se aplica al modelo integrado está compuesto por dos tipos de stoppers. Los de tipo I y II, en los que la principal diferencia es la estructuración de la columna de sacrificio. La columna de sacrificio del stopper tipo I es un elemento con apoyos rotulados en ambos extremos y con carga puntual entre los apoyos. Y la del stopper tipo II corresponde a una columna de sacrificio en voladizo con carga puntual en el extremo libre.

Por lo tanto, las deformaciones de las columnas de sacrificio se determinan de acuerdo a las formulas recomendadas por el Instituto Chileno del Acero. Es claro que la deformación total es la suma de la componente elástica más la plástica, y es en la determinación de la componente plástica donde surge el problema. Para ello se utiliza la recomendación del ASCE41-13, Gráfico 51, que propone para el tramo BC (zona plástica) lo siguiente: $I_p E = 3\% I_e E$, a partir de esta recomendación y de las fórmulas propuestas en las figuras 48 y 49 se determina la deformación plástica de las columna de sacrificio.

Para estimar las deformaciones plásticas se propone la siguiente metodología:

- $F_{sol} = F_e + F_p$, donde $M_e = f_y Z_x$ y $F_e = F_e(M_e, L, a)$
- $F_p = F_{sol} - F_e$
- $\Delta_e(EI_e, F_e)$
- $\Delta_p(0,03EI_e, F_p)$
- $\Delta_{total} = \Delta_e + \Delta_p$

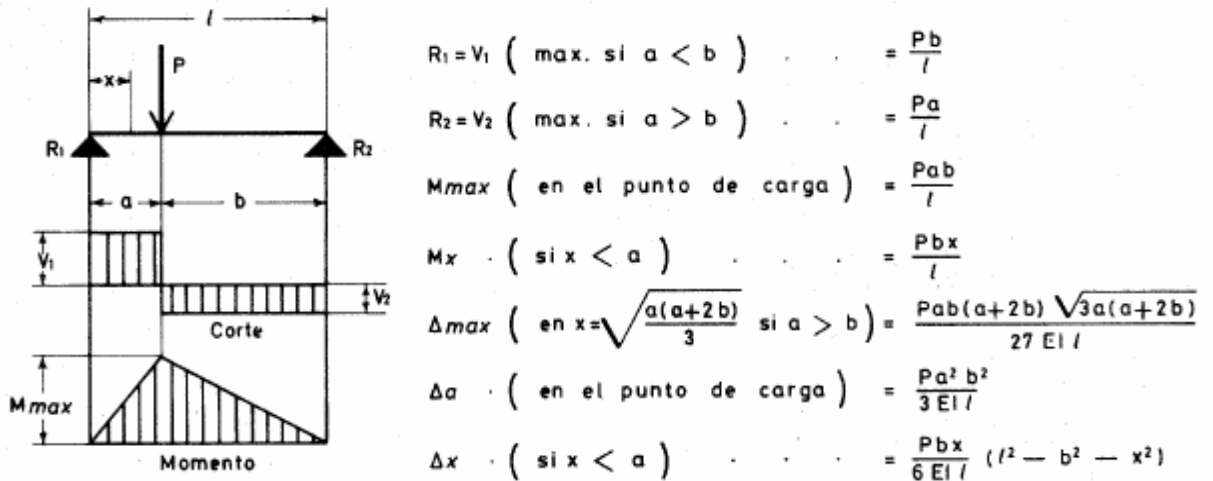


Figura 48: Carga concentrada en cualquier punto. FUENTE: ICHA.

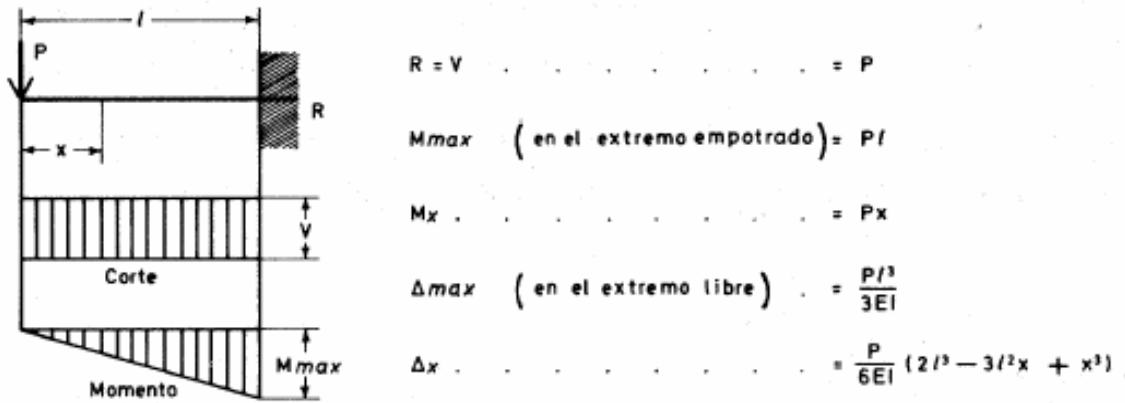


Figura 49: Carga concentrada en el extremo libre. FUENTE: ICHA.

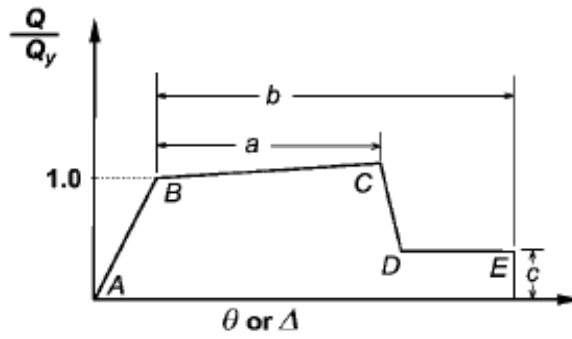


Gráfico 51: Fuerza - Deformación o Momento - Giro. FUENTE: ASCE41-13.

A continuación, en la tabla 22, se exponen las deformaciones obtenidas a partir de la metodología propuesta.

Plataforma	Stopper	Δ [mm]
PL1	RX1-1	21,9
	RX1-2	21,9
	RX1-1	6,4
	RX1-2	14,2
PL3	RX2-1	70,2
	RX2-2	70,2
	RX2-1	57,1
	RX2-2	69,5
	RX2-3	23,2
	RX2-4	16,7
PL4	RX4-1	51,3
	RX4-2	51,3
	RX4-1	37,5
PL5	RX5-1	57,9
	RX5-2	27,7
	RX5-3	57,9
	RX5-4	27,7
	RX5-1	86,0
	RX5-2	20,1
PL6	RX6-1	18,1
	RX6-2	49,7
	RX6-3	18,1
	RX6-4	49,7
	RX6-1	53,8
	RX6-2	53,8

Tabla 22: Estimación de Deformaciones Plásticas.

7. CONCLUSIONES

Se concluye en este trabajo de título que se puede proveer solución de stoppers sísmicos solo en base a estructuras de acero, con capacidad de disipación de energía para el sismo de diseño, cumpliendo los requisitos del capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada y los estándares de criterios de diseño sísmico de las empresas generadoras, para el suministro de calderas en Chile.

7.1. Resultados Comparativos de Modelos

La finalidad de estudiar los modelos Fixed e ISE es comparar los resultados de un modelo integrado con apoyos empotrados a nivel de fundación y un modelo integrado con la interacción suelo estructura.

La información modal obtenida del análisis de ambos modelos se resume en la tabla 23. En donde, para cada modelo (Fixed e ISE), se presenta la participación de masa (%) y el periodo fundamental en las direcciones X e Y de la estructura.

Modelo	T _x [s]	T _y [s]
Fixed	1,065 – [31%]	1,344 – [51%]
ISE	1,212 – [14%]	1,594 – [36%]

Tabla 23: Periodos Fundamentales Estructura de Modelos Fixed e ISE.

Mediante la implementación de la interacción suelo estructura al modelo integrado los periodos fundamentales aumentan. El aumento de los periodos se debe a la menor rigidez en la base de la estructura producto de la modelación del suelo y a la ductilidad que aporta el MAT de fundación y los pedestales.

En relación a los esfuerzos solicitantes de los stoppers exteriores se observa dos efectos. El primero corresponde a la variación de esfuerzos que ocurre en el plano, es decir, aunque existan stoppers que trabajan en una misma dirección no siempre toman la misma carga. El segundo efecto, la variabilidad de los esfuerzos según orientación (X o Y) de los stoppers producto de la influencia de la interacción suelo estructura.

El primer efecto se debe a la diferencia que hay entre el centro de masa y centro de rigidez de la caldera, por lo que se produce una torsión y por lo tanto genera diferentes solicitaciones en los stoppers. Como por ejemplo, es así como ocurre en la plataforma PL3 para los stoppers orientados en Y. Ver tabla 24.

PL3	Ry3-3	87,6 [tonf]
	Ry3-4	69,4 [tonf]

Tabla 24: Efecto 1.

De los resultados obtenidos de aumentos y disminuciones de cargas sísmicas en los sistemas de stoppers sísmicos, en principio se puede comentar:

- Con el modelo Fixed se podría realizar el diseño de la estructura de soporte de la caldera y su envío a fabricación (actividad crítica en contratos EPC).
- Con el modelo ISE, hay un aumento de solicitaciones sísmicas en el sistema de stoppers del 8% en el sentido X (longitudinal) y una importante disminución de entre un 30% hasta un 60% en el sentido Y (transversal).
- Un aumento de solicitaciones sísmicas de un 8% en stoppers y estructura de acero, entre el modelo Fixed y modelo ISE, probablemente en la verificación final cumplirá la estructura de acero fabricada a partir del modelo Fixed o en caso de ser requerido en algunos elementos estructurales se deberá realizar refuerzos en terreno.
- El diseño y verificación de los componentes mecánicos y a presión del equipo bajo norma ASME, se debe realizar con el modelo ISE.

Para conocer el comportamiento de la caldera frente al sismo de diseño se determinan los desplazamientos relativos entre la caldera y la estructura de soporte para ambos modelos. Como es de esperarse, se cumple que los mayores desplazamientos se producen en la zona inferior de la caldera disminuyendo a medida que va aumentando la altura de control (se reproduce el efecto péndulo de la caldera). El comportamiento de la caldera para ambos modelos tiende a flectar y girar, ver los gráficos de los planos XY, XZ y YZ del capítulo 6. Pero, si se comparan ambos modelos se observa que el desplazamiento en X es mayor y en Y es menor para el modelo ISE. Lo anterior tiene directa relación con el aumento de los esfuerzos para los stoppers en X y una disminución para los que se encuentran orientados en Y, influencia de la interacción suelo estructura.

El capítulo 14 de la nueva norma NCh2369, recomienda una estructuración (líneas resistentes verticales y horizontales, y configuración de stoppers sísmicos) que minimice los efectos torsionales del modelo integrado. La caldera es un equipo que tiene alguna simetría de masas con respecto al eje longitudinal, en cambio en el sentido transversal tiene una distribución de masas que genera torsiones en la estructura y en el equipo colgante. Se aclara que hay calderas que no tienen incorporado en la estructura los silos de carbón (tipo MHI y otras), en cambio, recientes calderas suministradas para centrales termo eléctricas incluyen en un solo modelo integrado la caldera colgante y los silos de

carbón (tipo DHI y otras). Por lo tanto, en los modelos integrados se tiene que manejar en los análisis y diseños efectos de torsión que se presentan en los sistemas de stoppers sísmicos.

Para comenzar a diseñar los stoppers es necesario conocer a cabalidad la estructuración del modelo, es decir, disposición de plataformas, buckstays, componentes mecánicos aledaños a la caldera, entre otros. Con ello se determina si es factible incorporar los stoppers en las posiciones y orientaciones requeridas. Debido a que no siempre es posible implementar solo un tipo de stoppers es necesario dejar abierta la posibilidad de utilizar uno o más tipos de stoppers en base un elemento de sacrificio que plastifica de forma controlada y un elemento que siempre permanezca elástico, como ocurrió en este trabajo (se implementó dos tipos de stoppers sísmicos exteriores).

El análisis modal espectral es un análisis lineal elástico, por lo que no considera el comportamiento fuera del rango elástico de los elementos. En consecuencia, cuando se determina deformaciones mediante un análisis modal espectral lo que entregará como resultado el programa será la deformación correspondiente al punto de intersección entre la proyección de la elástica y la solicitación, revisar sección 6.5 gráfico 50. Por lo tanto, al obtener las deformaciones de un elemento que debe plastificar a partir de un análisis modal se incurre en una subestimación de las deformaciones debido a que la deformación real corresponde a la intersección entre la solicitación y la curva plástica, de donde se obtiene que $\Delta_{Modal} < \Delta_{Plástica}$. Dado lo anterior es necesario realizar una estimación de las deformaciones plásticas de las columnas de sacrificio, para estimar el movimiento pendular de la caldera colgante.

Las deformaciones obtenidas a partir de la metodología propuesta en la sección 6.5 son bastante consistentes a las obtenidas del análisis de pushover para cada sección, si bien no son iguales, permiten determinar las deformaciones de manera satisfactoria. Por lo que la metodología utilizada se considera aceptable.

A partir de los diagramas de momento curvatura generados a partir de la metodología propuesta por el ASCE41-13 y de los gráficos de fuerza deformación del análisis de pushover se verifica la plastificación para cada una de las columnas. El análisis de pushover se realizó para comparar el comportamiento plástico de las columnas de sacrificio, y dado que también se verifica la plastificación mediante los diagramas de momento curvatura se considera que las deformaciones plásticas estimadas son aceptables.

7.2. Validación de Metodología de Diseño de Stoppers Sísmicos

A partir de este trabajo de título se propone establecer una metodología de diseño de stoppers sísmicos exteriores de calderas, de manera que sirva de referencia para el diseño y suministro de futuras calderas en Chile. A continuación se presenta la metodología propuesta de este trabajo.

Lo primero, antes de comenzar a diseñar los stoppers sísmicos es necesario conocer a cabalidad la estructuración del modelo, es decir, disposición de las plataformas, buckstays, equipos mecánicos, entre otros ya que cumplen un rol muy importante en la modelación de los stoppers. Lo anterior, permite estudiar la factibilidad de la distribución y orientación de los stoppers.

Una vez comprendida la estructuración, dimensiones y cotas, en especial de las plataformas y buckstays, se propone la distribución y orientación de las guías y columnas de sacrificio en el modelo.

Una vez incorporados los stoppers en el modelo integrado se procede a realizar el análisis modal espectral a la estructura en el programa de elementos finitos para obtener los esfuerzos que permitirán realizar el diseño de las columnas de sacrificio y guías de los stoppers.

Una vez realizado el análisis modal espectral se debe diseñar las guías para los esfuerzos obtenidos a partir del espectro con $R=1,5$ y así obtener una sobre resistencia por parte de las guías con lo que se tendría comportamiento elástico (no daño). A su vez, las columnas de sacrificio se deben plastificar para las sollicitaciones obtenidas a partir del espectro de diseño con $R=2,5$.

Además, el diseño debe considerar tanto para guías como para columnas de sacrificio secciones compactas para obtener una respuesta dúctil cuando se supera el límite elástico como ocurre en el caso de las columnas de sacrificio.

El diseño de las guías se realiza mediante la norma AISC360-10 para un factor de utilización máximo $FU \leq 1,05$, tanto para corte como para flexión.

Lo que sigue es diseñar las columnas de sacrificio. Se propone diseñar preliminarmente mediante la norma AISC360-10 cumpliendo con las siguientes condiciones:

- Sección Compacta.
- $M_y \leq M_{solicitante}$
- $FU \leq 3$ para Flexión y Corte

Luego, para comprobar el comportamiento y cuantificar la plastificación de cada columna de sacrificio, se generan los diagramas momento curvatura utilizando la metodología recomendada por la norma ASCE41-13 y opcionalmente las curvas fuerza deformación a partir de un análisis de pushover.

Por último se debe estimar las deformaciones plásticas de las columnas de sacrificio mediante la metodología propuesta o alguna equivalente.

A continuación se expone un resumen de la metodología de diseño propuesta.

- 1) Estudio de la estructura de la caldera y estructura de soporte.
- 2) Propuesta de distribución y orientación de stoppers.
- 3) Modelación de guías y columnas de sacrificio en modelo integrado.
- 4) Análisis modal espectral y obtención de esfuerzos.
- 5) Diseño de guías para esfuerzos $F(R=1,5)$. Diseño según norma AISC360-10
- 6) Diseño de columnas de sacrificio cumpliendo las tres condiciones para esfuerzos $F(R=2,5)$. Diseño según norma AISC360-10.
- 7) Verificar plastificación mediante los diagramas momento curvatura. Se recomienda utilizar la norma ASCE41-13.
- 8) Estimación de deformaciones plásticas de las columnas de sacrificio.

7.3. Recomendaciones

Se espera que la metodología de análisis y diseño de calderas, estructuras y componentes mecánicos mediante un modelo integrado sea incorporado en las especificaciones de contratos EPC de centrales termoeléctricas. De lo anterior, dar cuenta de que la implementación de un modelo integrado para el diseño de stoppers sísmicos es una metodología recomendable para representar la complejidad de un equipo con su estructura y componentes mecánicos de manera de obtener diseños sísmicos que garanticen un comportamiento plástico localizado en el sistema de stoppers sísmicos protegiendo al equipo mecánico para no tener daño con el sismo de diseño y lograr la continuidad operacional requerida por los inversionistas en la obra eléctrica.

Actualmente la norma de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales NCh2369of2003 deja fuera de alcance estructuras y equipos de generación eléctrica. En consecuencia, para el diseño de este tipo de estructuras es necesario aplicar otro criterio de diseño, como el espectro propuesto por la NCh2369 actualizada, que si incluye en el capítulo 14 centrales de generación eléctrica.

A partir de la figura 50, se observa que para las plataformas PL5 y PL6 los stoppers encerrados en un círculo no se encuentran centrados con respecto a la caldera. Por lo que, al no encontrarse en el plano de simetría de la caldera se verán influenciados por dilatación por temperatura. El supuesto es que la dilatación por temperatura de una placa de acero comienza a dilatar desde el centro y por lo tanto en la zona central la deformación será nula y, en cambio hacia su extremo mayor a cero. Ver figura 51, puntos A, B y C.

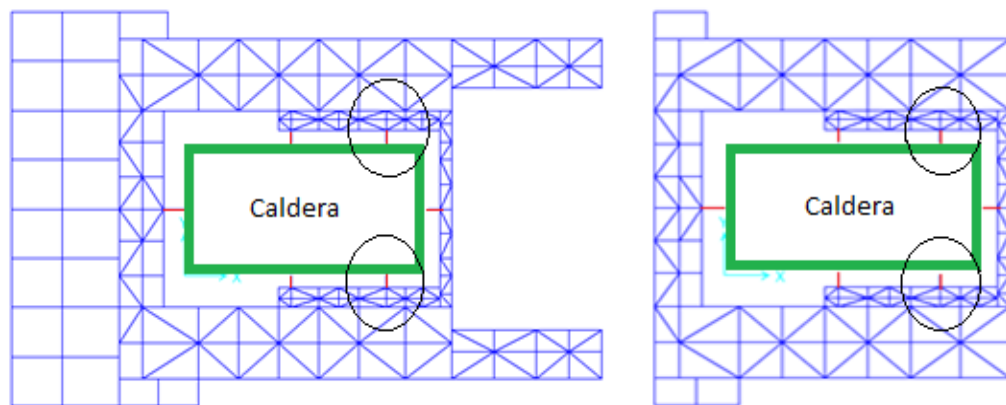


Figura 50: Plataformas PL5 y PL6.

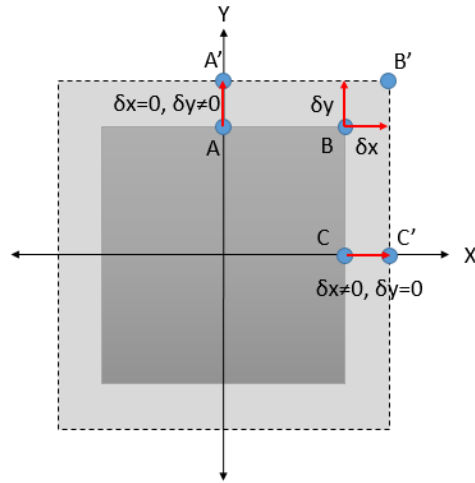


Figura 51: Supuesto de Dilatación por Temperatura.

Por lo tanto, para los casos en que se incorporan stoppers sísmicos fuera de los planos de simetría de la caldera (dilatación nula) se recomienda utilizar un stopper tipo link, figura 52, que permite las deformaciones por temperatura, simultáneamente en el plano horizontal y vertical. Este tipo de stopper es capaz de compatibilizar las deformaciones por temperatura debido a que permite el giro en el plano horizontal y vertical a partir de que el elemento link se encuentra rotulado en ambos extremos, figura 53.

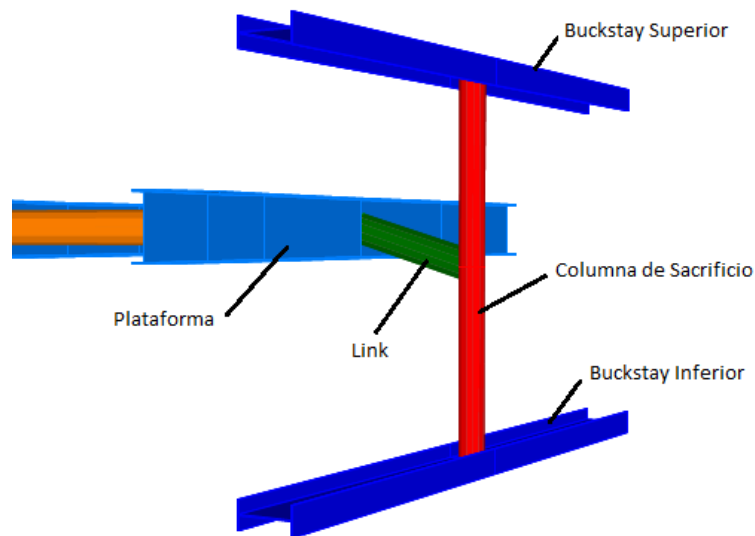


Figura 52: Stopper Tipo Link.

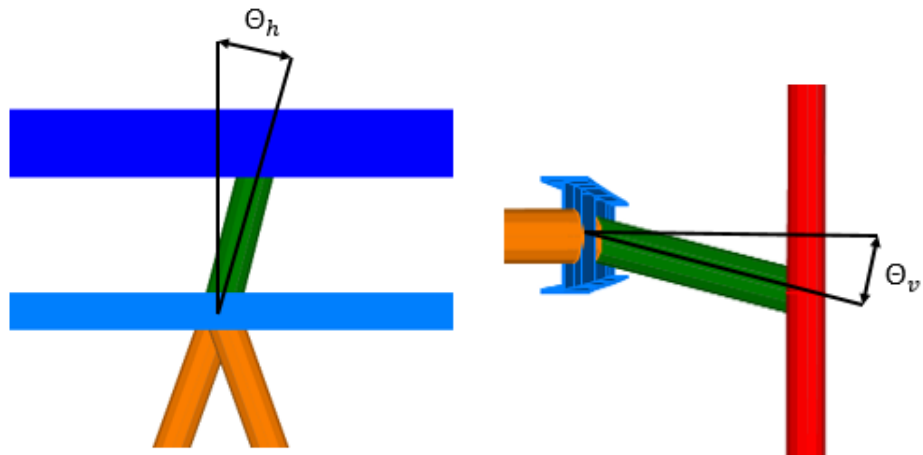


Figura 53: Giro Horizontal y Vertical de Stopper Tipo Link.

Para los casos en que se debe incorporar sistemas de stoppers sísmicos exteriores tipo II se recomienda implementar continuidad de la columna de sacrificio a partir de una columna de refuerzo entre los buckstays superior e inferior. A partir de la implementación de la columna de refuerzo se mejora el traspaso de esfuerzos y minimiza algún tipo de daño en el buckstay superior debido a un evento sísmico severo. Ver figura 54.

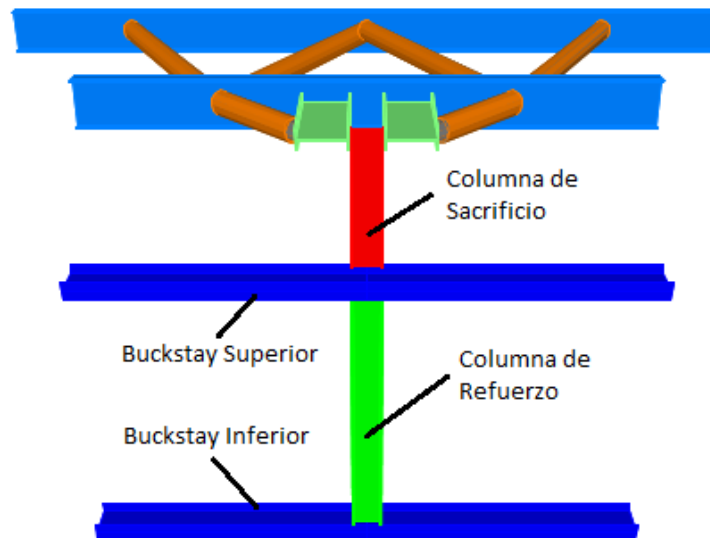


Figura 54: Columna de Refuerzo.

Por último, se recomienda controlar el posible punzamiento en la pared de tubo de la caldera debido al choque con las guías de los stoppers. Esto ocurre cuando las columnas de sacrificio que trabajan en la dirección X plastifican y en consecuencia, las guías de los stoppers en la dirección Y tienden a acercarse a la pared de tubo, análogo para el otro caso. Por lo tanto, se debe controlar que el desplazamiento de la caldera no sea mayor a la distancia libre entre las guías y la pared de tubo, figura 55.

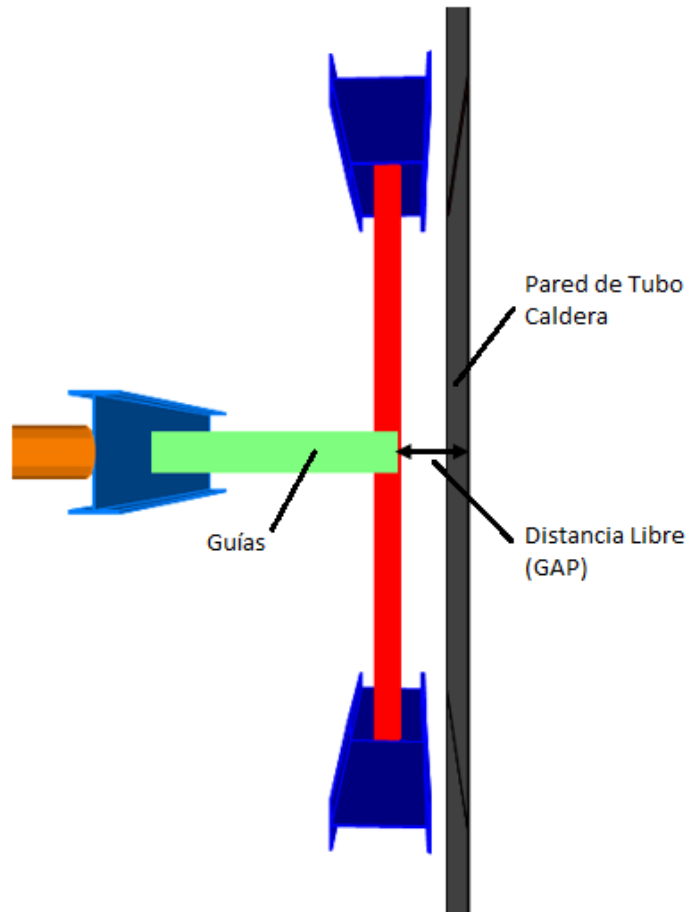


Figura 55: Distancia Libre (GAP).

GLOSARIO

AISC	Instituto Americano de Construcción en Acero.
ASCE	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.
Buckstays	Estructura rigidizadora de la caldera.
Caldera	Maquina diseñada para generar vapor.
Central Térmica	Conjunto de instalaciones empleadas en la generación de energía eléctrica.
DHI	Doosan Heavy Industries.
EPC	Engineering, Procurement and Construction
ICHA	Instituto Chileno del Acero.
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MAT de Fundación	Fundación sin zapatas aisladas.
Modelo ISE	Modelo con interacción suelo estructura.
Modelo Fixed	Modelo sin interacción suelo estructura.
Rocking	Rotación global de la estructura.
SIC	Sistema Interconectado Central.
SING	Sistema Interconectado del Norte Grande.

BIBLIOGRAFÍA

1. Crisafulli, Francisco. “Diseño Sismoresistente de Construcciones de Acero”. Ed. 3, Alacero. Santiago de Chile, 2013.
2. Hormazábal Reed, Patricio. “Modelo Dinámico de Calderas Colgantes Bajo la Acción de Grandes Terremotos en Chile”. Memoria para optar al título de Ingeniero, Universidad de Chile, 2000.
3. Campos Canessa, Gonzalo. “Modelo Dinámico de Calderas Colgantes Incorporando Interacción Suelo Estructura Bajo la Acción de Grandes Terremotos”. Memoria para optar al título de Ingeniero. Universidad de Chile, 2005.
4. Vera Herrera, Gonzalo Nicolás. ”Análisis Sísmico No Lineal de la Estructura de Soporte de una Caldera Mediante Método de Pushover”. Memoria para optar al título de Ingeniero. Universidad Católica de Chile, 2008.
5. Generadoras. “Boletín Mercado Eléctrico Sector Generación”. Informe de generación eléctrica. Generadoras, Chile, 2017.
6. Instituto Nacional de Normalización. “Diseño Sísmico de Edificios. Norma NCh433 Of 1996”. Santiago, Chile.
7. Instituto Nacional de Normalización. “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales. Norma NCh2369 Of 2003”. Santiago, Chile.
8. ANSI/AISC 360 - 2010. “Specificacion for Structural Steel Buildings”. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, EE.UU.
9. ASCE/SEI 07 – 10. “Minimum Design Load for Buildings and Other Structures” American Society of Civil Engineers. Virginia, EE.UU.
10. ASCE/SEI 41 – 13. “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”. American Society of Civil Engineers. Virginia, EE.UU.
11. Computer & Structures, Inc. – CSI (2015). SAP2000 (version 17.3.0). Programa Computacional. Berkeley, CA, EE.UU. Computer & Structures, Inc.
12. Seismosoft Inc. Seismosignal 2016. Programa Computacional, Piazza Castello 19, 27100 Pavia, Italia. Seismosoft Inc.

ANEXOS

A1. Diseño de Columna de Sacrificio Stopper Tipo I.

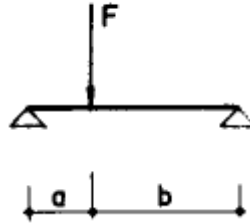
Características del Modelo:

Largo Columna: $L_{col} := 2\pi$

Carga Puntual: $F := 30\text{tonf}$

Geometría: $a := 0.768\pi$

$b := L_{col} - a = 1.232\pi$



Características de Acero:

$$E := 20389019 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$f_y := 35153.48 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} = 3515.348 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Características de la Sección:

$$H := 250\text{mm}$$

$$B_f := 140\text{mm}$$

$$t_w := 6\text{mm}$$

$$t_f := 9\text{mm}$$

$$h := H - 2t_f = 232\text{mm}$$

$$h_o := H - t_f = 241\text{mm}$$

$$I_x := \frac{1}{12} \cdot [B_f \cdot H^3 - (B_f - t_w) \cdot h^3]$$

$$I_y := \frac{1}{12} (2 \cdot t_f \cdot B_f^3 + h \cdot t_w^3)$$

$$A := 2 \cdot B_f \cdot t_f + h \cdot t_w$$

$$Z_x := B_f \cdot t_f \cdot h_o + \frac{h^2 \cdot t_w}{4}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$C_w := \frac{I_y \cdot h_o^2}{4}$$

$$S_x := 2 \cdot \frac{I_x}{H}$$

$$J := \frac{2 \cdot B_f \cdot t_f^3 + h \cdot t_w^3}{3}$$

$$I_x = 4285.16\text{cm}^4$$

$$I_y = 412.02\text{cm}^4$$

$$A = 39.12\text{cm}^2$$

$$r_x = 10.47\text{cm}$$

$$r_y = 3.25\text{cm}$$

$$J = 8.47\text{cm}^4$$

$$Z_x = 384.4\text{cm}^3$$

$$S_x = 342.81\text{cm}^3$$

$$C_w = 59825.99\text{cm}^6$$

DISEÑO A FLEXIÓN:

Esbeltecetes Ala y Alma:

$$\lambda_{ala} := \frac{B_f}{2 \cdot t_f} = 7.78$$

$$\lambda_{alma} := \frac{h}{t_w} = 38.667$$

Esbeltecetes Límite:

$$\begin{aligned} \text{Ala:} \quad \lambda_{pf} &:= 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} & \lambda_{rf} &:= 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_{pf} &= 9.15 & \lambda_{rf} &= 24.083 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alma:} \quad \lambda_{pw} &:= 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} & \lambda_{rw} &:= 5.70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_{pw} &= 90.55 & \lambda_{rw} &= 137.27 \end{aligned}$$

Compacidad:

$$A_a := \begin{cases} \text{"COMPACTA"} & \text{if } \lambda_{pf} > \lambda_{ala} \\ \text{"NO COMPACTA"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad A_a = \text{"COMPACTA"}$$

$$A_m := \begin{cases} \text{"COMPACTA"} & \text{if } \lambda_{pw} > \lambda_{alma} \\ \text{"NO COMPACTA"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad A_m = \text{"COMPACTA"}$$

$$CASO := \begin{cases} \text{"F2 - Y, LTB"} & \text{if } A_a = \text{"COMPACTA"} \wedge A_m = \text{"COMPACTA"} \\ \text{"OTRO CASO F"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$CASO = \text{"F2 - Y, LTB"}$$

1. Plastificación:

$$M_p := Z_x \cdot f_y = 13.51 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi := 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega := 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$M_{np1} := \phi \cdot M_p = 12.16 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{np2} := \frac{M_p}{\Omega} = 8.09 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

2. Volcamiento:

Longitudes Límite:

$$\text{Simetría Doble: } \underset{\lambda\lambda\lambda}{c} := 1 \quad R_m := 1$$

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{I_y \cdot C_w}{S_x}}$$

$$L_r := 1.95 r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 f_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 f_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_p = 1.38 \text{m}$$

$$L_r = 4.045 \text{m}$$

Esfuerzos Internos:

$$M_{\max} := \frac{F \cdot a \cdot b}{L_{\text{col}}} = 14.193 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M(x) := \begin{cases} \left(\frac{F \cdot b}{L_{\text{col}}}\right) \cdot x & \text{if } 0 \leq x < a \\ \left[\frac{F \cdot b}{L_{\text{col}}}\right] \cdot x - F \cdot (x - a) & \text{if } a \leq x \leq L_{\text{col}} \end{cases}$$

$$dx := \frac{L_{\text{col}}}{4} = 0.5 \text{m}$$

$$M_a := M(dx) = 9.24 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_b := M(2dx) = 11.52 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_c := M(3dx) = 5.76 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$C_b := \min\left(3, \frac{12.5 M_{\max}}{2.5 M_{\max} + 3 \cdot M_a + 4 \cdot M_b + 3 \cdot M_c} \cdot R_m\right) \quad C_b = 1.4$$

$$F_{cr} := \frac{C_b \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L_{\text{col}}}{r_{ts}}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.078 \frac{J \cdot c}{S_x h_o} \cdot \left(\frac{L_{\text{col}}}{r_{ts}}\right)^2} \quad F_{cr} = 11.285 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$M_{\text{vol}} := \begin{cases} \text{"NO APLICA"} & \text{if } L_{\text{col}} \leq L_p \\ \left[C_b \cdot \left[M_p - (M_p - 0.7 f_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{L_{\text{col}} - L_p}{L_r - L_p}\right) \right] \right] & \text{if } L_p < L_{\text{col}} \leq L_r \\ (F_{cr} \cdot S_x) & \text{if } L_r < L_{\text{col}} \end{cases}$$

$$M_{nvol} = 17.277 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi = 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega = 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$M_{nvol1} := \phi \cdot M_{nvol} = 15.549 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{nvol2} := \frac{M_{nvol}}{\Omega} = 10.345 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{Controla} := \begin{cases} \text{"PLASTIFICACION"} & \text{if } M_{nvol2} > M_{np2} \\ \text{"VOLCAMIENTO"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Controla} = \text{"PLASTIFICACION"}$$

$$M_{ncontrol_LRFD} := \min(M_{nvol1}, M_{np1})$$

$$M_{ncontrol_LRFD} = 12.162 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{ncontrol_ASD} := \min(M_{nvol2}, M_{np2})$$

$$M_{ncontrol_ASD} = 8.092 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

Chequeo Resistencia:

$$\text{Chequeo}_{ASD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{ncontrol_ASD} \geq M_{max} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{ASD} = \text{"NO CUMPLE"}$$

$$F_{U_{ASD}} := \frac{M_{max}}{M_{ncontrol_ASD}} = 1.754$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{ncontrol_LRFD} \geq M_{max} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} = \text{"NO CUMPLE"}$$

$$F_{U_{LRFD}} := \frac{M_{max}}{M_{ncontrol_LRFD}} = 1.167$$

DISEÑO A CORTE:

Esfuerzo de Corte

$$\phi_v := 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega_v := 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$A_w := t_w \cdot h = 1392 \text{ mm}^2$$

Esbeltez del Alma:

$$\lambda_{\text{valma}} := \frac{h}{t_w} = 38.667$$

$$k_v := 5 \quad \text{Para valores de } h/t_w < 260$$

$$\text{Atiesadores} := \left(\begin{array}{l} \text{"NO NECESITA"} \text{ if } \lambda_{\text{valma}} \leq 2.46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"SI NECESITA"} \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

Atiesadores = "NO NECESITA"

$$C_v := \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ if } \lambda_{\text{valma}} \leq 1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}}}{\frac{h}{t_w}} \text{ if } 1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} < \lambda_{\text{valma}} \leq 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \\ \frac{1.51 \cdot k_v \cdot E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 \cdot f_y} \text{ if } \lambda_{\text{valma}} > 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \end{array} \right.$$

$$C_v = 1$$

$$V_n := 0.6 f_y \cdot A_w \cdot C_v = 29.36 \text{ tonf}$$

$$V_{n_{\text{LRFD}}} := V_n \cdot \phi_v = 26.424 \text{ tonf}$$

$$V_{n_{\text{ASD}}} := \frac{V_n}{\Omega_v} = 17.581 \text{ tonf}$$

Esfuerzos Internos

$$V1 := \frac{F \cdot b}{L_{col}} = 18.48 \text{tonf}$$

$$V2 := \frac{F \cdot a}{L_{col}} = 11.52 \text{tonf}$$

$$V_{sol} := \max(V1, V2) = 18.48 \text{tonf}$$

Chequeo Resistencia:

$$\text{Chequeo}_{LRFD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{nLRFD} \geq V_{sol} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\text{Chequeo}_{ASD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{nASD} \geq V_{sol} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{ASD} = \text{"NO CUMPLE"}$$

$$F_{UvLRFD} := \frac{V_{sol}}{V_{nLRFD}} = 0.699$$

$$F_{UvASD} := \frac{V_{sol}}{V_{nASD}} = 1.051$$

A2. Diseño de Columna de Sacrificio Stopper Tipo II

Características del Modelo:

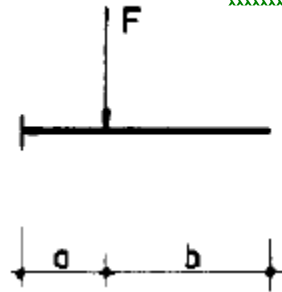
Largo Viga: $L_{stp} := 0.968r$

Carga Puntual: $V2 := 30\text{tonf}$

$$R_{\text{ww}} := \frac{2.5}{1.5} = 1.667$$

$$F_{\text{aaa}} := V2 = 30\text{tonf}$$

$$\text{tonf} := 1000\text{kgf}$$



Características de Acero:

$$E := 20389019 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} = 199947.973\text{MPa}$$

$$f_y := 35153.48 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} = 344.738\text{MPa}$$

Características de la Sección:

$$H_{\text{aaa}} := 300\text{mm}$$

$$Bf := 200\text{mm}$$

$$tw := 6\text{mm}$$

$$tf := 1\text{mm}$$

$$h := H - 2tf = 278\text{mm}$$

$$ho := H - tf = 289\text{mm}$$

$$I_x := \frac{1}{12} \cdot [Bf \cdot H^3 - (Bf - tw) \cdot h^3]$$

$$I_y := \frac{1}{12} (2 \cdot tf \cdot Bf^3 + h \cdot tw^3)$$

$$A_{\text{aaa}} := 2 \cdot Bf \cdot tf + h \cdot tw$$

$$Z_x := Bf \cdot tf \cdot ho + \frac{h^2 \cdot tw}{4}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$C_w := \frac{I_y \cdot ho^2}{4}$$

$$S_x := 2 \cdot \frac{I_x}{H}$$

$$J_{\text{ww}} := \frac{2 \cdot Bf \cdot tf^3 + h \cdot tw^3}{3}$$

$$I_x = 10265.99\text{cm}^4$$

$$I_y = 1467.17\text{cm}^4$$

$$A = 60.68\text{cm}^2$$

$$r_x = 13.01\text{cm}$$

$$r_y = 4.92\text{cm}$$

$$J = 19.75\text{cm}^4$$

$$Z_x = 751.73\text{cm}^3$$

$$S_x = 684.4\text{cm}^3$$

$$C_w = 306348.15\text{cm}^6$$

DISEÑO A FLEXION:

Esbelteces Ala y Alma:

$$\lambda_{ala} := \frac{B_f}{2 \cdot t_f} = 9.09$$

$$\lambda_{alma} := \frac{h}{t_w} = 46.333$$

Esbelteces Límite:

$$\begin{aligned} \text{Ala:} \quad \lambda_{pf} &:= 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} & \lambda_{rf} &:= 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_{pf} &= 9.15 & \lambda_{rf} &= 24.083 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alma:} \quad \lambda_{pw} &:= 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} & \lambda_{rw} &:= 5.70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_{pw} &= 90.55 & \lambda_{rw} &= 137.27 \end{aligned}$$

Compacidad:

$$A_a := \begin{cases} \text{"COMPACTA"} & \text{if } \lambda_{pf} > \lambda_{ala} \\ \text{"NO COMPACTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_a = \text{"COMPACTA"}$$

$$A_m := \begin{cases} \text{"COMPACTA"} & \text{if } \lambda_{pw} > \lambda_{alma} \\ \text{"NO COMPACTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_m = \text{"COMPACTA"}$$

$$\text{CASO} := \begin{cases} \text{"F2 - Y, LTB"} & \text{if } A_a = \text{"COMPACTA"} \wedge A_m = \text{"COMPACTA"} \\ \text{"OTRO CASO F"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{CASO} = \text{"F2 - Y, LTB"}$$

1. Plastificación:

$$M_p := Z_x \cdot f_y = 26.43 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi := 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega := 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$M_{np1} := \phi \cdot M_p = 23.78 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{np2} := \frac{M_p}{\Omega} = 15.82 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

2. Volcamiento:

Longitudes Límite:

$$\text{Simetría Doble: } \xi_{\text{xxx}} := 1 \quad R_m := 1$$

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}}$$

$$L_r := 1.95 r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 f_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 f_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_p = 2.08 \text{m}$$

$$L_r = 5.89 \text{1m}$$

Esfuerzos Internos:

$$M_{\text{max}} := F \cdot L_{\text{stp}} = 29.04 \text{tonf} \cdot \text{r}$$

$$M(x) := F \cdot x - F \cdot L_{\text{stp}}$$

$$dx := \frac{L_{\text{stp}}}{4} = 0.242 \text{m}$$

$$M_a := |M(dx)| = 21.78 \text{tonf} \cdot \text{r}$$

$$M_b := |M(2dx)| = 14.52 \text{tonf} \cdot \text{r}$$

$$M_c := |M(3dx)| = 7.26 \text{tonf} \cdot \text{r}$$

$$C_b := \min\left(3, \frac{12.5 M_{\text{max}}}{2.5 M_{\text{max}} + 3 M_a + 4 M_b + 3 M_c} \cdot R_m\right) \quad C_b = 1.67$$

$$F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L_{\text{stp}}}{r_{ts}}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.078 \frac{J \cdot c}{S_x h_o} \cdot \left(\frac{L_{\text{stp}}}{r_{ts}}\right)^2} \quad F_{cr} = 112.173 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$M_{\text{vol}} := \begin{cases} M_p & \text{if } L_{\text{stp}} \leq L_p \\ \left[C_b \cdot \left[M_p - (M_p - 0.7 f_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{L_{\text{stp}} - L_p}{L_r - L_p}\right) \right] \right] & \text{if } L_p < L_{\text{stp}} \leq L_r \\ (F_{cr} \cdot S_x) & \text{if } L_r < L_{\text{stp}} \end{cases}$$

$$M_{\text{vol}} = 26.426 \text{tonf} \cdot \text{r}$$

$$\phi = 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega = 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$M_{nvol1} := \phi \cdot M_{nvol} = 23.783 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{nvol2} := \frac{M_{nvol}}{\Omega} = 15.824 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{Controla} := \begin{cases} \text{"PLASTIFICACION"} & \text{if } (M_{nvol2} > M_{np2}) \vee (M_{nvol2} = M_{np2}) \\ \text{"VOLCAMIENTO"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Controla} = \text{"PLASTIFICACION"}$$

$$M_{ncontrol_LRFD} := \min(M_{nvol1}, M_{np1})$$

$$M_{ncontrol_LRFD} = 23.783 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{ncontrol_ASD} := \min(M_{nvol2}, M_{np2})$$

$$M_{ncontrol_ASD} = 15.824 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

Chequeo Resistencia:

$$\text{Chequeo}_{ASD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{ncontrol_ASD} \geq M_{max} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{ASD} = \text{"NO CUMPLE"}$$

$$F_{U_{ASD}} := \frac{M_{max}}{M_{ncontrol_ASD}} = 1.835$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{ncontrol_LRFD} \geq M_{max} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} = \text{"NO CUMPLE"}$$

$$F_{U_{LRFD}} := \frac{M_{max}}{M_{ncontrol_LRFD}} = 1.221$$

DISEÑO A CORTE:

Esfuerzo de Corte

$$\phi_v := 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega_v := 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$A_w := t_w \cdot h = 1668 \text{ mm}^2$$

Esbeltez del Alma:

$$\lambda_{\text{valma}} := \frac{h}{t_w} = 46.333$$

$k_v := 5$ Para valores de $h/t_w < 260$

$$\text{Atiesadores} := \left(\begin{array}{l} \text{"NO NECESITA"} \text{ if } \lambda_{\text{valma}} \leq 2.46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"SI NECESITA"} \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

Atiesadores = "NO NECESITA"

$$a := 0.2r$$

$$k_v := 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 14.66$$

$$C_v := \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ if } \lambda_{\text{valma}} \leq 1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}}}{\frac{h}{t_w}} \text{ if } 1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} < \lambda_{\text{valma}} \leq 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \\ \frac{1.51 k_v \cdot E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 \cdot f_y} \text{ if } \lambda_{\text{valma}} > 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \end{array} \right.$$

$$1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} = 101.433$$

$$C_v = 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot f_y \cdot A_w \cdot C_v = 35.182 \text{ tonf}$$

$$V_{n_{\text{LRFD}}} := V_n \cdot \phi_v = 31.663 \text{ tonf}$$

$$V_{n_{\text{ASD}}} := \frac{V_n}{\Omega_v} = 21.067 \text{ tonf}$$

Esfuerzos Internos

$$V_1 := F = 30 \text{ tonf}$$

$$V_{\text{sol}} := V_1 = 30 \text{ tonf}$$

Chequeo Resistencia:

$$\text{Chequeo}_{v_{\text{LRFD}}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{n_{\text{LRFD}}} \geq V_{\text{sol}} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{v_{\text{LRFD}}} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\text{Chequeo}_{v_{\text{ASD}}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{n_{\text{ASD}}} \geq V_{\text{sol}} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{v_{\text{ASD}}} = \text{"NO CUMPLE"}$$

$$F_{U_{v_{\text{ASD}}}} := \frac{V_{\text{sol}}}{V_{n_{\text{ASD}}}} = 1.424$$

$$F_{U_{v_{\text{LRFD}}}} := \frac{V_{\text{sol}}}{V_{n_{\text{LRFD}}}} = 0.947$$

A3. Diagrama Momento Curvatura según ASCE/SEI 41-13

El ASCE41-13 presenta unas tablas que tienen respaldo teórico y experimental. De ellas se encuentra de forma sencilla las relaciones momento rotación y a partir de ellas se infieren las relaciones momento curvatura.

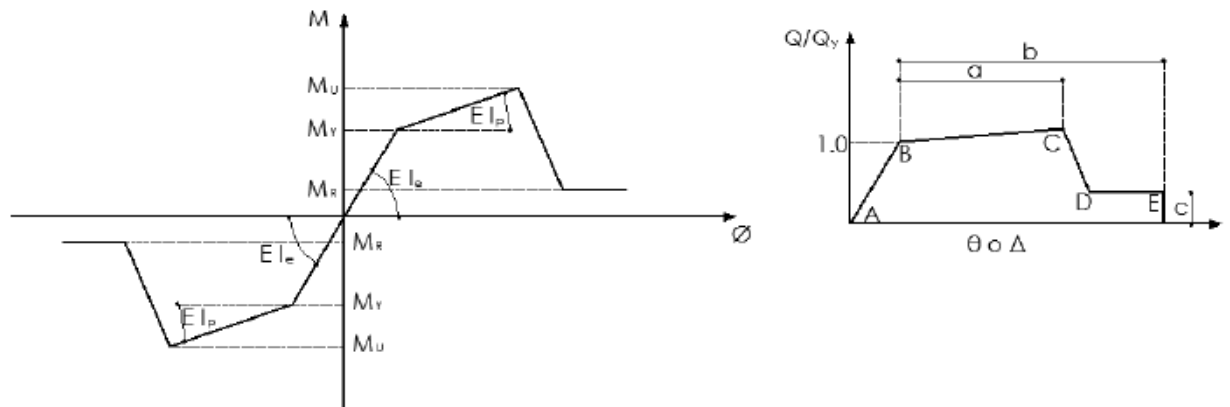


Figura 56: Relaciones Momento Curvatura y Modelo del ASCE41-13

El procedimiento consiste en generar el diagrama momento giro a partir de las condiciones de la tabla 25. Para determinar el diagrama se deben verificar las condiciones a y b. En caso de que no se cumpla ninguna de las dos se debe interpolar linealmente, caso c.

En la tabla 25, se presentan los valores propuestos por el ASCE41-13 para vigas de acero a flexión.

Condición	a	b	c
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0.6
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0.2
c. Otro	Interpolación Lineal	Interpolación Lineal	Interpolación Lineal

Tabla 25: Parámetros y criterios de aceptación según ASCE41-13.

A continuación se presentan los cálculos para la obtención del diagrama momento curvatura.

$$a) \quad \frac{Bf}{2 \cdot tf} = 9.091 < \frac{52}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} = 7.354 \quad y \quad \frac{H}{tw} = 50 < \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} = 59.114$$

$$b) \quad \frac{Bf}{2 \cdot tf} = 9.091 > \frac{65}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} = 9.192 \quad \acute{o} \quad \frac{H}{tw} = 50 > \frac{640}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} = 90.51$$

c) Si no se cumple una de las condiciones se debe interpolar linealmente

Rectas

$$ya(x) := \left(\frac{4 - 9}{\frac{640}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} - \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}}} \right) \cdot \left(x - \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} \right) + 9 \quad ya\left(\frac{H}{tw}\right) = 10.452$$

$$yb(x) := \left(\frac{6 - 11}{\frac{640}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} - \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}}} \right) \cdot \left(x - \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} \right) + 11 \quad yb\left(\frac{H}{tw}\right) = 12.452$$

$$yc(x) := \left(\frac{0.2 - 0.6}{\frac{640}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} - \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}}} \right) \cdot \left(x - \frac{418}{\sqrt{\frac{fy}{ksi}}} \right) + 0.6 \quad yc\left(\frac{H}{tw}\right) = 0.716$$

Relaci3n Momento Giro

$$L_{col} := L_{stp} = 0.968m$$

$$\theta_y := \frac{Z_x \cdot fy \cdot L_{col}}{6 \cdot E \cdot I_x} = 2.037 \times 10^{-3}$$

$$\theta_u := \theta_y + ya\left(\frac{H}{tw}\right) \cdot \theta_y = 0.023$$

$$M_y := Z_x \cdot fy = 26.426 \text{tonf} \cdot m$$

$$M_u := M_y + 0.03E \cdot I_x \frac{(\theta_u - \theta_y)}{m} = 27.763 \text{tonf} \cdot m$$

$$M_r := yc\left(\frac{H}{tw}\right) \cdot M_y = 18.924 \text{tonf} \cdot m$$

$$\theta_r := yb\left(\frac{H}{tw}\right) \cdot \theta_y = 0.025$$

Relación Momento Curvatura

$$M_{\max} = 29.04 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi_y := \frac{M_y}{E \cdot I_x} = 0.013 \frac{1}{\text{m}}$$

$$\phi_u := \frac{M_u - M_y}{0.03 E \cdot I_x} + \phi_y = 0.034 \frac{1}{\text{m}}$$

A4. Diseño Guías Stoppers

Características del Modelo:

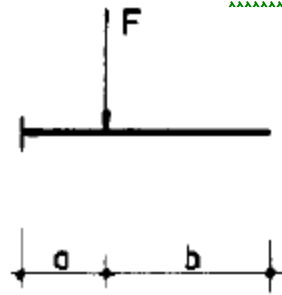
Largo Viga: $L_{\text{stp}} := 1.3 \text{ m}$

Carga Puntual: $V2 := 50 \text{ tonf}$

$$R := \frac{2.5}{1.5} = 1.667$$

$$F := V2 = 50 \text{ tonf}$$

$\text{tonf} := 1000 \text{ kgf}$



Características de Acero:

$$E := 20389019 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} = 199947.97 \text{ MPa}$$

$$f_y := 35153.48 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} = 344.738 \text{ MPa}$$

Características de la Sección:

$$H := 600 \text{ mm}$$

$$B_f := 200 \text{ mm}$$

$$t_w := 12 \text{ mm}$$

$$t_f := 20 \text{ mm}$$

$$h := H - 2t_f = 560 \text{ mm}$$

$$h_o := H - t_f = 580 \text{ mm}$$

$$I_x := \frac{1}{12} \cdot [B_f \cdot H^3 - (B_f - t_w) \cdot h^3]$$

$$I_y := \frac{1}{12} (2 \cdot t_f \cdot B_f^3 + h \cdot t_w^3)$$

$$A := 2 \cdot B_f \cdot t_f + h \cdot t_w$$

$$Z_x := B_f \cdot t_f \cdot h_o + \frac{h^2 \cdot t_w}{4}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$C_w := \frac{I_y \cdot h_o^2}{4} \quad S_x := 2 \cdot \frac{I_x}{H} \quad J_{\omega} := \frac{2 \cdot B_f \cdot t_f^3 + h \cdot t_w^3}{3}$$

$$I_x = 84868.27 \text{cm}^4$$

$$I_y = 2674.73 \text{cm}^4$$

$$A = 147.2 \text{cm}^2$$

$$r_x = 24.01 \text{cm}$$

$$r_y = 4.26 \text{cm}$$

$$J = 138.92 \text{cm}^4$$

$$Z_x = 3260.8 \text{cm}^3$$

$$S_x = 2828.94 \text{cm}^3$$

$$C_w = 2249448.49 \text{cm}^6$$

DISEÑO A FLEXION:

Esbelteces Ala y Alma:

$$\lambda_{ala} := \frac{B_f}{2 \cdot t_f} = 5$$

$$\lambda_{alma} := \frac{h}{t_w} = 46.667$$

Esbelteces Límite:

$$\begin{aligned} \text{Ala:} \quad \lambda_{pf} &:= 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} & \lambda_{rf} &:= 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_{pf} &= 9.15 & \lambda_{rf} &= 24.083 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alma:} \quad \lambda_{pw} &:= 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} & \lambda_{rw} &:= 5.70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \lambda_{pw} &= 90.55 & \lambda_{rw} &= 137.27 \end{aligned}$$

Compacidad:

$$A_a := \begin{cases} \text{"COMPACTA"} & \text{if } \lambda_{pf} > \lambda_{ala} \\ \text{"NO COMPACTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_a = \text{"COMPACTA"}$$

$$A_m := \begin{cases} \text{"COMPACTA"} & \text{if } \lambda_{pw} > \lambda_{alma} \\ \text{"NO COMPACTA"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_m = \text{"COMPACTA"}$$

$$\text{CASO} := \begin{cases} \text{"F2 - Y, LTB"} & \text{if } A_a = \text{"COMPACTA"} \wedge A_m = \text{"COMPACTA"} \\ \text{"OTRO CASO F"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{CASO} = \text{"F2 - Y, LTB"}$$

1. Plastificación:

$$M_p := Z_x \cdot f_y = 114.63 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi := 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega := 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$M_{np1} := \phi \cdot M_p = 103.17 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{np2} := \frac{M_p}{\Omega} = 68.64 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

2. Volcamiento:

Longitudes Límite:

Simetría Doble: $c_{xx} := 1$ $R_m := 1$

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}}$$

$$L_r := 1.95 r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7 f_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7 f_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_p = 1.81 \text{ m}$$

$$L_r = 5.415 \text{ m}$$

Esfuerzos Internos:

$$M_{\max} := F \cdot L_{\text{stp}} = 65 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$M(x) := F \cdot x - F \cdot L_{\text{stp}}$$

$$dx := \frac{L_{\text{stp}}}{4} = 0.325 \text{ m}$$

$$M_a := |M(dx)| = 48.75 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_b := |M(2dx)| = 32.5 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_c := |M(3dx)| = 16.25 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$C_b := \min\left(3, \frac{12.5 M_{\max}}{2.5 M_{\max} + 3 M_a + 4 M_b + 3 M_c} \cdot R_m\right) \quad C_b = 1.67$$

$$F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L_{\text{stp}}}{r_{ts}}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.078 \frac{J \cdot c}{S_x h_o} \cdot \left(\frac{L_{\text{stp}}}{r_{ts}}\right)^2} \quad F_{cr} = 55.511 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$M_{nvol} = 114.628 \text{tonf} \cdot r$$

$$\phi = 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega = 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$M_{nvol1} := \phi \cdot M_{nvol} = 103.166 \text{tonf} \cdot r$$

$$M_{nvol2} := \frac{M_{nvol}}{\Omega} = 68.64 \text{tonf} \cdot r$$

$$\text{Controla} := \begin{cases} \text{"PLASTIFICACION"} & \text{if } (M_{nvol2} > M_{np2}) \vee (M_{nvol2} = M_{np2}) \\ \text{"VOLCAMIENTO"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Controla} = \text{"PLASTIFICACION"}$$

$$M_{ncontrol_{LRFD}} := \min(M_{nvol1}, M_{np1})$$

$$M_{ncontrol_{LRFD}} = 103.166 \text{tonf} \cdot r$$

$$M_{ncontrol_{ASD}} := \min(M_{nvol2}, M_{np2})$$

$$M_{ncontrol_{ASD}} = 68.64 \text{tonf} \cdot r$$

Chequeo Resistencia:

$$\text{Chequeo}_{ASD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{ncontrol_{ASD}} \geq M_{max} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{ASD} = \text{"CUMPLE"}$$

$$F_{U_{ASD}} := \frac{M_{max}}{M_{ncontrol_{ASD}}} = 0.947$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{ncontrol_{LRFD}} \geq M_{max} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{LRFD} = \text{"CUMPLE"}$$

$$F_{U_{LRFD}} := \frac{M_{max}}{M_{ncontrol_{LRFD}}} = 0.63$$

DISEÑO A CORTE:

Esfuerzo de Corte

$$\phi_v := 0.9 \quad (\text{LRFD})$$

$$\Omega_v := 1.67 \quad (\text{ASD})$$

$$A_w := t_w \cdot h = 6720 \text{ mm}^2$$

Esbeltéz del Alma:

$$\lambda_{\text{valma}} := \frac{h}{t_w} = 46.667$$

$$k_v := 5 \quad \text{Para valores de } h/t_w < 260$$

$$\text{Atiesadores} := \left(\begin{array}{l} \text{"NO NECESITA"} \text{ if } \lambda_{\text{valma}} \leq 2.46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"SI NECESITA"} \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

Atiesadores = "NO NECESITA"

$$a := 0.2r$$

$$k_v := 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 44.2$$

$$C_v := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{\text{valma}} \leq 1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}}}{\frac{h}{t_w}} & \text{if } 1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} < \lambda_{\text{valma}} \leq 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \\ \frac{1.51 \cdot k_v \cdot E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 \cdot f_y} & \text{if } \lambda_{\text{valma}} > 1.37 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$1.10 \sqrt{k_v \cdot \frac{E}{f_y}} = 176.124$$

$$C_v = 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot f_y \cdot A_w \cdot C_v = 141.739 \text{ tonf}$$

$$V_{n_{LRFD}} := V_n \cdot \phi_v = 127.565 \text{ tonf}$$

$$V_{n_{ASD}} := \frac{V_n}{\Omega_v} = 84.874 \text{ tonf}$$

Esfuerzos Internos

$$V_1 := F = 50 \text{ tonf}$$

$$V_{sol} := V_1 = 50 \text{ tonf}$$

Chequeo Resistencia:

$$\text{Chequeo}_{v_{LRFD}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{n_{LRFD}} \geq V_{sol} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{v_{LRFD}} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\text{Chequeo}_{v_{ASD}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{n_{ASD}} \geq V_{sol} \\ \text{"NO CUMPLE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Chequeo}_{v_{ASD}} = \text{"CUMPLE"}$$

$$F_{Uv_{ASD}} := \frac{V_{sol}}{V_{n_{ASD}}} = 0.589$$

$$F_{Uv_{LRFD}} := \frac{V_{sol}}{V_{n_{LRFD}}} = 0.392$$

A5. Metodología Análisis de Pushover

A continuación se presenta la metodología que se utilizó para determinar la curva fuerza deformación correspondiente a cada una de las columnas de sacrificio.

- 1) Se definió material y sección de la columna.
- 2) Luego, se definió load pattern Live. Ver figura 49.
- 3) Se modeló apoyos, columna y asignó carga unitaria en el punto de aplicación de la carga. Ver figura 50.
- 4) Se definió y asignó rótulas plásticas a la columna. Ver figura 51.
- 5) Se editó load case Live a tipo de análisis no lineal, asignó nodo de control, y definió parámetros para el análisis. Ver figuras 52 y 53.
- 6) Para la obtención de la curva de respuesta fuerza deformación, figura 54, se abrió la pestaña de display y luego se ingresó a show static pushover curve.

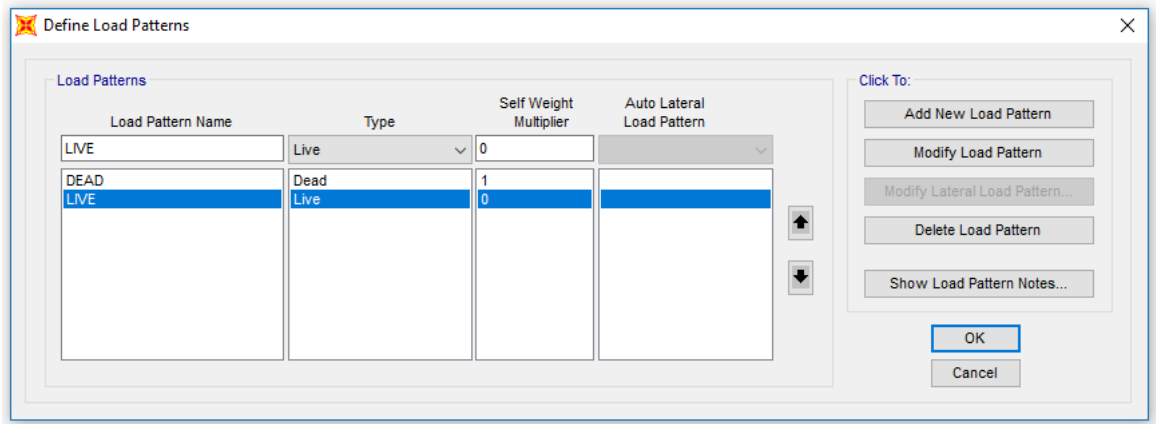


Figura 57: Load Patterns – Live.

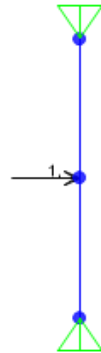


Figura 58: Modelación y Asignación de Carga.

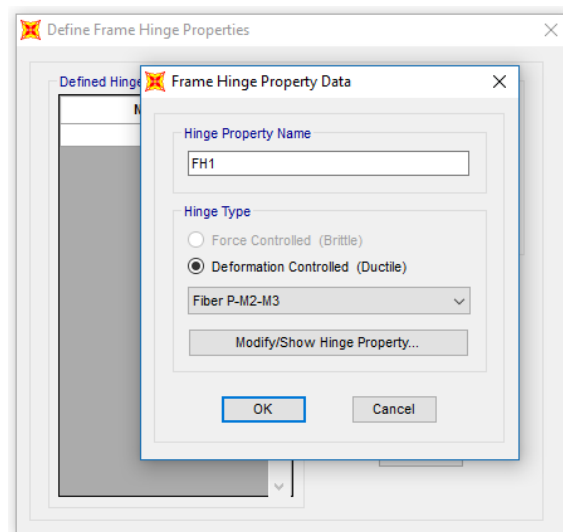


Figura 59: Rótula Plástica.

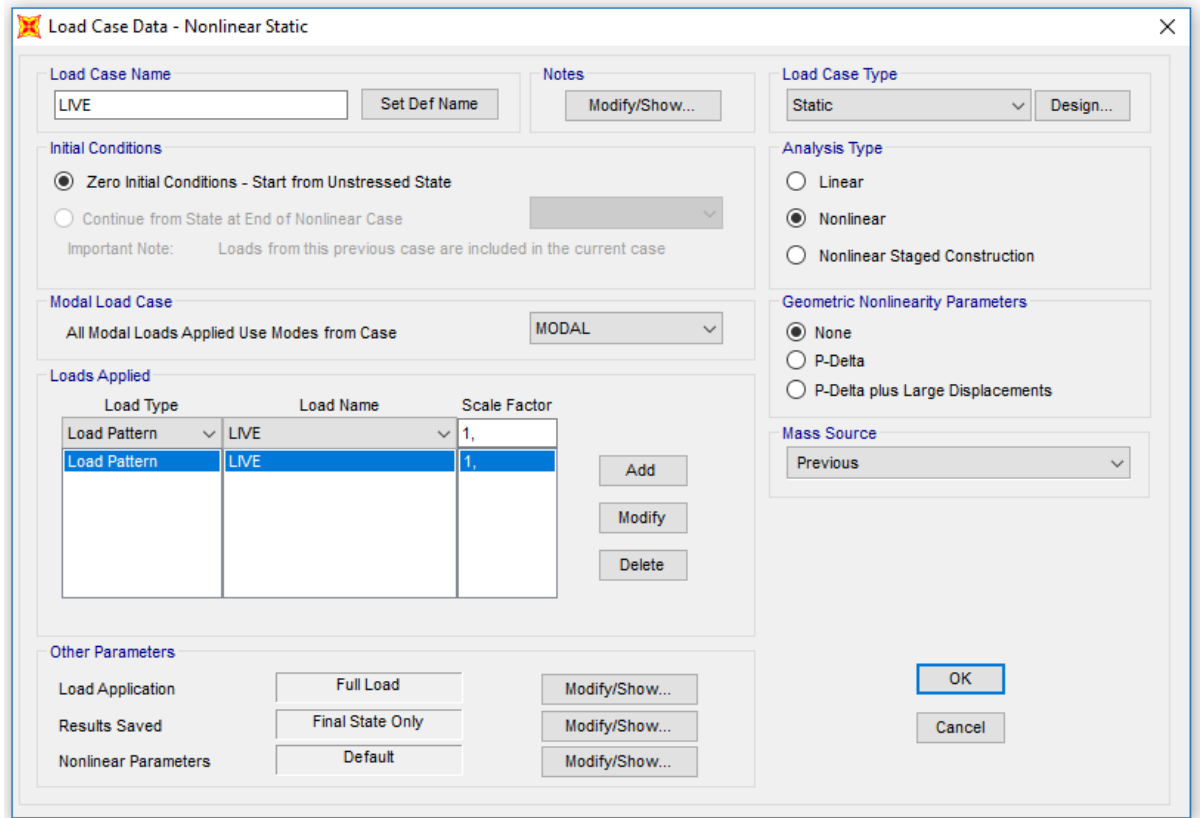


Figura 60: Load Case Live.

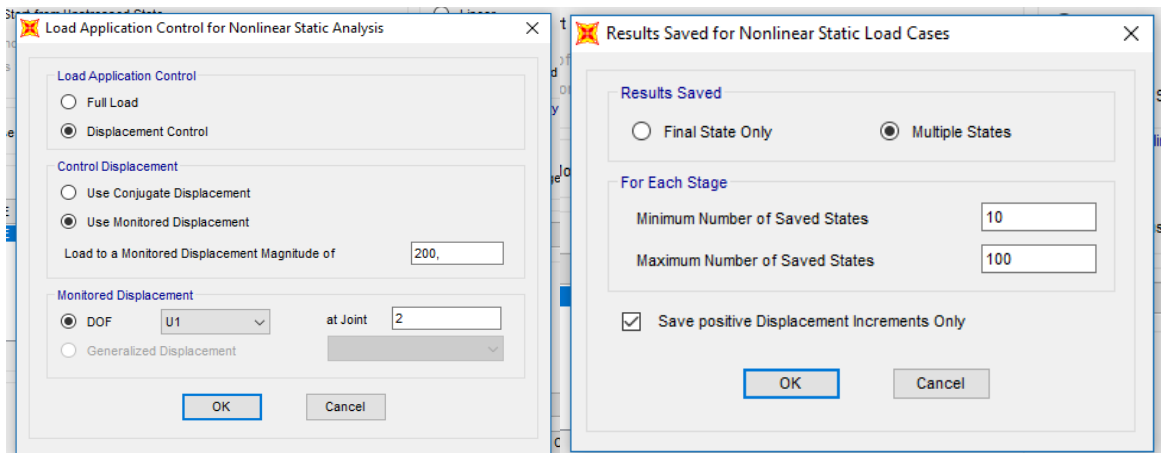


Figura 61: Otros Parámetros para Análisis de Pushover.

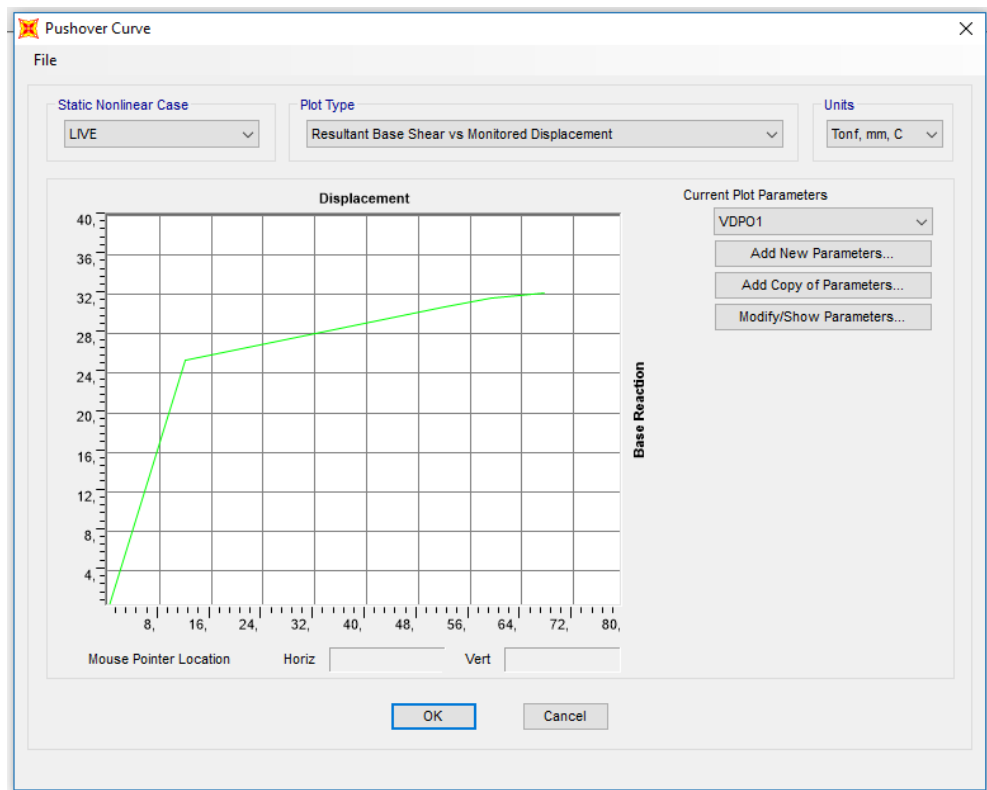


Figura 62: Curva Fuerza Deformación – Análisis de Pushover.