



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

ESTRUCTURACION Y ANALISIS SISMICO DE UN REACTOR
NUCLEAR DE POTENCIA PARA CHILE, UTILIZANDO EL
METODO DE ELEMENTOS FINITOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER MILLA GONZALEZ

PROFESOR GUIA
MAURICIO SARRAZIN ARELLANO

MIEMBROS DE LA COMISION
RUBEN BOROSCHECK KRAUSKOPF
TOMAS GUENDELMAN BEDRACK

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2008



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ESTRUCTURACION Y ANALISIS SISMICO DE UN REACTOR
NUCLEAR DE POTENCIA PARA CHILE, UTILIZANDO EL
METODO DE ELEMENTOS FINITOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER MILLA GONZALEZ

PROFESOR GUIA
MAURICIO SARRAZIN ARELLANO

MIEMBROS DE LA COMISION
RUBEN BOROSCHECK KRAUSKOPF
TOMAS GUENDELMAN BEDRACK

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: FRANCISCO MILLA GONZALEZ
FECHA: 25/08/2008
PROF. GUIA: SR. MAURICIO SARRAZIN A.

ESTRUCTURACIÓN Y ANÁLISIS SÍSMICO DE UN REACTOR NUCLEAR DE POTENCIA PARA CHILE, UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

La generación eléctrica basada en la fisión de átomos es un logro científico-tecnológico utilizado de manera masiva desde la década del 50. Si bien Chile tiene experiencia en el uso de energía nuclear, la utilización para generación eléctrica es desconocida, por lo tanto, el objetivo principal del presente trabajo de título, el cual contó con la ayuda de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, es sumar experiencia, mediante el conocimiento de las estructuras y de los procesos de diseño involucrados en centrales nucleares de potencia.

El estudio se centró en la obtención de la respuesta de las estructuras para los sismos de diseño definidos. Además de cumplir con los requerimientos de esfuerzos y deformaciones de los materiales utilizados según las normas de diseño escogidas. El análisis se realiza mediante el método de elementos finitos ocupando programas computacionales utilizados en las oficinas de cálculo en el país.

El proceso consistió en la elección del tipo de reactor y lugar de emplazamiento, estructuración, confección de planos para finalmente realizar la modelación y análisis de resultados. Cada proceso se realizó de acuerdo a las recomendaciones de los códigos de seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ACI capítulos 349 y 359, NCh 2369 Of 2003 y ASME section III, Division 2, además de las recomendaciones de los fabricantes de los programas computacionales utilizados e hipótesis asumidas. Las solicitaciones sísmicas se determinaron a partir de la Norma Chilena Oficial NCh 2369 Of.2003, además se utilizaron registros sintéticos en el tiempo que representan las características del sitio escogido para el emplazamiento.

Como conclusiones del trabajo podemos destacar, que los requerimientos del diseño sísmico para las centrales nucleares son mas exigentes comparados con las estructuras convencionales. El diseño de estructuras, sistemas y componentes de las plantas nucleares necesita ser calificado para los requerimientos de operación contra los efectos de numerosos eventos naturales los cuales son catalogados de manera conservativa, entre los cuales los sismos son de gran importancia.

Las estructuras del reactor y el edificio de contención resisten las solicitaciones de diseño de las normas chilenas sometiendo a tensiones dentro de los límites establecidos a los elementos estructurales, los valores para las frecuencias y desplazamientos están dentro de los resultados de análisis internacionales para este tipo de estructuras. Estos resultados nos permiten afirmar, de manera preliminar, que pese a que Chile califica como uno de los países de mayor sismicidad en el mundo, este hecho no es impedimento para la realización de proyectos de centrales nucleares de potencia en el territorio nacional, debido a que se garantiza una resistencia mínima ante tales eventos.

AGRADECIMIENTOS

No puedo dejar de mencionar a las personas que de alguna u otra manera participaron en la realización del presente trabajo y en mi formación profesional. Gracias por su amistad e incondicional apoyo.

- Comisión Chilena de Energía Nuclear(CCHEN): Heriberto, Mauricio, Margarita y Melisande. En especial quisiera agradecer a Don Gonzalo Torres, Director del departamento de Materiales Nucleares quien siempre me motivó para la realización del trabajo y estuvo siempre disponible a mis consultas.
- Universidad de Chile: a mis profesores de comisión Rubén Boroscheck y Tomás Guendelman, los cuales hicieron importantes aportes al trabajo final.
- Sr. Alberto Saez que siempre estuvo disponible a mis consultas.
- A mis compañeros de trabajo GA, PSD y JPL, gracias por su paciencia y comprensión.

De manera muy especial, quiero dar las gracias mi profesor guía Sr.Mauricio Sarrazin, que desde el primer momento no dudó en llevar a cabo este trabajo, teniendo la paciencia y entregando el tiempo necesario para orientar el desarrollo de esta tesis. Gracias por los valiosos aportes que me permitieron finalizar con éxito este trabajo.

Finalmente, quisiera agradecer a mis amigos, y en especial a mi familia, mis padres Carlos y Gladys, mi hermano Carlos Ignacio y mi polola Sofi, los cuales siempre me ayudaron y apoyaron en todo momento.

Para todos ustedes va dedicado este trabajo, los recordaré siempre.

INDICE

1. PRESENTACIÓN	13
1.1. Introducción	13
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo General	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
1.3. Metodología y Bases de Cálculo	15
1.4. Antecedentes Generales	17
1.4.1. Estructuración	17
1.4.2. Fisión Nuclear	18
1.4.3. Selección del tipo de reactor	19
1.4.4. Selección de sitio	21
2. ESTRUCTURACIÓN DEL REACTOR NUCLEAR DE POTENCIA	23
2.1. Descripción General de los sistemas de Contención	24
2.2. Hipótesis de Estructuración	25
2.3. Geometría de las Estructuras y Equipos	25
2.3.1. Materiales	25
2.3.2. Edificio de Contención	26
2.3.3. Estructuras internas	28
2.3.4. Fundaciones	30

2.3.5.	Vasija del Reactor	30
2.3.6.	Generadores de vapor	31
2.4.	Confección de Planos	32
2.5.	Proceso Constructivo	33
2.6.	Discusión y Conclusiones	38
2.6.1.	Filosofía para la estructuración y seguridad	38
3.	ANTECEDENTES ANÁLISIS SÍSMICO	48
3.1.	Hipótesis para Análisis Sísmico	49
3.2.	Solicitaciones	49
3.2.1.	Combinaciones de Carga	49
3.2.2.	Espectro de diseño	53
3.2.3.	Registros Sintéticos	55
3.2.4.	Peso propio(D)	55
3.2.5.	Sobrecarga(L)	56
3.3.	Comentarios y Conclusiones	56
3.3.1.	Demanda Sísmica	56
3.3.2.	Normativa y Procedimiento de Análisis	56
4.	MODELACIÓN ESTRUCTURAL	58
4.1.	Hipótesis de Modelación	58
4.2.	Modelación de las Estructuras	58
4.2.1.	Edificio de Contención	59
4.2.2.	Estructura Interna	61
4.2.3.	Fundaciones	65
4.2.4.	Equipos y Puntos de control	68
4.2.5.	Modelación del Suelo	68
4.2.6.	Comentarios y Conclusiones	69

5. ANÁLISIS SÍSMICO E INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	70
5.1. Método Modal Espectral: Modelo Empotrado	71
5.1.1. Modos y frecuencias propias de vibrar	71
5.1.2. Esfuerzos	73
5.2. Método Modal Espectral: Modelos de Interacción	77
5.2.1. Modos y frecuencias propias de vibrar	77
5.2.2. Esfuerzos	79
5.2.3. Desplazamientos	79
5.2.4. Estabilidad de Fundaciones	79
5.3. Método de Análisis en el Tiempo	80
5.3.1. Desplazamientos	80
5.3.2. Aceleraciones en puntos de control	81
5.4. Análisis de los Resultados	84
5.4.1. Frecuencias y Modos propios de vibrar	84
5.4.2. Tensiones Admisibles	86
5.4.3. Desplazamientos	87
5.4.4. Verificación de Fundaciones	88
5.4.5. Aceleraciones	88
5.5. Análisis de Sensibilidad de los Modelos	90
5.5.1. Variación de la demanda sísmica	90
5.5.2. Variación de la condición de apoyo	91
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES FINALES	93
6.1. Estructuración, Modelación y Análisis	93
6.2. Recomendaciones para Chile	94
6.3. General	94
ANEXO.	96

A. ESTUDIOS DE EMPLAZAMIENTO EN CHILE 96

LISTA DE FIGURAS

1.1. Proyección de la demanda energética en Chile. Sistemas de energía y su ubicación en Chile	13
1.2. Distribución de la demanda de electricidad en el mundo. Torres de refrigeración en una central nuclear de potencia	14
1.3. Proceso de fisión nuclear. Vista real del proceso de fisión nuclear	19
1.4. Evolución de las tecnologías de reactores	20
1.5. Mapa de intensidad sísmica registrada durante un sismo de intensidad moderada en la localidad de Tocopilla. Zona escogida para el emplazamiento de la central nuclear	22
2.1. Diferentes edificios para reactores tipo PWR utilizados en el mundo	24
2.2. Diseño conceptual del edificio de contención de un reactor nuclear de potencia. Edificio de contención	27
2.3. Configuración final del edificio de contención del reactor nuclear de potencia	28
2.4. Diseño conceptual de la estructura interna de un reactor nuclear de potencia. Vista interior de la ubicación de equipos	29
2.5. Modelo de la vasija del reactor en la que se aprecia su sistema de tuberías y de apoyo. Transporte de la vasija del reactor	31
2.6. Modelo del generador de vapor en la que se aprecia su sistema de apoyo. Instalación de un generador de vapor en la planta nuclear	32
2.7. Excavación en el sitio seleccionado. Colocación de grúas e instalaciones de faena	33
2.8. Colocación de armaduras en la losa de fundación	33
2.9. Colocación de moldajes para hormigonado de las estructuras. Vista de los trabajos nocturnos	34

2.10. Losa de fundación del Edificio de Contención. Colocación de moldajes para los muros internos del reactor y zona de la vasija de reacción	34
2.11. Colocación de moldajes para los muros internos del reactor, zona de la vasija y zona de almacenamiento en caso de derretimiento del núcleo	35
2.12. Enfierradura de zona de la vasija del reactor. Vista del edificio de protección para épocas de invierno	35
2.13. Vista general de las faenas. Enfierradura de muros diagonales para zona de la vasija del reactor y como apoyo de las losas	36
2.14. Enfierradura y moldajes de muros diagonales para zona de la vasija del reactor. Enfierradura de Losas	36
2.15. Colocación de módulos de acero para el edificio de contención. Instalación de grúas para la construcción de la zona de la vasija del reactor	37
2.16. Avance de las estructuras internas y de los edificios de contención	37
2.17. Formato AUTOCAD Planta N°1	41
2.18. Formato AUTOCAD Planta N°2	42
2.19. Formato AUTOCAD Planta N°3	43
2.20. Formato AUTOCAD Planta N°4	44
2.21. Formato AUTOCAD Planta N°5	45
2.22. Formato AUTOCAD Planta N°6	46
2.23. Formato AUTOCAD Corte N°1	47
3.1. Espectro de diseño según NCh2369.Of2003 para la zona escogida definido como $OBE(E_o)$	54
3.2. Registro de Colapso Subductivo definido como $SSE(E_{ss})$	55
4.1. Proceso constructivo del modelo del edificio de contención	59
4.2. Vista superior e inferior del modelo del edificio de contención	60
4.3. Proceso constructivo del modelo de las estructuras internas	61
4.4. Vista frontal y lateral de las estructuras internas	62
4.5. Vista frontal y lateral de los muros de la estructura interna, utilizando otras opciones gráficas del programa	63

4.6. Vista superior y corte de la estructura interna completa considerando losas, utilizando otras opciones gráficas del programa	64
4.7. Proceso constructivo del modelo para las fundaciones	65
4.8. Vista superior de la losa de fundación	66
4.9. Modelo del edificio de contención considerando fundaciones	67
4.10. Modelo de las estructuras internas considerando fundaciones	67
4.11. Puntos en los modelos para control de aceleraciones	68
4.12. Modelo completo del reactor nuclear considerando suelo de fundación	69
5.1. Modelos Edificio de Contención, Estructura Interna y Modelo de interacción.	70
5.2. Modos de vibrar EC externo, Modo N°1 y Modo N°2	71
5.3. Modos de vibrar EC interno, Modo N°3 y Modo N°4	72
5.4. Modos de vibrar IC, Modo N°5 y Modo N°17	72
5.5. Tensiones para Edificio de Contención	74
5.6. Tensiones para Estructura Interna	75
5.7. Tensiones para Fundaciones	76
5.8. Modos de vibrar EC externo, Modo N°1 y Modo N°2	77
5.9. Modos de vibrar EC interno, Modo N°3 y Modo N°4	78
5.10. Modos de vibrar IC, Modo N°5 y Modo N°6	78
5.11. Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección X.	81
5.12. Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección Y.	82
5.13. Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección Z.	82
5.14. Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +8.21, Dirección X.	83
5.15. Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +8.21, Dirección Y.	83

5.16. Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +8.21, Dirección Z.	84
5.17. Espectro obtenido del registro SSE	89
5.18. Espectro de diseño según NCh2369.Of2003 para diferentes tipos de zona sísmica . .	90
5.19. Variación de las aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección X, Y.	91
5.20. Variación de las aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección Z.	92

LISTA DE TABLAS

2.1. Propiedades del hormigón utilizado	26
2.2. Dimensiones y materiales del edificio de contención	27
2.3. Dimensiones y materiales para las estructuras internas	29
2.4. Dimensiones y materiales para losa de fundación	30
2.5. Características de la vasija del reactor	30
2.6. Características del generador de vapor	31
3.1. Parámetros para el análisis elástico dinámico	54
3.2. Sobrecargas de uso utilizadas para el sistema de losas	56
4.1. Datos del modelo del edificio de contención	59
4.2. Datos del modelo de la estructura interna	61
4.3. Datos del modelo de fundaciones	65
5.1. Modos y frecuencias propias de vibrar Modelo Empotrado.	71
5.2. Esfuerzos máximos obtenidos en cada estructura, Modelo Empotrado.	73
5.3. Modos y Frecuencias propias de vibrar.	77
5.4. Esfuerzos máximos obtenidos en cada estructura, Modelo con Suelo.	79
5.5. Desplazamientos Modelo Empotrado	79
5.6. Desplazamientos Modelo con Suelo	79
5.7. Resultados para verificación de tensiones en fundaciones.	80
5.8. Desplazamientos Modelo Empotrado caso análisis en el tiempo	80

5.9. Desplazamientos Modelo con Suelo caso análisis en el tiempo	80
5.10. Tensiones admisibles para los elementos de hormigón	86
5.11. Parámetros para el análisis elástico dinámico en diferentes zonas sísmicas de Chile .	90
5.12. Coeficiente de balasto en función del tipo de terreno	91

Capítulo 1

PRESENTACIÓN

1.1. Introducción

En los últimos tiempos la electrificación global ha tenido tal aumento que ahora no se puede hablar de un país desarrollado si éste no cuenta con un sistema de potencia eléctrica con la suficiente capacidad como para abastecer a los usuarios actuales y otorgar seguridad de abastecimiento a los usuarios futuros.

La ingeniería nacional, preocupada de encontrar nuevas maneras de generación energética, hoy más que nunca, necesita conocer y describir las estructuras que forman parte de la variada generación energética a nivel mundial. La composición de la actual matriz energética primaria del país, es el resultado de privilegiar la elección de combustibles de bajo costo asociados a nuevas tecnologías de generación (ciclo combinado), con el propósito de cubrir los aumentos de demanda pero que, en algunos casos, presentan problemas de abastecimiento.

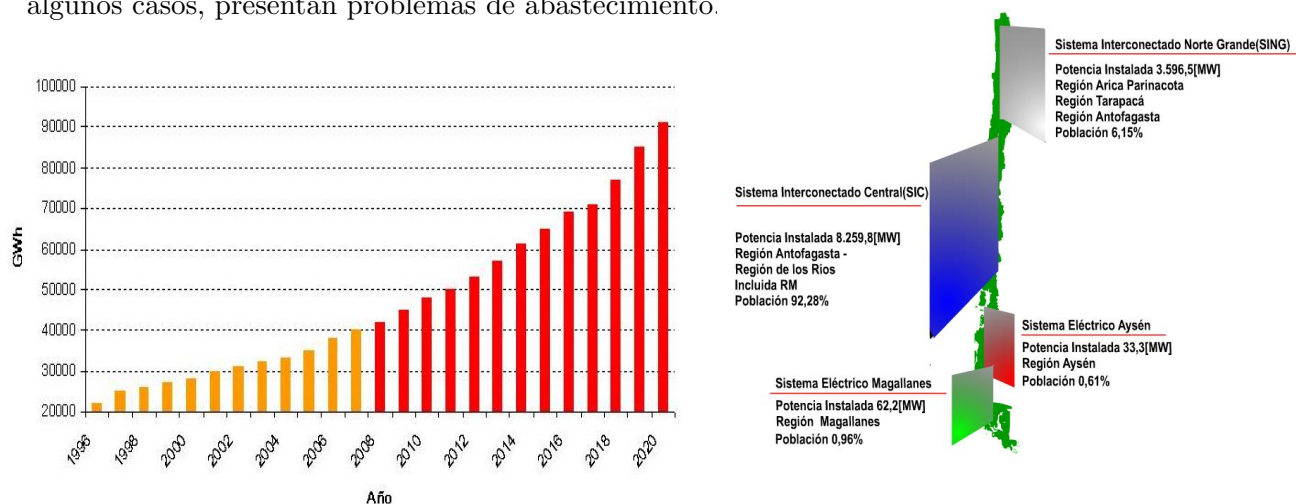


Figura 1.1: Proyección de la demanda energética en Chile. Sistemas de energía y su ubicación en Chile

Es por ello, que es necesario buscar otras fuentes de energía más allá de las que se están ocupando en nuestro país, como por ejemplo: energía eólica, solar, de biomasa o nuclear. La energía nuclear es un tipo de generación eléctrica abundante y basada en la investigación, es un logro de la investigación científico-tecnológica, pero que conlleva también mayores riesgos que los normales asociados a otros tipos de generación eléctrica. A pesar de los riesgos potenciales involucrados, el aporte de la energía nuclear al suministro eléctrico mundial, en la última década, bordea un 16 % en promedio. Actualmente existen 441 reactores nucleares de potencia en operación en 32 naciones y 25 plantas nucleares en construcción, la mayoría de estas últimas en el continente asiático. Entre los países que utilizan ampliamente energía nuclear para la generación de electricidad se encuentran: Francia con un 78 %, Eslovaquia con un 57 %, Bélgica con un 56 %, Suecia con un 50 %, Japón con un 25 % y EEUU con un 20 %. En latinoamérica utilizan energía nuclear de potencia Argentina en un 9 %, Brasil en un 4 % y México en un 5 %^[1]



Figura 1.2: Distribución de la demanda de electricidad en el mundo. Torres de refrigeración en una central nuclear de potencia

El presente trabajo investiga este tipo de generación de potencia, poco conocida en el país, por lo cual se clasifica como un trabajo de tipo exploratorio. Se debe mencionar que es el primer trabajo en el país relacionado con energía nuclear de potencia, que aborda el tema estructural con un cierto nivel de detalle, describiendo los procesos involucrados en el diseño, modelación y análisis de las estructuras, para finalmente responder a la pregunta: ¿En un país altamente sísmico como Chile, es posible construir un reactor nuclear de potencia que resista la demanda sísmica, manteniendo los niveles de seguridad requeridos?.

^[1]Datos correspondientes al Organismo Internacional de Energía Atómica de Naciones Unidas, OIEA.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Análisis sísmico de un reactor nuclear de potencia utilizando el método de elementos finitos, según los requerimientos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y normas nacionales e internacionales de diseño para centrales nucleares de potencia.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Análisis de normativas internacionales relacionadas con seguridad nuclear, para ser adaptadas al caso chileno.
- Estructuración del edificio de contención y estructuras internas de un reactor nuclear de potencia utilizando requerimientos de diseño.
- Evaluación de las sollicitaciones sísmicas del lugar de emplazamiento.
- Estudio de la aplicabilidad del programa SAP2000 para el análisis dinámico de estructuras de tipo nuclear.
- Verificación del diseño estructural del reactor nuclear de potencia.

1.3. Metodología y Bases de Cálculo

A continuación se describe la metodología utilizada en la realización del trabajo:

1. Recopilación de antecedentes presentes en el país relacionados con la energía nuclear. El material recopilado incluyó estudios de emplazamiento, estudios económicos de generación nuclear, presupuestos y ofertas de implementación de un plan nuclear, códigos de diseño y trabajos internacionales relacionados con el tema de interés. Hay que mencionar ciertos aspectos:
 - La poca actualización de la información encontrada, principalmente estudios de consultoras extranjeras realizados en la década de los 70 y los cuales se terminaron a comienzos de la década de los 80^[2].
 - La dificultad que tuvo el proceso de recopilación de información confiable acerca de estructuras nucleares de potencia en un país que no tiene experiencia específica en el tema.
 - La información es de tipo reservada, dificultando la obtención de información.

^[2] Ver Bibliografía.

- No se encontraron estudios ni propuestas de detalle estructural, debido a su clasificación sólo se tienen criterios de tipo general.
 - La normativa recopilada y utilizada no es de lo más actual, se explica ya que el país no desarrolla actualmente un plan nuclear de potencia.
2. Análisis de la información recopilada, lo cual permite establecer el alcance del trabajo a realizar y determinar en que partes del análisis será necesario formular hipótesis.
 3. Definición de parámetros de interés en el análisis, además de los objetivos. Se puede definir como la realización de las bases de cálculo de la estructura.
 4. Elección de tipo de reactor y estructuración, además de elección del lugar de emplazamiento.
 5. Estructuración y confección de planos.
 6. Modelación de las estructuras.
 7. Análisis de resultados y conclusiones.

El trabajo presentado se confecciona siguiendo pasos establecidos, que definimos como las bases de cálculo, las cuales se detallan en los capítulos del trabajo. Los contenidos mínimos presentes en las bases de cálculo para el diseño de plantas nucleares son:

- Identificación de la estructura: descripción de las funciones que debe cumplir.
- Estructuración: descripción del sistema estructural utilizado, el cual debe contemplar:
 - Sistema de cargas verticales y laterales.
 - Sistemas de piso.
 - Alcance del diseño sísmico (deformaciones y fisuración).
- Materiales: identificación de los materiales utilizados.
 - Hormigón
 - Acero
 - Materiales especiales

- Tensiones admisibles: referencia del método de diseño utilizado, norma considerada y resistencias básicas de cálculo para cada material.
 - Método de diseño
 - Norma
 - Hormigón (resistencia a la compresión, resistencia al corte).
 - Acero (resistencia a la tracción por flexión, resistencia al corte).
- Solicitaciones: descripción de las cargas normales y eventuales consideradas en el diseño, referencia a la norma que las establece.
- Combinaciones de carga
- Antecedentes de análisis sísmico
- Diseño de fundaciones

Además se debe mencionar que el carácter exploratorio del trabajo hace necesario que se establezcan hipótesis para cada etapa, las cuales se indican al comienzo de cada capítulo.

1.4. Antecedentes Generales

A continuación se describen de manera general algunos conceptos de interés, los cuales serán utilizados en el trabajo:

1.4.1. Estructuración

La estructuración es el proceso por el cual se define una estructura, mediante la interacción con el arquitecto, capaz de dar estabilidad frente a las solicitaciones que estará sometida durante su vida útil y de acuerdo a la normativa vigente, por lo que realizar una buena estructuración es de suma importancia ya que condiciona un buen diseño.

Históricamente en Chile, país de alta sismicidad, la mayor parte de las estructuras han sido concebidas como estructuras de hormigón armado debido a su buen comportamiento frente a sismos de gran intensidad, donde se han observado daños menores, y a la disponibilidad de mano de obra de bajo nivel de capacitación. Debido a esto, las estructuras del reactor utilizarán hormigón armado como material principal, entre otros.

Entre los requerimientos básicos, una estructura se debe diseñar de modo de satisfacer los siguientes requerimientos:

- Resistencia
 - Capacidad de resistir cargas.
 - Estabilidad de la estructura.
- Rigidez
 - Indeformabilidad frente a las cargas.
 - Usabilidad de la estructura.
- Durabilidad^[3]
 - Materiales inalterables en el tiempo.
 - Capacidad de mantener sus propiedades resistentes.
- Ductilidad
 - Capacidad de disipar energía.
 - Estabilidad de la estructura frente a cargas sísmicas.

Definidos los requerimientos mínimos para las estructuras y la metodología, es posible realizar la identificación y estructuración del reactor nuclear. Para conocer las demandas a las que la estructura estará sometida se identifica el proceso de fisión nuclear como el más importante en la generación energética, proceso que se describe a continuación.

1.4.2. Fisión Nuclear

La energía nuclear es la energía que se produce cuando se rompe o fisiona^[4] un núcleo de uranio U^{235} por un proyectil conveniente, usualmente neutrones. El uranio U^{235} es un isótopo que se encuentra en una proporción de 0,7 % en el uranio natural^[5]. El resto del uranio natural está compuesto por uranio U^{238} . Los núcleos de uranio U^{235} y U^{238} tienen la misma cantidad de protones, 92. Difieren por el número de neutrones 143 para el U^{235} y 146 para el U^{238} .

Cuando se produce una fisión, el elemento constituido por el conjunto protón-neutrón del uranio U^{235} se rompe, produciendo una liberación importante de energía, además se forman dos núcleos radioactivos nuevos, llamados productos de fisión. Otros elementos que se producen son fotones^[6], fragmentos nucleares como partículas alfa, beta y una emisión de tres nuevos neutrones.

^[3]Ver materiales utilizados en capítulo 2.

^[4]Ver Figura 1.3 del proceso de fisión nuclear.

^[5]Actualmente existen estudios de prospección de uranio en el país.

^[6]En forma de Rayos Gamma.

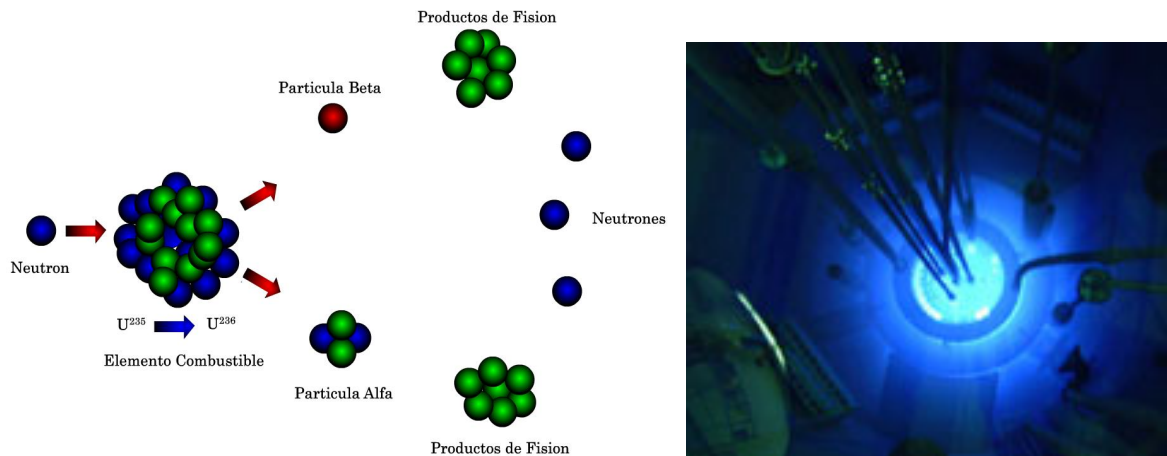


Figura 1.3: Proceso de fisión nuclear. Vista real del proceso de fisión nuclear

El arte del constructor del reactor va a consistir en obtener, por un arreglo conveniente de los materiales que se pueden fisiónar, la manera que uno de estos neutrones vaya a romper otro núcleo U^{235} y así sucesivamente, produciendo una reacción en cadena. La dificultad proviene de que la mayor parte de los materiales de la estructura de los reactores absorben los neutrones sin producir ninguna fisión. Eso mismo ocurre con el uranio U^{238} que absorbe un neutrón para dar lugar a dos transformaciones radiactivas de un nuevo cuerpo que se puede fisiónar, plutonio.

La energía se produce al interior del material fisible, por lo que va a ser necesario entonces transportar este calor hacia agua, que se hará hervir para desencadenar finalmente a un grupo turboalternador, similar a los utilizados por otro tipo de generación de potencia.

1.4.3. Selección del tipo de reactor

La demanda energética, los equipos y los plazos de construcción son generalmente los parámetros que determinan el tipo de reactor a escoger. Los tipos de reactores varían en la manera de distribución de calor, elementos combustibles y moderadores, entre otros. Para el presente trabajo la selección del tipo de reactor es de importancia ya que determina los equipos y sus dimensiones, con el propósito de obtener las cargas generadas y condiciones de apoyo, además de la configuración de la estructura que será modelada.

A modo de resumen, se presenta en la figura 1.4 los tipos de reactores y su evolución.

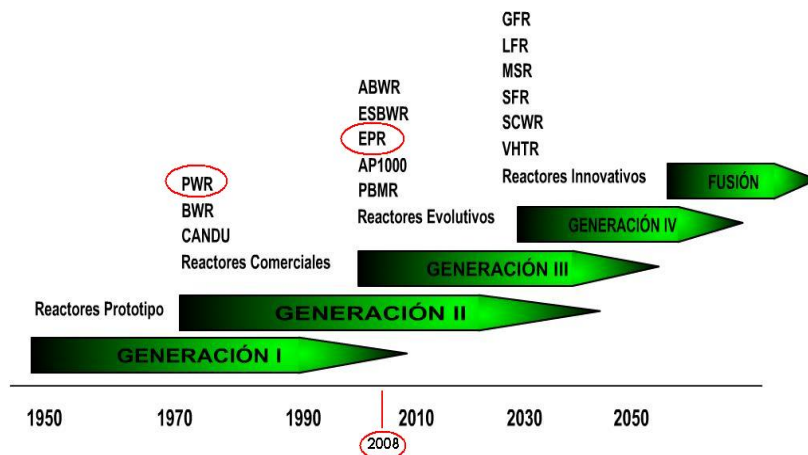


Figura 1.4: Evolución de las tecnologías de reactores

El tipo de reactor seleccionado para el estudio es el llamado reactor de agua presurizada o PWR. Entre las razones más importantes para su selección se mencionan:

- Es actualmente el tipo de reactor con mayor uso en el mundo con más de 260 unidades (Estados Unidos, Francia, Rusia y Japón^[7]).
- Ha tenido un uso continuo debido a su buen funcionamiento, estando presente en las diferentes generaciones de reactores^[8]. Además, su masivo uso nos entrega un conocimiento importante de su funcionamiento y posibles fallas, muchas de las cuales han sido estudiadas y solucionadas, lo que disminuye su riesgo comparado con otros tipos de reactores.
- Su principal sistema de refrigeración es agua, no incorporando otro tipo de refrigerante más complejo.

A continuación se realiza una breve descripción de este tipo de reactor, en el cual, el agua utilizada en los circuitos se encuentra a presiones considerables, lo cual impide que hierva. Esta agua extrae la energía calórica generada en el reactor, y la transporta, a través del circuito primario a altas presiones, hacia un generador de vapor, el cual tiene circuitos secundarios de circulación mantenidos a una presión más débil. Finalmente, esta agua, no radioactiva, se vaporiza y hace funcionar el grupo turbo-alternante.

^[7] Este último destaca por ser un país de alta sismicidad.

^[8] Ver figura 1.4.

1.4.4. Selección de sitio

Debido a la naturaleza del análisis a realizar, se necesita definir un lugar de emplazamiento para la central nuclear en el país. La selección de sitio para el emplazamiento de estructuras de tipo nuclear es un tema complejo, en algunos casos más complejo que el diseño del reactor. En forma complementaria al trabajo se incluye un breve estudio realizado por el autor^[9], acerca del proceso de selección de sitios en el país.

Chile, país de compleja geografía, ofrece diversos sitios aptos para el emplazamiento de estructuras industriales, entre ellas las centrales nucleares. Considerando el estudio realizado para la selección de sitios, se mencionan algunos aspectos de importancia, que se deben considerar:

- Desde el punto de vista sísmico, no existe lugar ideal para la instalación de plantas nucleares en el país, ya que todo el territorio está clasificado sísmicamente en cierto nivel, por lo que la acción sísmica es inevitable, cualquiera sea el lugar de emplazamiento escogido.
- Considerando los diversos factores para la clasificación de sitios, uno de los más importantes es el abastecimiento de agua para el sistema de refrigeración de la central, el cual condiciona la instalación en zonas cercanas a recursos hídricos de importancia o zonas costeras.
- La instalación de la central nuclear debe ser realizada en un lugar estratégico desde el punto de vista energético. Se deben considerar las restricciones técnicas necesarias para la inclusión de una cantidad importante de energía al sistema.
- La importante minería del cobre presente en la zona puede ser fuente de Uranio, combustible principal en una central de nuclear de potencia.

Estos antecedentes nos indican zonas en el país, a nivel general, de posibles emplazamientos en los cuales se han realizado las primeras investigaciones. De todas formas, hay que mencionar que la información es insuficiente para la toma de decisiones.

Finalmente, se decide por la II Región de Antofagasta, específicamente la localidad de Tocopilla, por las siguientes características:

- Posee uno de los parques industriales de generación eléctrica^[10] de mayor crecimiento en el norte del país, especialmente para el abastecimiento de la minería.
- Las industrias instaladas en la zona sirven de antecedentes para el diseño de cualquier otro tipo de estructuras industriales de generación.
- La cercanía con el mar, permitiría un ciclo de refrigeración constante sin considerar problemas de abastecimiento. Además, las características de la zona, permitirían una doble funcionalidad de la central nuclear, mediante desalinización del agua de mar.

^[9] Ver Anexo.

^[10] Plantas de generación termoeléctrica de Norgener y Electroandina.

- Zona de la minería del cobre, la cual permite la obtención de Uranio natural, elemento combustible principal para el abastecimiento de un reactor de potencia.

Estas razones, sumadas a las expresadas en el estudio realizado, hacen de la localidad de Tocopilla un candidato fuerte para el emplazamiento de la central nuclear de potencia en el país. La zona escogida se presenta en la figura 1.5.

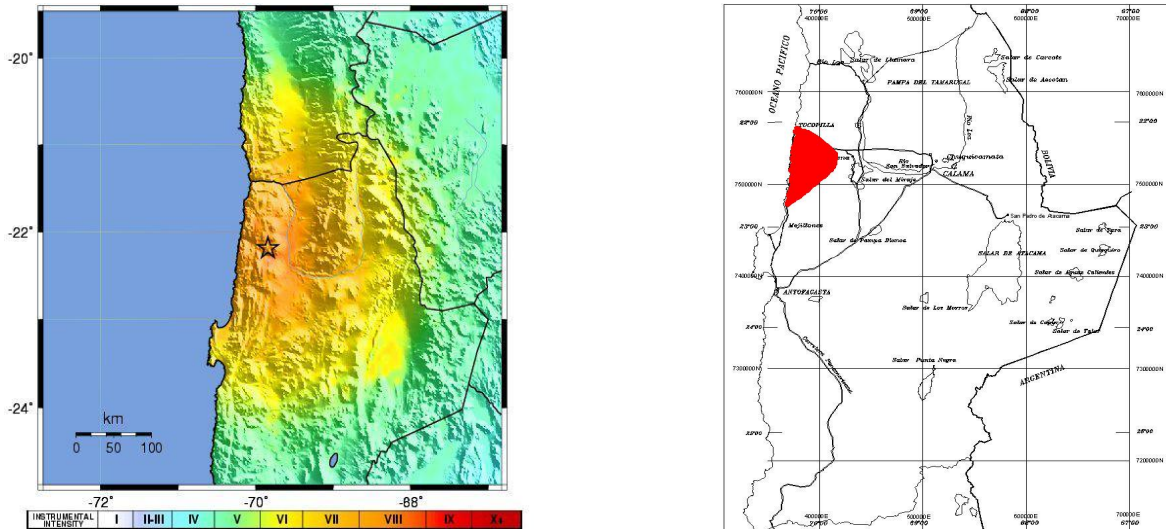


Figura 1.5: Mapa de intensidad sísmica registrada durante un sismo de intensidad moderada en la localidad de Tocopilla. Zona escogida para el emplazamiento de la central nuclear

Capítulo 2

ESTRUCTURACIÓN DEL REACTOR NUCLEAR DE POTENCIA

Las estructuras que forman parte del proceso de generación de energía nuclear son variadas. Para efectos de este estudio se consideraron sólo las relacionadas directamente con los equipos presentes en la generación eléctrica, ya sea protegiendo su integridad o soportando cargas importantes. Las estructuras escogidas se clasifican en 3 grupos:

- Edificio de contención^[1]
- Estructura interna^[2]
- Fundaciones

Como se define en las bases de cálculo para el proceso de estructuración^[3], es necesario definir los sistemas estructurales resistentes. Las estructuras consideradas pertenecen al tipo PWR, siendo diferentes las estructuraciones para otros tipos de reactores. Además de los sistemas resistentes, hay que seleccionar los materiales y sistemas de cargas para finalmente confeccionar planos estructurales.

^[1]CCB, Concrete Containment Building.

^[2]I/C, Inner Concrete.

^[3]Ver Capítulo Presentación.

2.1. Descripción General de los sistemas de Contención

El objetivo fundamental de las estructuras de contención^[4] en una planta de energía nuclear es prevenir la liberación de los productos de fisión al ambiente en caso de una situación de accidente y proveer un escudo ante la radiación de normal operación. Además de ser diseñados para resistir eventos internos, tales como presiones internas y temperaturas resultantes de los eventos de diseño, el contenedor es diseñado para proveer protección ante severos eventos externos^[5]. A pesar de que algunos de los primeros reactores térmicos fueron construidos sin edificios contenedores, la tendencia actual de generación de reactores está constituida de edificios contenedores de considerables dimensiones debido a la importancia que tienen.

Los edificios de contención para este tipo de reactores son de hormigón armado, en algunos casos pretensado, y albergan completamente el circuito primario que incluye la vasija de presión del reactor, los generadores de vapor y el sistema de tuberías. En la figura 2.1 se muestran bosquejos para los sistemas de contención utilizados para reactores nucleares tipo PWR.

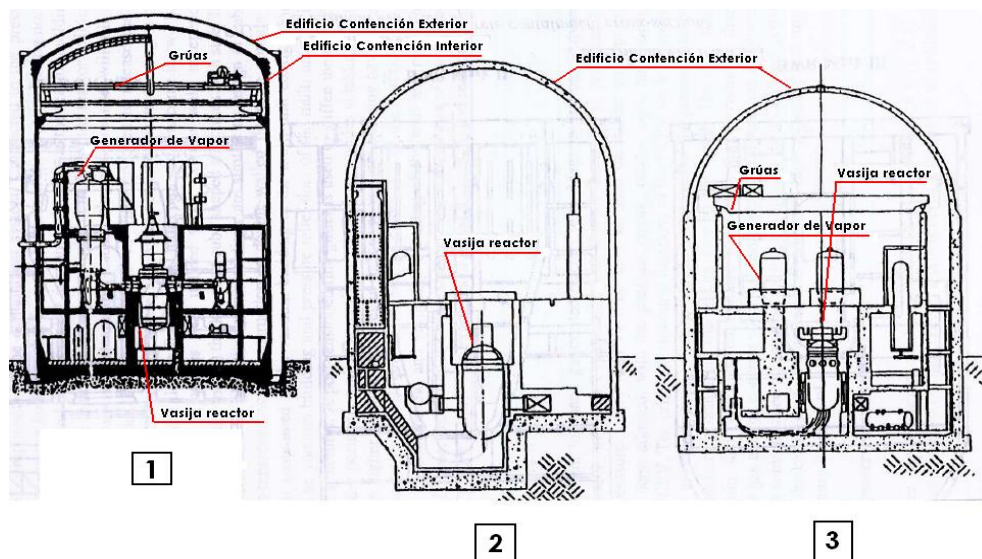


Figura 2.1: Diferentes edificios para reactores tipo PWR utilizados en el mundo

^[4]Edificio de Contención, I/C y Fundaciones.

^[5]Ver capítulo 3 antecedentes análisis sísmico.

Para el estudio se elige el reactor tipo 1, en el cual se puede utilizar un muro de contención o doble muro de contención y el contenedor puede ser provisto de una pared de metal^[6] para tener una barrera contra las fugas de radiación.

2.2. Hipótesis de Estructuración

Si bien los requerimientos de seguridad se fundan en principios internacionales, el diseño y estructuración está a cargo de profesionales en cada país. Dependiendo de la zona y diferentes demandas de capacidad, se tienen diferentes estructuraciones, siendo un reactor distinto a otro inclusive en una misma zona. Debido a esto, a modo de validar el diseño propuesto, se realizó una recopilación de sistemas estructurales pertenecientes a reactores actualmente construidos o en construcción. Con esto, el dimensionamiento de los elementos, espesores y materiales a utilizar se basa en datos reales de reactores de este tipo, lo cual da paso a una validación preliminar del diseño conceptual.

2.3. Geometría de las Estructuras y Equipos

Las estructuraciones de los edificios fueron realizadas en su mayor parte mediante la observación de variada información. En los trabajos recopilados, específicamente para el tipo de reactor escogido, se detallan las dimensiones generales de las zonas más importantes consideradas en el análisis; el resto de zonas se estimó mediante la observación de estructuras en fotos, videos y dibujos. Se debe mencionar que el proceso no fue rápido debido a lo difícil en la obtención de información y decisión respecto a la configuración final.

Si bien el edificio de contención tiene una configuración simple, para las estructuras internas no se encontraron detalles explícitos de configuración ya que los diseños son confeccionados a medida, según la localidad en que se emplaza. Utilizando el material recopilado se obtienen dimensiones para los espesores de losas y muros con los cuales finalmente se detalla la estructura.

2.3.1. Materiales

Para la estructuración y diseño preliminar se utilizaron diferentes tipos de hormigón, los cuales se detallan en la tabla 2.1.

^[6] Acero de alta resistencia.

Tabla 2.1: Propiedades del hormigón utilizado

	H30	H35	H40	
R_{28}	3000	3500	4000	[tonf/m ²]
f_c	2500	3000	3500	[tonf/m ²]
Módulo de Elasticidad	3290900	3554570	3800000	[tonf/m ²]
Peso por unidad de volumen	2,5	2,5	2,5	[tonf/m ³]
Masa por unidad de volumen	0,255	0,255	0,255	[tonf s ² /m/m ³]
Módulo de Poisson	0,2	0,2	0,2	

Las estructuras nucleares y en especial los edificios de contención son diseñados para 30 o 40 años. En nuestros tiempos, presiones económicas hacen que el servicio de las plantas se extienda hasta 60 años o el retraso de su desmantelamiento mantiene a veces estructuras en períodos de más de 100 años, resistiendo tiempos mayores que aquellos para los cuales fueron diseñadas. Debido a esta razón, uno de los puntos más discutidos actualmente es la durabilidad de los materiales utilizados en la construcción de centrales nucleares debido a los problemas de desgaste^[7] del material. Definidos los materiales, se describe el proceso de estructuración del reactor nuclear.

2.3.2. Edificio de Contención

El edificio de contención consiste en un manto externo y un manto interno, ambos de forma cilíndrica y de hormigón armado^[8], dejando un espaciamiento entre ellos. Se ha reemplazado la capa de acero interior por un segundo sistema de contención de hormigón armado.

Las funciones principales son:

- El edificio externo tiene por objetivo proteger ante eventos externos.
- El edificio interno tiene por objetivo proteger al medio exterior ante la liberación normal de radiación interna, además de prevenir y mantener las liberaciones de temperatura y presión desde el interior.

Entre los elementos estructurales para los edificios de contención se encuentran muros, los cuales dan forma a un ambiente cerrado para las estructuras internas.

^[7]Concrete ageing effect.

^[8]El edificio de contención interno es de tipo pretensado en muchos casos.

El diseño conceptual utilizado para los edificios contenedores es variado, siendo el de tipo cilíndrico el más utilizado, como se muestra en la figura 2.2.

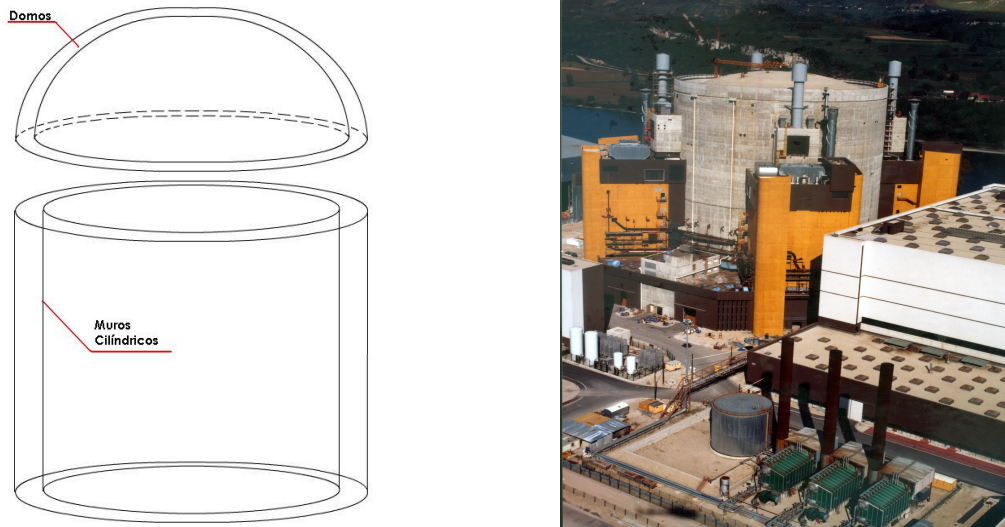


Figura 2.2: Diseño conceptual del edificio de contención de un reactor nuclear de potencia. Edificio de contención

Los edificios de contención se encuentran dilatados sobre una misma fundación. El espacio anular entre los edificios posee una zona de inundación, la cual protege los componentes que pudiesen ser afectados por estos eventos. La parte superior del edificio está conformada de una cúpula de forma esférica o elipsoidal, de hormigón armado. Además, el edificio de contención tiene en su parte superior interna apoyos (asientos) de hormigón para la grúa polar y zonas (ubicadas en las fundaciones) para el tensado, en caso de ser requerido, de los cables de acero del edificio interno.

En la tabla 2.2 se detallan las dimensiones para cada edificio:

Tabla 2.2: Dimensiones y materiales del edificio de contención

Edificio de Contención			
	Externo	Interno	
Espesor Manto	1,40	1,40	[m]
Espesor Domo	1,40	1,40	[m]
Altura Total	65,46	61,95	[m]
Diámetro	53,60	47,80	[m]
Material	H40	H40	

En la figura 2.3, se presenta la configuración definitiva^[9] para el edificio de contención.

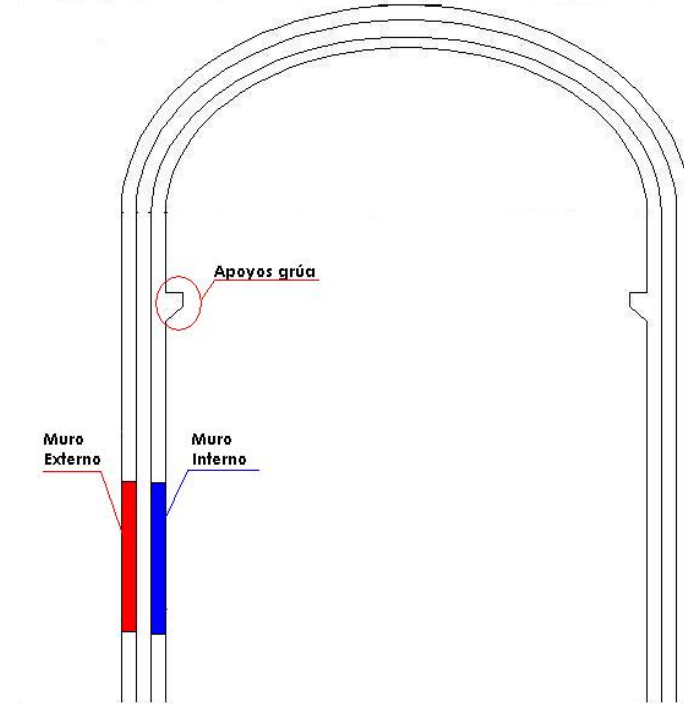


Figura 2.3: Configuración final del edificio de contención del reactor nuclear de potencia

2.3.3. Estructuras internas

El proceso de estructuración de los elementos resistentes en el interior de los edificios de contención es de mayor complejidad debido a que su estructuración depende de los requerimientos específicos de la central nuclear, razón por la cual no existe una forma base definida. Se comienza por ver las condicionantes que definen la estructura, como por ejemplo los equipos a los cuales se tendrá que dar soporte.

El reactor contiene dos circuitos de refrigeración^[10] compuesto de una vasija de reacción que contiene los elementos combustibles, un presurizador que incluye el sistema de mantención de la presión, una bomba de enfriamiento del reactor^[11], un generador de vapor por circuito, tuberías asociadas y sistemas de presión. La distribución de estos sistemas y equipos determina la distribución de los elementos resistentes. Los requerimientos de seguridad imponen una distribución importante

^[9]Mayores detalles en los planos de estructuras.

^[10]Reactor Coolant System RCS.

^[11]Reactor Coolant Pump RCP.

de muros y losas, debido a que están estructurados sobre múltiples anillos o niveles de seguridad, de igual forma las barreras de seguridad física de las estructuras se distribuyen como anillos de contención para todas las estructuras internas.

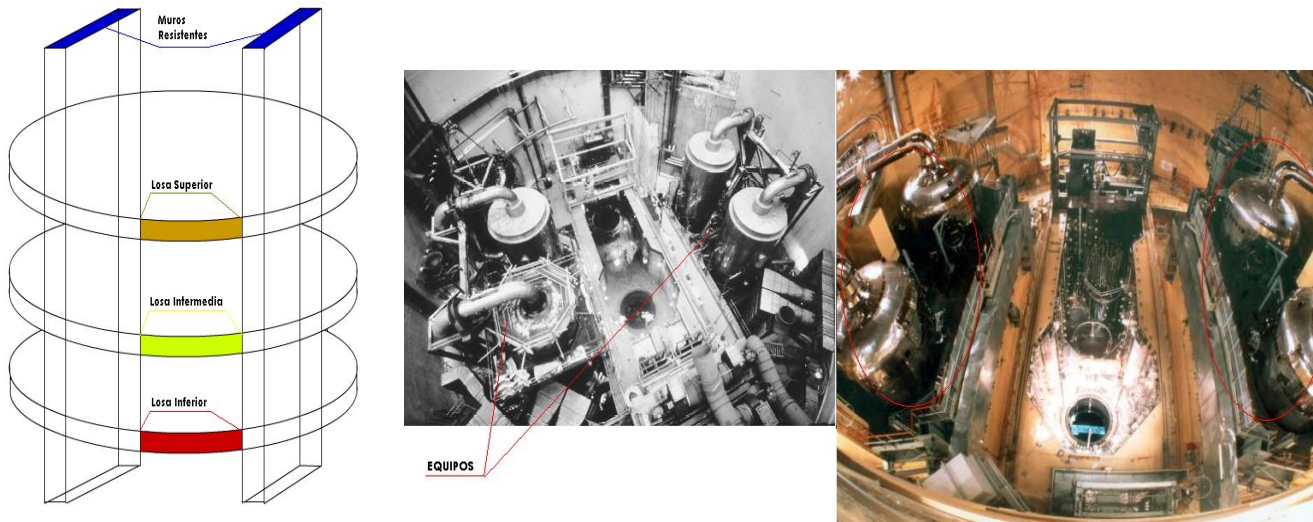


Figura 2.4: Diseño conceptual de la estructura interna de un reactor nuclear de potencia. Vista interior de la ubicación de equipos

Los elementos estructurales presentes son básicamente losas, las cuales soportan cargas de ocupación estáticas y muros que transmiten los esfuerzos de las losas, brindan rigidez y estabilidad al edificio de contención frente a sollicitaciones estáticas, sísmicas u otras que se consideren para el diseño, y además transmiten las cargas a las fundaciones. La distribución de los muros se realiza en ejes principales y transversales a las plantas de la estructura, además se provee de muros diagonales los cuales rodean a los equipos presentes. Al igual que para el edificio de contención, la observación de variados recursos permitió establecer la geometría de losas, ejes resistentes y muros.

En la tabla 2.3 se detallan las dimensiones para las estructuras internas:

Tabla 2.3: Dimensiones y materiales para las estructuras internas

Estructuras Internas		
Espesores Losas	0,3-0,5	[m]
Espesores Muros	0,3-1,5	[m]
Altura	28,65	[m]
Material	H35	

2.3.4. Fundaciones

Para evitar filtraciones de material radioactivo y aislar por completo el suelo de fundación, se utiliza una losa de fundación para todos los edificios que componen las plantas nucleares, no sólo para los edificios de contención y estructuras internas sino que también para el resto de los edificios auxiliares.

Se utiliza una losa de fundación para los edificios, la cual trabaja como elemento de transferencia de fuerzas desde la estructura al suelo de apoyo, además de resistir el volcamiento ante eventos sísmicos o cargas de impacto.

En la tabla 2.4, se detallan las dimensiones para la losa de fundación:

Tabla 2.4: Dimensiones y materiales para losa de fundación

Fundaciones		
Forma	Losa Octogonal	
Espesor	3,5	[m]
Área	1788,4	[m ²]
Volumen	6259,4	[m ³]
Material	H30	

Debido al carácter preliminar del estudio se optó por considerar sólo equipos pesados y de importancia para el proceso energético, los cuales se describen a continuación.

2.3.5. Vasija del Reactor

La vasija de presión del reactor se encuentra en el centro del edificio y contiene el núcleo junto con los elementos combustibles. El líquido refrigerante del reactor fluye a través de la línea o tuberías calientes hacia los generadores de vapor y retorna a la vasija de presión vía las líneas o tubería fría. El presurizador está conectado a una vía caliente y una vía fría.

La vasija de presión tiene forma cilíndrica, soldada en su parte inferior de forma hemisférica y con una cabeza removible. Conformada en dos partes, sus dimensiones son establecidas básicamente para contener los elementos combustibles y sus maquinarias. Además, posee sistemas de remoción de calor para evitar dilataciones excesivas.

Tabla 2.5: Características de la vasija del reactor

Vasija del Reactor		
Forma	Cilíndrica	
Altura	7.34	[m]
Diámetro promedio	2.90	[m]
Volumen	48.48	[m ³]
Peso	350	[tonf]

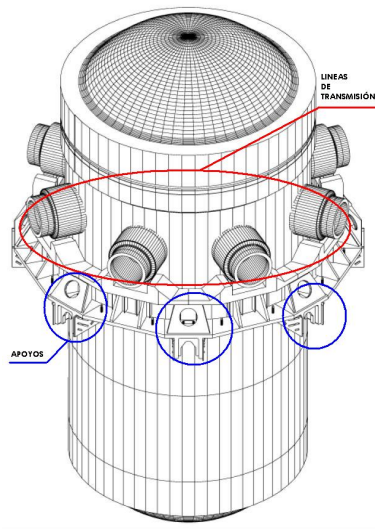


Figura 2.5: Modelo de la vasija del reactor en la que se aprecia su sistema de tuberías y de apoyo.
Transporte de la vasija del reactor

2.3.6. Generadores de vapor

Los equipos de generador de vapor son de forma cilíndrica. El diseño se realiza para optimizar el intercambio de calor en los procesos. Se provee de apoyos verticales y laterales los cuales controlan los desplazamientos ocasionados por las diferentes sollicitaciones.

Tabla 2.6: Características del generador de vapor

Generador de Vapor		
Forma	Cilíndrica	
Altura	18.6	[m]
Diámetro promedio	3.8	[m]
Volumen promedio	210.9	[m ³]
Peso	450	[tonf]

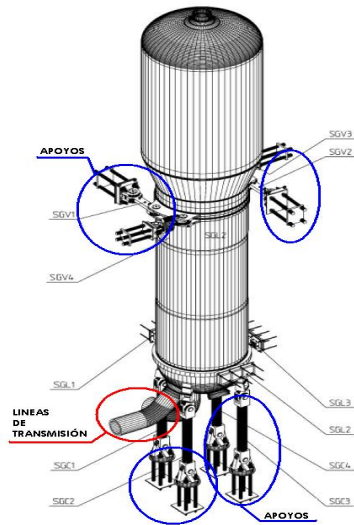


Figura 2.6: Modelo del generador de vapor en la que se aprecia su sistema de apoyo. Instalación de un generador de vapor en la planta nuclear

2.4. Confección de Planos

Mediante el material recopilado, bosquejos de centrales nucleares y fotos, se pudo tener un esquema general de las características de una central nuclear de potencia. El siguiente proceso de modelación, requiere información clara acerca de la estructura, razón por la cual, fue necesario confeccionar planos estructurales de las geometrías descritas anteriormente y alcanzar un mayor grado de detalle. Mediante la ayuda del formato CAD^[12], se pudo dar forma real al diseño conceptual desarrollado en el presente capítulo, mostrando al final de éste, los planos de plantas y elevaciones de la estructura del reactor nuclear de potencia elaborados por el autor.

^[12]Computer Aid Design.

2.5. Proceso Constructivo

En las siguientes figuras se incluye una breve descripción de las etapas constructivas del reactor EPR^[13] de Generación III que se construye en Europa. Estas imágenes se utilizaron para la estructuración realizada del reactor nuclear y la elaboración de planos.



Figura 2.7: Excavación en el sitio seleccionado. Colocación de grúas e instalaciones de faena



Figura 2.8: Colocación de armaduras en la losa de fundación

^[13]European Power Reactor.



Figura 2.9: Colocación de moldajes para hormigonado de las estructuras. Vista de los trabajos nocturnos



Figura 2.10: Losa de fundación del Edificio de Contención. Colocación de moldajes para los muros internos del reactor y zona de la vasija de reacción



Figura 2.11: Colocación de moldajes para los muros internos del reactor, zona de la vasija y zona de almacenamiento en caso de derretimiento del núcleo

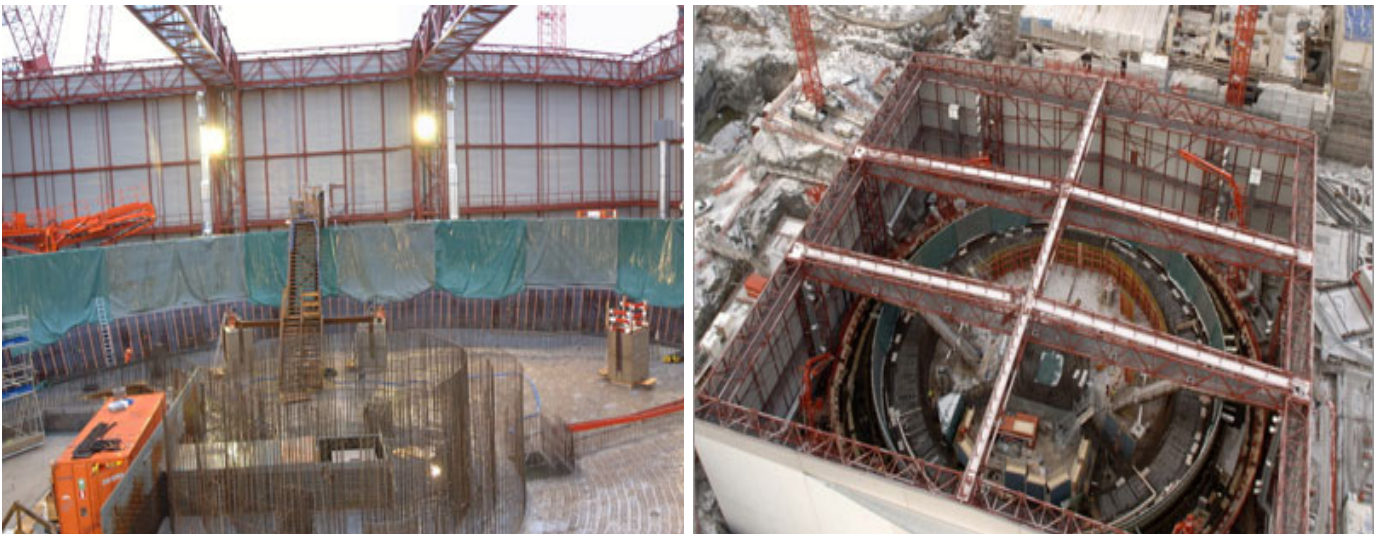


Figura 2.12: Enfierradura de zona de la vasija del reactor. Vista del edificio de protección para épocas de invierno



Figura 2.13: Vista general de las faenas. Enfierradura de muros diagonales para zona de la vasija del reactor y como apoyo de las losas



Figura 2.14: Enfierradura y moldajes de muros diagonales para zona de la vasija del reactor. Enfierradura de Losas



Figura 2.15: Colocación de módulos de acero para el edificio de contención. Instalación de grúas para la construcción de la zona de la vasija del reactor



Figura 2.16: Avance de las estructuras internas y de los edificios de contención

2.6. Discusión y Conclusiones

La estructuración resultante incorpora conceptos de seguridad nuclear definidos en los códigos del organismo internacional de energía atómica(OIEA). Para el caso del edificio de contención, el doble muro de contención debe resistir los eventos externos (muro exterior) y los eventos internos (muro interno) en caso de accidente u operación normal de la central. Las cargas generadas en condiciones de accidente, en especial para este tipo de estructuras, hacen necesaria la utilización de técnicas de pretensado para los edificios de contención, según sean los requerimientos de diseño.

En el caso de las estructuras internas, la protección de los equipos se adquiere mediante la utilización de muros de hormigón armado colocados de manera concéntrica para la vasija del reactor y generadores de vapor, con el fin de asegurar su integridad ante posibles escapes radioactivos. El resto de los muros resistentes se distribuyen en las direcciones principales de análisis y su principal característica es su aumento de espesor con la profundidad de la estructura. Estos muros, además, sirven de soporte a las losas. Las losas resisten las cargas de peso propio y sobrecarga estática, zonas de equipos menores y zonas de trabajo del personal de la central, las cuales descargan sobre los muros concéntricos y muros principales antes mencionados. Los espesores de losa también aumentan con la profundidad. La idea principal de la distribución de los elementos estructurales resistentes es concentrar la masa de la estructura lo más bajo y centrada posible. Si bien se logró un cierto nivel de detalle, se optó por no considerar estructuras adicionales de las cuales no se tuvo información.

Como se menciona en las hipótesis, se logran identificar algunos de los elementos resistentes para el edificio de contención y las estructura internas del reactor. Finalmente, hay que mencionar que, la configuración de este edificio de contención ha sido utilizada en el reactor experimental de Lo Aguirre, RECH-2, perteneciente a la Comisión Chilena de Energía Nuclear^[14]. A continuación se mencionan algunos conceptos de importancia para la estructuración y seguridad de una central nuclear de potencia.

2.6.1. Filosofía para la estructuración y seguridad

Los diseños deben contar con algunas de las siguientes consideraciones de seguridad actualmente presentes en los reactores de última generación. Estos objetivos están dados con la intención de mejorar el concepto de defensa en profundidad^[15], principio sobre los cuales se basa la seguridad en las plantas nucleares:

- Incremento de la redundancia y separación.
- Mitigación de los efectos severos
- Protección de los equipos críticos de eventos externos.
- Extensión de los tiempos de respuesta para las acciones de los operadores.

^[14]Si bien es un edificio de contención nuclear, sus dimensiones no son comparables por tratarse de un reactor de investigación y no de potencia como el presentado en este trabajo.

^[15]Ver Anexo.

- Reducción de las consecuencias radiológicas y frecuencias de sucesos iniciadores postulados.
- Simplificación de los sistemas de seguridad y separación funcional.
- Incremento de la robustez de los elementos contenedores en consideración a las cargas asumidas para el hipotético del derretimiento del núcleo^[16].
- Menor sensibilidad a los errores humanos por parte de los equipos de manejo en la planta, mejores sistemas de automatización.

^[16]Cargas no consideradas en los análisis.

PLANOS DE ESTRUCTURAS DEL REACTOR NUCLEAR DE POTENCIA

plano 1



Figura 2.17: Formato AUTOCAD Planta N°1



Figura 2.18: Formato AUTOCAD Planta N°2

plano 2



Figura 2.19: Formato AUTOCAD Planta N°3

plano 3



Figura 2.20: Formato AUTOCAD Planta N°4

plano 5



Figura 2.21: Formato AUTOCAD Planta N°5

plano 6



Figura 2.22: Formato AUTOCAD Planta N°6

plano 7



Figura 2.23: Formato AUTOCAD Corte N°1

)

Capítulo 3

ANTECEDENTES ANÁLISIS SÍSMICO

Al igual que la mayoría de las estructuras, los reactores nucleares siguen las especificaciones de códigos sísmicos para los procesos de diseño y construcción, en la mayoría de los casos, más estrictos que los códigos utilizados para estructuras convencionales. Los códigos sísmicos utilizados deben contemplar como mínimo:

- La selección de sitio de la edificación, restricciones en el uso del sitio, uso del suelo y el análisis para determinar si el sitio es adecuado.
- La definición de los sismos de diseño, criterios para el diseño sismorresistente y la metodología de diseño.
- Las restricciones o guías para la selección apropiada de la configuración del edificio, fundaciones, disposición de las estructuras, sistemas estructurales, materiales estructurales y componentes estructurales.
- La estimación de las demandas en la estructura y en su contenido ante los diferentes niveles de los sismos de diseño.
- La estimación de las capacidades suministradas a la estructura.
- El análisis de desempeño de la estructura diseñada bajo los diferentes niveles establecidos para los sismos de diseño. Esto se debe hacer visualizando las características que tendrá la estructura real ya construida.
- Recomendaciones acerca de la construcción, uso, mantenimiento y modificaciones de la estructura.

3.1. Hipótesis para Análisis Sísmico

La definición del proceso de análisis es extremadamente compleja, ya que se requieren de variados informes de distintas especialidades al momento de diseñar una central nuclear. Cada país tiene una legislación y requisitos diferentes en sus códigos, aunque la filosofía de diseño es similar. Debido a la complejidad para obtener otros estados de carga, se incluyeron sólo las sísmicas, por lo tanto las combinaciones de carga quedan parcialmente determinadas ya que el resto de las cargas no se incluyeron en el análisis.

3.2. Solicitaciones

3.2.1. Combinaciones de Carga

Las combinaciones de carga utilizadas son variadas y dependen del código de diseño utilizado. Se analizaron dos normas relacionadas con estructuras nucleares:

- ACI 349 Section III, Division 1, “Nuclear components of Nuclear Power Reactor”.
- ASME-ACI 359 Section III, Division 2, “Concrete Containment Vessel for Nuclear Power Reactor”.

Las estructuras analizadas utilizan el código ASME-ACI 359 por estar relacionadas con las estructuras de contención y no con los componentes menores de hormigón, de todas formas se dan a conocer los estados de carga para las dos normas, a modo de ver que diferencias existen y así tener una idea de la complejidad del análisis para las estructuras del reactor.

Las cargas utilizadas se definen según la siguiente clasificación, válida para las dos normativas consideradas.

- Cargas de servicio: cargas que se tienen durante la construcción y la operación normal de la central nuclear, se incluyen las cargas ocasionadas por condiciones de prueba normales^[1] o de accidente de los sistemas de seguridad y generación de energía. Se incluyen los eventos naturales catalogados como severos que puede encontrar la central durante su vida útil.

^[1]Las plantas nucleares realizan ensayos de parada segura y funcionamiento normal.

- Cargas de servicio (construcción): cargas generadas por el proceso constructivo. Las definiciones de D , L , F y T_o son aplicables, pero se deben basar en condiciones de construcción.
- Cargas de servicio (prueba): cargas generadas durante pruebas de integridad estructural o de fuga. Las definiciones de D , L y F son aplicables, pero se deben basar en condiciones de prueba.
- Cargas factorizadas o eventuales: cargas de ocurrencia improbable, como condiciones severas, extremas y anormales de cargas ambientales.
 - Cargas ambientales anormales: cargas generadas por el accidente de diseño u otro evento postulado como rompimiento de una línea de alta energía en caso de accidente. Se consideran P_a , T_a , R_a , Y_r , Y_j y Y_m para la norma 349. Para la norma 359, además de las anteriores, R_a se subdivide en R_{rr} , R_{rj} y R_{rm} .
 - Cargas ambientales severas: cargas de ocurrencia poco frecuente durante la vida útil de la planta. Se consideran E_0 y W , similares para ambas normas.
 - Cargas ambientales extremas: cargas de ocurrencia creíble pero altamente improbable durante la vida útil de la planta. Se consideran E_{ss} y W_t para la norma 349. Para la norma 359, W_t se subdivide en W_{tq} , W_{tp} y W_{tm} .

A continuación se describen las utilizadas por el código ACI 349, Division 1, “Nuclear Power Plants Components”. La resistencia requerida U debe ser por lo menos igual a la mayor de las siguientes 11 combinaciones de carga:

1. $U = 1,4 \cdot D + 1,4 \cdot F + 1,7 \cdot L + 1,7 \cdot H + 1,7 \cdot R_0$
2. $U = 1,4 \cdot D + 1,4 \cdot F + 1,7 \cdot L + 1,7 \cdot H + 1,7 \cdot E_0 + 1,7 \cdot R_0$
3. $U = 1,4 \cdot D + 1,4 \cdot F + 1,7 \cdot L + 1,7 \cdot H + 1,7 \cdot W + 1,7 \cdot R_0$
4. $U = D + F + L + H + T_0 + R_0 + E_{ss}$
5. $U = D + F + L + H + T_0 + R_0 + W_t$
6. $U = D + F + L + H + T_a + R_a + 1,25 \cdot P_a$
7. $U = D + F + L + H + T_a + R_a + 1,15 \cdot P_a + 1,0(Y_r + Y_j + Y_m) + 1,15E_0$
8. $U = D + F + L + H + T_a + R_a + 1,0 \cdot P_a + 1,0(Y_r + Y_j + Y_m) + 1,0E_{ss}$
9. $U = 1,05 \cdot D + 1,05 \cdot F + 1,3 \cdot L + 1,3 \cdot H + 1,05 \cdot T_0 + 1,3 \cdot R_0$
10. $U = 1,05 \cdot D + 1,05 \cdot F + 1,3 \cdot L + 1,3 \cdot H + 1,3 \cdot E_0 + 1,05 \cdot T_0 + 1,3 \cdot R_0$
11. $U = 1,05 \cdot D + 1,05 \cdot F + 1,3 \cdot L + 1,3 \cdot H + 1,3 \cdot W + 1,05 \cdot T_0 + 1,3 \cdot R_0$

A continuación se describen las utilizadas por el código ACI-ASME 359, Section III, Division 2, “Concrete Containment Vessel for Nuclear Power Reactor”. La resistencia requerida U debe ser por lo menos igual a la mayor de las 15 siguientes combinaciones de carga:

1. $U = D + F + L + P_t + T_t$
2. $U = D + F + L + T_0 + W$
3. $U = D + F + L + G + T_0 + R_0 + P_v$
4. $U = D + F + 1,3 \cdot L + G + T_0 + 1,5 \cdot E_0 + R_0 + P_v$
5. $U = D + F + 1,3 \cdot L + G + T_0 + 1,5 \cdot W_0 + R_0 + P_v$
6. $U = D + F + L + G + T_0 + E_{ss} + R_0 + P_v$
7. $U = D + F + L + G + T_0 + W_t + R_0 + P_v$
8. $U = D + F + L + G + 1,5 \cdot P_a + T_a + R_a$
9. $U = D + F + L + G + P_a + T_a + 1,25 \cdot R_a$
10. $U = D + F + L + 1,25 \cdot G + 1,25 \cdot P_a + T_a + R_a$
11. $U = D + F + L + G + 1,25 \cdot P_a + T_a + 1,25 \cdot E_0 + R_a$
12. $U = D + F + L + G + 1,25 \cdot P_a + T_a + 1,25 \cdot E_0 + R_a$
13. $U = D + F + L + G + T_0 + E_0 + H_a$
14. $U = D + F + L + G + T_0 + W + H_a$
15. $U = D + F + L + G + P_a + T_a + E_{ss} + R_a + R_r$

La notación de las cargas, en las que se indican las definiciones según normas respectivas, son las siguientes:

D : cargas muertas, incluyendo peso de tuberías y equipos(349).

Se incluyen cargas hidrostáticas y pesos de equipos permanentes(359).

E_o : cargas ocasionadas por el sismo base de operación^[2].

E_{ss} : cargas ocasionadas por el sismo de parada segura^[3].

F : cargas ocasionadas por la presión lateral y vertical de líquidos(349).

Cargas resultantes de la aplicación de pretensado(359).

^[2](OBE) Operational Basis Earthquake.

^[3](SSE) Safety Shutdown Earthquake.

H : cargas ocasionadas por la presión lateral de tierra.

H_a : cargas sobre el edificio contenedor resultantes de inundación interna.

L : cargas vivas, incluyendo cargas por equipos móviles u otra carga que puede variar su intensidad, como presiones de suelo.

P_a : cargas ocasionadas por diferencias de presión, postuladas para rompimiento de tuberías(349).
Carga de presión de diseño(359).

P_t : cargas de presión durante pruebas de integridad estructural y pruebas de fuga.

T_t : cargas térmicas durante pruebas de integridad estructural y pruebas de fuga.

T_o : cargas de temperatura sobre estructuras de hormigón como resultado de condición normal de operación o parada(349).
Efectos térmicos y cargas durante estados normales de operación o condiciones de parada, basadas en el estado más crítico transiente o permanente(359) .

T_a : cargas de temperatura sobre estructuras de hormigón como resultado de condición de accidente, generadas por rompimiento de tuberías, se incluyen cargas T_o .

R_o : cargas de equipos o tuberías ocasionadas bajo estados normales de operación y parada, excluyendo cargas muertas y cargas de sismos(349).
Reacciones de tuberías durante estados normales de operación o condiciones de parada, basadas en el estado más crítico transiente o permanente(359).

R_a : cargas de equipos o tuberías ocasionadas bajo condiciones de temperatura originadas por rompimiento de tuberías, se incluyen cargas R_o .

W : cargas ocasionadas por el viento de diseño para el sitio.

W_t : cargas ocasionadas por el tornado base de diseño, incluye cargas de presión o de impacto.

W_{tq} : cargas de presión ocasionadas por el tornado(359).

W_{tp} : cargas de presión ocasionadas por el rápido cambio de presión atmosférica(359).

W_{tm} : carga de impacto producida por el tornado(359).

Y_j : cargas ocasionadas por impacto de avión(349).

Y_m : cargas ocasionadas por impacto de misil(349).

Y_r : cargas ocasionadas por la reacción de tuberías rotas durante un rompimiento postulado(349).

R_r : efectos locales para un accidente base de diseño(359).

R_{rr} : cargas sobre el contenedor generadas por la reacción al rompimiento de una tubería de alta presión(359).

R_{rj} : cargas sobre el contenedor generadas por el impacto de avión(359).

R_{rm} : cargas sobre el contenedor generadas por el impacto al rompimiento de una tubería de alta presión(359).

G : cargas resultantes por la apertura de válvulas de escape u otros dispositivos de energía.

P_v : cargas de presiones externas resultantes de la variación de la presión dentro o fuera del edificio de contención.

Los estados de carga antes mencionados son los mínimos a los cuales se debe someter la estructura nuclear. Para el caso del presente análisis, debido a su carácter sísmico, sólo se consideraron estos estados de carga, sismo base de operación (E_o) y sismo de parada segura (E_{ss}), además se consideran D y L . Los estados de carga antes mencionados para el análisis se indican a continuación.

3.2.2. Espectro de diseño

Se utiliza la Norma Chilena Oficial NCh2369.Of2003 “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”, la cual define el espectro de diseño^[4] mediante la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{2,75A_oI}{R} \left(\frac{T'}{T} \right) \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^n$$

Donde:

A_o : aceleración efectiva máxima del suelo, según zonificación sísmica establecida.

T', n : parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.

T : período vibración del modo considerado.

R : factor de modificación de la respuesta, determinado según el sistema resistente considerado.

ξ : razón de amortiguamiento, determinado según el sistema resistente considerado.

Se debe mencionar que en un caso real se debe realizar un estudio del sitio para determinar un espectro representativo. A continuación, se establecen los parámetros para cada análisis mediante las siguientes consideraciones:

- Estructura tipo C1, clasificada como obra crítica^[5].
- Ubicado en la costa de la Región de Antofagasta, zona sísmica 3.
- Estructura diseñada para permanecer elástica, no se considera una reducción de espectro para las estructuras internas.

^[4]Capítulo 5.4, sección 5.4.2, Análisis elástico dinámico.

^[5]Ver definición en Capítulo 4.3 de la norma.

- El suelo bajo el nivel de fundación es roca^[6], tipo de suelo I.
- Estructura de hormigón armado^[7].

No obstante, el valor de S_a no necesita ser mayor que $I \cdot C_{max} \cdot g$, en que C_{max} se determina según la razón de amortiguamiento(ξ) y el factor de modificación de la respuesta(R), en este caso $C_{max} = 0,55 \cdot g$. Con las consideraciones mencionadas, se obtienen los siguientes parámetros para el análisis:

Tabla 3.1: Parámetros para el análisis elástico dinámico

Zona Sísmica	Ao [g]	I	R	T' [Seg]	n	ξ	Cmáx [g]
3	0,4	1,2	1,0	0,2	1,0	0,05	0,55

Con los datos anteriores se obtiene el espectro de diseño para el sismo base de operación(OBE) para la localidad costera de Tocopilla, el cual se muestra en la figura 3.1.

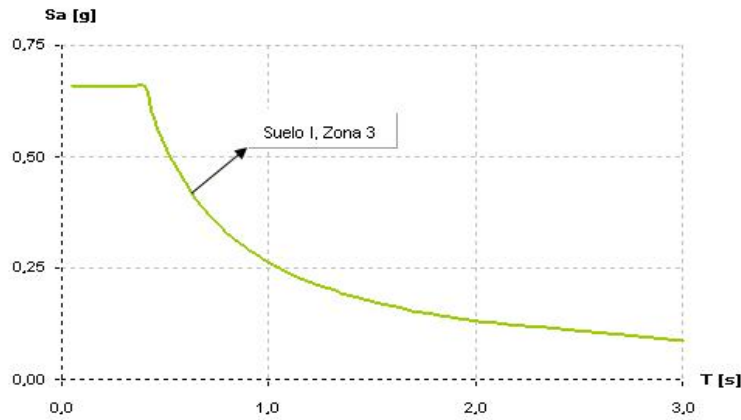


Figura 3.1: Espectro de diseño según NCh2369.Of2003 para la zona escogida definido como OBE(E_o)

^[6]Ver definición en Tabla 5.3 de la norma.

^[7]Se asume una razón de amortiguamiento de 0,05 a pesar de que la estructura no califica por esta norma.

3.2.3. Registros Sintéticos

Para los análisis en el tiempo se deben usar a lo menos 3 registros reales, representativos de las zonas sismogénicas consideradas, o se puede utilizar un registro sintético. Los sismos más representativos en la zona de emplazamiento son los sismos de tipo subductivo, razón por lo cual se utilizaron registros sintéticos de este tipo para el análisis.

El gráfico del registro en el tiempo, el cual será definido como sismo de parada segura (SSE) para la central nuclear de potencia, se puede apreciar en la figura 3.2.

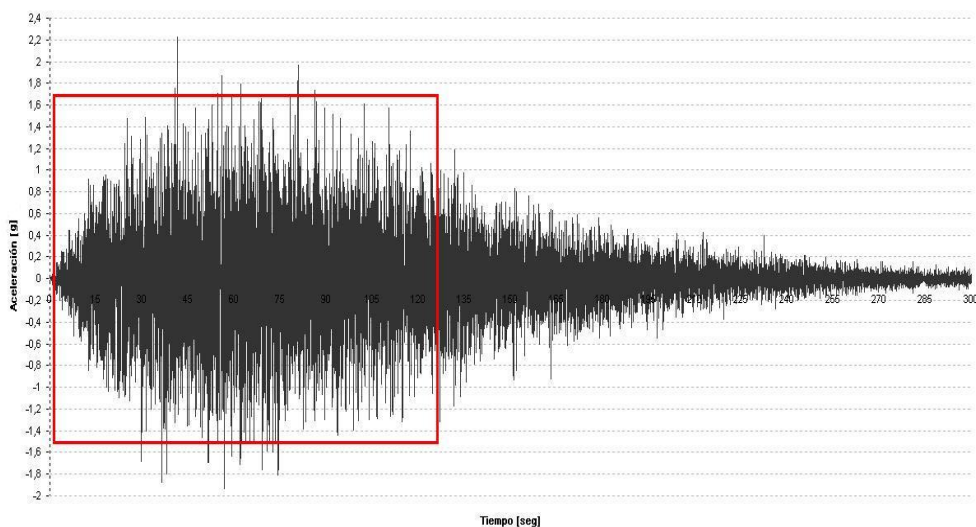


Figura 3.2: Registro de Colapso Subductivo definido como $SSE(E_{ss})$

Como se puede observar en la figura, este sismo subductivo es de larga duración y presenta sus aceleraciones extremas con valores del orden de 2[g] entre los 30 y 45 [seg], y un tiempo de movimiento fuerte de 70 segundos. Para reducir el tiempo de análisis utilizó sólo el segmento hasta 120 [seg], como se muestra en la figura.

3.2.4. Peso propio(D)

Para este estado de carga, se consideran las estructuras en que los materiales tienen peso específico, en nuestro caso todas las estructuras están compuestas por hormigón, el cual tiene un peso específico de $\gamma = 2,5$ [tonf/m³]. Para el caso de los equipos, los pesos se consideran como cargas estáticas puntuales en los puntos de apoyo^[8] sobre la estructura.

^[8]Definidos en el siguiente capítulo.

3.2.5. Sobrecarga(L)

A modo de establecer las sobrecargas estáticas y sísmicas sobre la estructura se tomaron los valores propuestos para industrias por la Norma Chilena Oficial NCh 1537.Of86 “Cargas Permanentes y sobrecargas de Uso”. Esta norma especifica sobrecargas de uso uniformemente distribuidas para pisos según el tipo de edificio considerado. Los valores se especifican en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: Sobrecargas de uso utilizadas para el sistema de losas

Tipo de Estructura	Descripción de Uso	Sobrecarga de uso [kPa]
Industrias	Areas con maquinaria liviana	4,0
	Areas con maquinaria pesada	6,0

3.3. Comentarios y Conclusiones

3.3.1. Demanda Sísmica

Para la demanda sísmica se definieron dos tipos de sismos, el sismo base de operación y el sismo de parada segura. Los sismos se clasifican según la respuesta esperada de la estructura, la cual se debe mantener operativa para la generación eléctrica(OBE) o mantener operativos los equipos y sistemas de seguridad(SSE). Los sismos de diseño deben representar las características de la zona de emplazamiento del reactor, para lo cual se deben realizar estudios de sitio. Al ocupar las normas chilenas de diseño se tiene un tipo de demanda definida por los espectros de diseño para el OBE equivalente a 0,64[g] lo cual es mucho mayor que las exigidas por reactores europeos, siendo la más alta de hasta 0,4[g] en algunos de los últimos reactores en construcción. Para el caso del SSE, se optó por utilizar un registro sintético de tipo subductivo que representa al lugar de emplazamiento y que tenga una demanda superior que el sismo base de operación. El espectro obtenido del registro^[9] indica que tiene una aceleración peak de 6[g] aproximadamente.

En resumen, las altas demandas nos advierten sobre la utilización de estructuraciones extranjeras para los reactores nucleares que se quieran construir en Chile, siendo necesario revisar los procesos de estructuración, con el propósito de analizar que la estructura resistente se asemeje a la filosofía de diseño utilizada en el país y no tomar modelos extranjeros sin previo estudio. La preocupación se debe al tipo de contrato llave en mano, utilizado para adquirir este tipo de generación eléctrica, en algunos países extranjeros. A continuación se discuten algunos aspectos de las normativas utilizadas y procedimientos de análisis.

3.3.2. Normativa y Procedimiento de Análisis

En el presente trabajo se realizó una revisión de ciertos aspectos de diferentes normativas, nacionales e internacionales, relacionadas con la energía nuclear y se analizaron estructuras correspondientes a

^[9]Ver capítulo de análisis sísmico e interacción suelo estructura.

edificios de contención y estructuras internas de los reactores. Las exigencias para el diseño sísmico de reactores nucleares son muy superiores a las utilizadas para otros tipos de estructuras, pues se requiere de numerosos análisis para distintos estados de carga. Los procedimientos de análisis, que se utilizan en la actualidad, son complejos y están mayoritariamente basados en análisis probabilísticos, siendo los análisis determinísticos como éste dejados para etapas avanzadas del diseño de este tipo de estructuras. Debido a la importancia de las etapas de selección de sitio y determinación de los parámetros de diseño, es que los análisis no determinísticos pueden ser más efectivos si se trata de aumentar el grado de confianza en los futuros cálculos.

El organismo internacional de energía atómica provee de manera gratuita las bases para cualquier tipo de regulación y etapa de análisis. En consecuencia, para iniciar las regulaciones se deben tener en consideración estas guías de seguridad. Sin importar la normativa general utilizada, cada país posee su regulación interna. Para el caso de Chile, al igual que los demás países, se propone tener una legislación propia en el tema.

Capítulo 4

MODELACIÓN ESTRUCTURAL

La tecnología actual nos permite realizar modelos tridimensionales con un número importante de elementos y detalles. Para la modelación de las estructuras se utilizaron diversos elementos a modo de representar de la mejor manera posible su comportamiento ante las solicitaciones antes estimadas.

4.1. Hipótesis de Modelación

Para la modelación se utilizó el programa SAP2000 v11.0.8. Los planos confeccionados entregan información suficiente para la realización de la modelación. Se realizaron algunas simplificaciones para facilitar la modelación de las estructuras elaboradas. Los muros y losas se modelaron con elementos de placa y las fundaciones, debido a sus dimensiones, mediante elementos sólidos.

4.2. Modelación de las Estructuras

Los modelos se dividen en modelos del edificio de contención, modelo de las estructuras internas y modelos de la estructura completa, entre ellos, algunos consideran diferentes condiciones de apoyo, tales como condición de empotramiento o consideración del suelo bajo la fundación, lo cual determina el número de restricciones en los modelos.

Todos los modelos realizados consideran la representación tridimensional debido a que entregan resultados mejores comparados con otro tipo de modelos en los cuales se aprovecha la simetría de las estructuras^[1]. Además las capacidades computacionales hacen posible este tipo de estudios de manera más sencilla a pesar de su gran cantidad de variables y, por lo tanto, necesidad de memoria. A continuación se presentan los modelos con diferentes opciones gráficas para cada estructura modelada.

^[1]Como por ejemplo, modelos de simetría axial.

4.2.1. Edificio de Contención

El edificio de contención se modela siguiendo la geometría descrita en los planos. El modelo consta de 2280 elementos tipo plano y 2882 nodos. Cada uno de los elementos tipo plano considera tres grados de libertad de desplazamiento por nodo, alcanzando un total de 8646 grados de libertad para el modelo.

Tabla 4.1: Datos del modelo del edificio de contención

Modelo	Nº Nodos	Nº Elementos	Nº Grados de Libertad
Empotrado/Interacción	2882	2880	8646

En la figura 4.1 se describe el proceso de modelación de la estructura del edificio de contención.



Figura 4.1: Proceso constructivo del modelo del edificio de contención

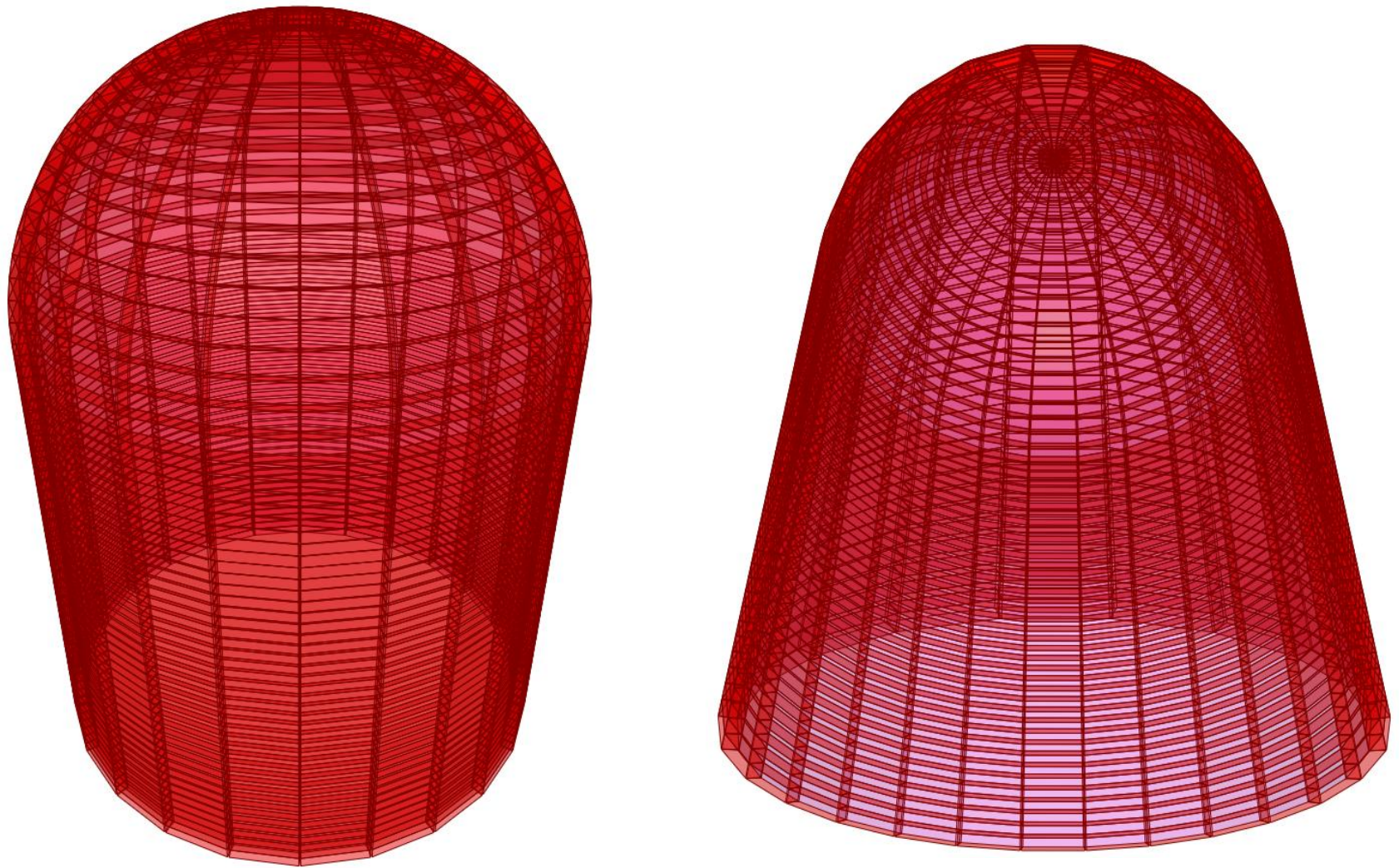


Figura 4.2: Vista superior e inferior del modelo del edificio de contención

4.2.2. Estructura Interna

Las estructuras internas se modelan siguiendo la geometría descrita en los planos. El modelo consta de 627 elementos tipo plano y 682 nodos. Cada uno de los elementos tipo plano considera tres grados de libertad de desplazamiento por nodo, alcanzando un total de 2046 grados de libertad para el modelo.

Tabla 4.2: Datos del modelo de la estructura interna

Modelo	Nº Nodos	Nº Elementos	Nº Grados de Libertad
Empotrado/Interacción	682	627	2046

En la figura 4.3 se describe el proceso de modelación de la estructura interna.

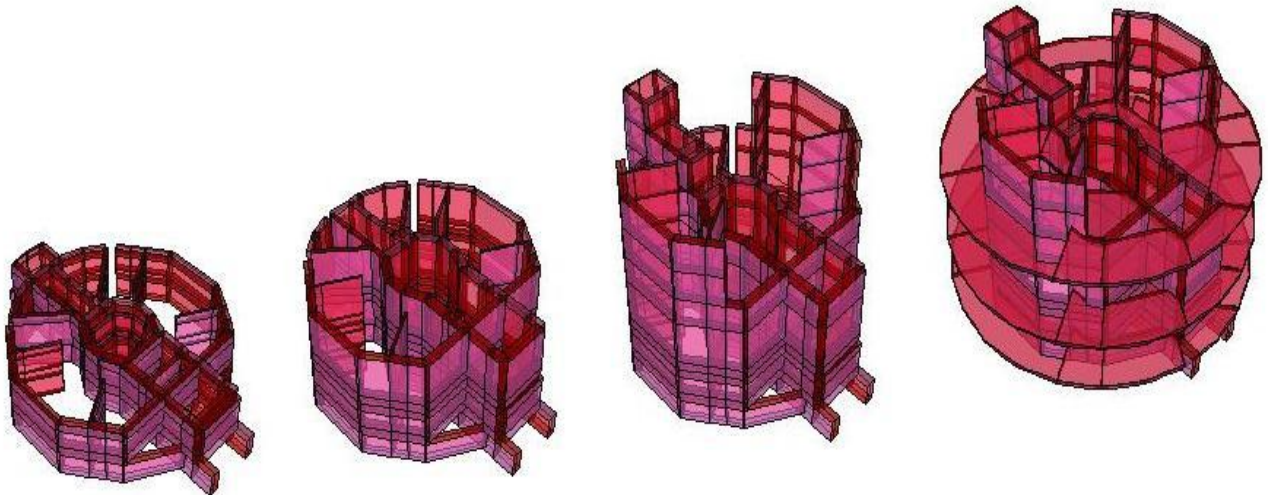


Figura 4.3: Proceso constructivo del modelo de las estructuras internas

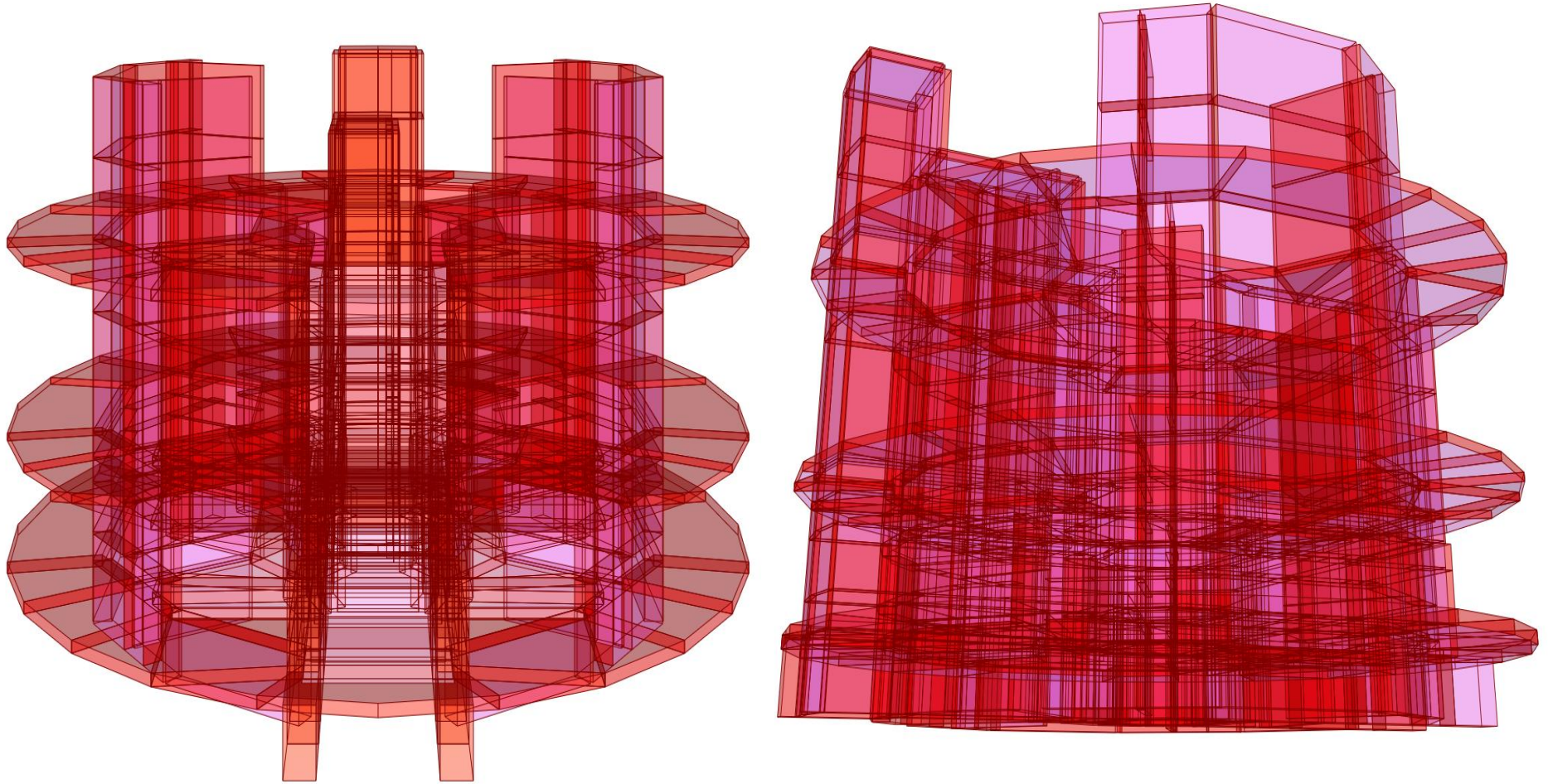


Figura 4.4: Vista frontal y lateral de las estructuras internas

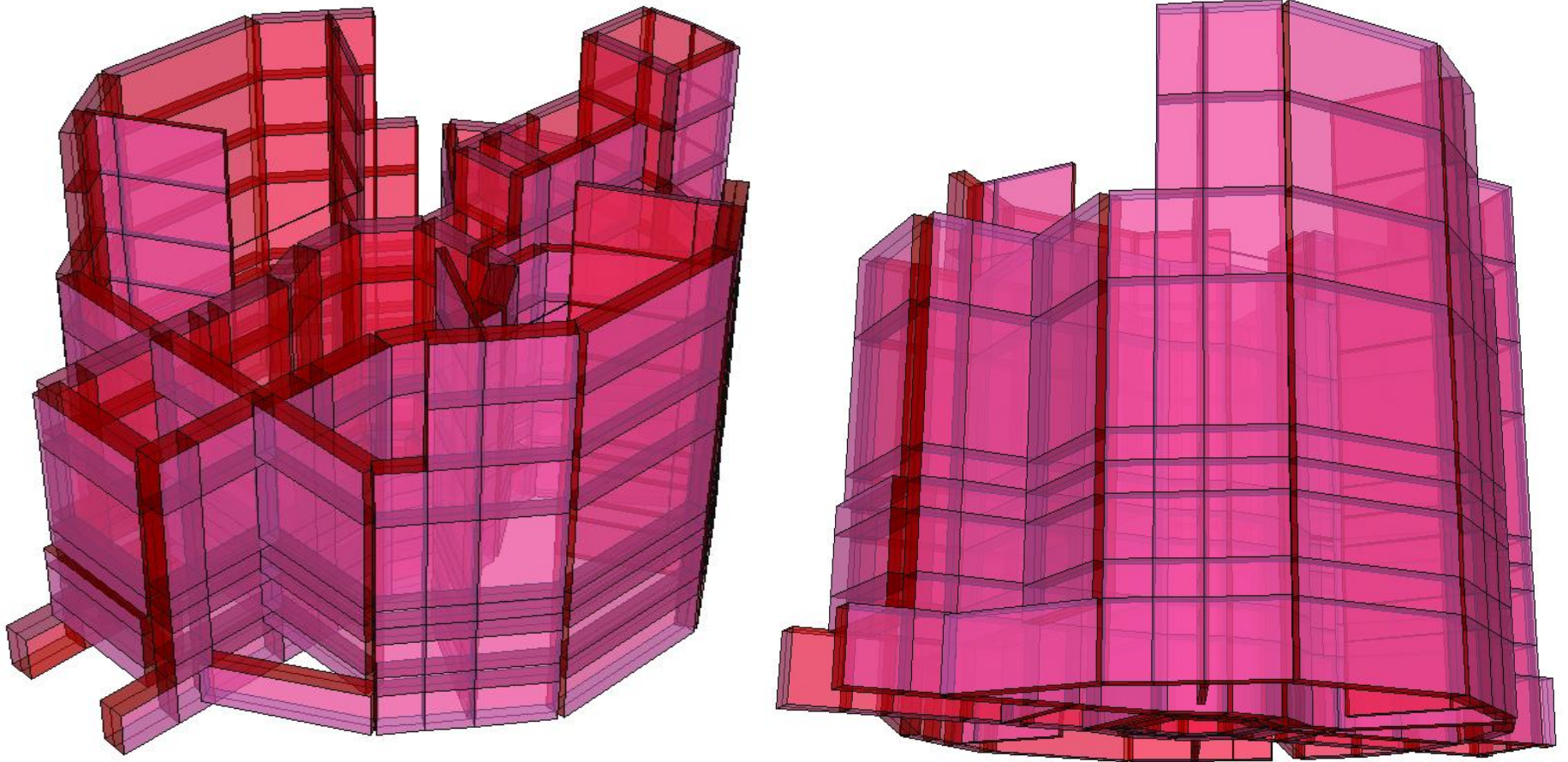


Figura 4.5: Vista frontal y lateral de los muros de la estructura interna, utilizando otras opciones gráficas del programa

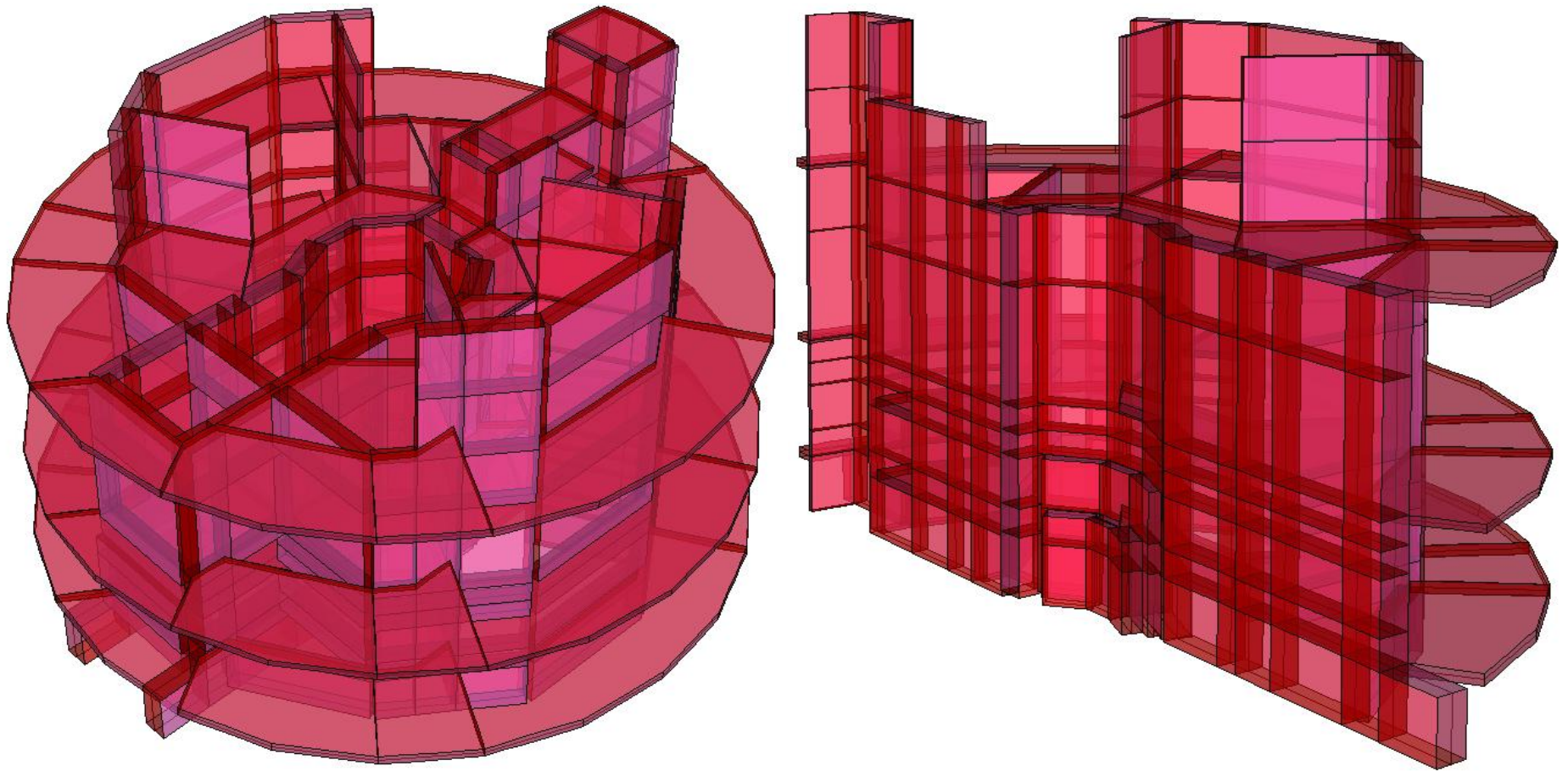


Figura 4.6: Vista superior y corte de la estructura interna completa considerando losas, utilizando otras opciones gráficas del programa

4.2.3. Fundaciones

Las fundaciones se modelan siguiendo la geometría descrita en los planos. El modelo consta de 2244 elementos tipo sólidos y 5168 nodos. Cada uno de los elementos tipo sólidos considera 6 grados de libertad por nodo, alcanzando un total de 31008 grados de libertad para el modelo.

Tabla 4.3: Datos del modelo de fundaciones

Modelo	Nº Nodos	Nº Elementos	Nº Grados de Libertad
Empotrado/Interacción	5168	2244	31008

En la figura 4.7 se describe el proceso de modelación de la fundación.

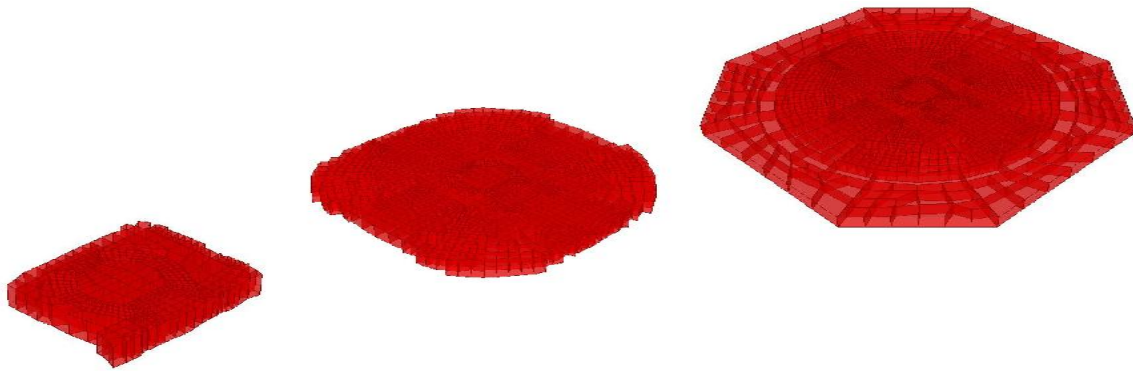


Figura 4.7: Proceso constructivo del modelo para las fundaciones

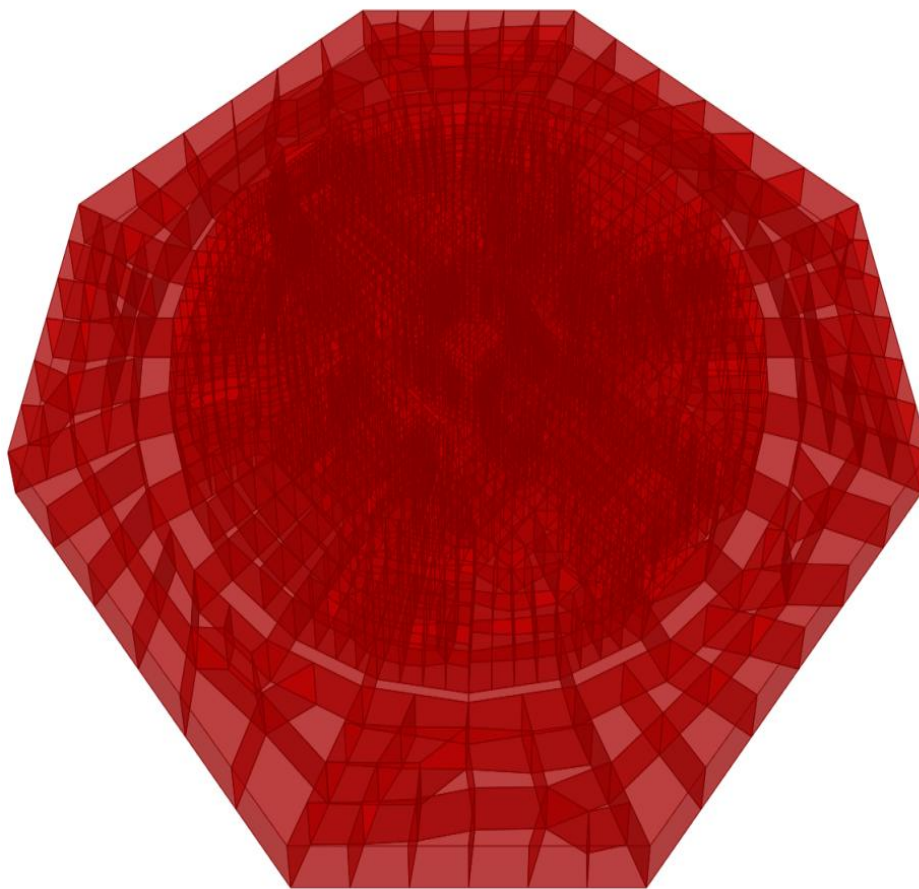


Figura 4.8: Vista superior de la losa de fundación

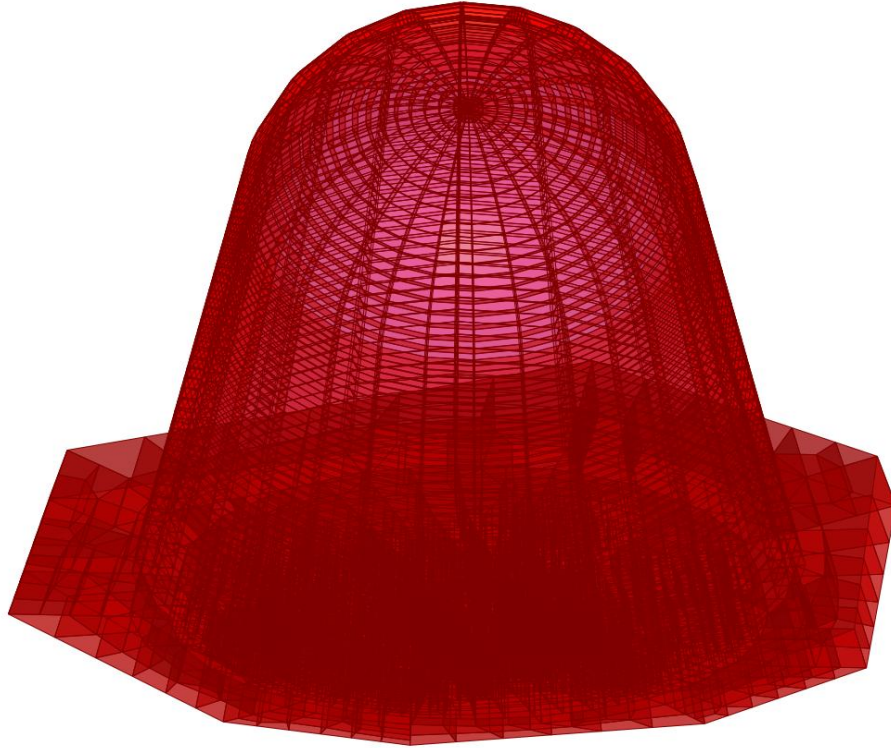


Figura 4.9: Modelo del edificio de contención considerando fundaciones

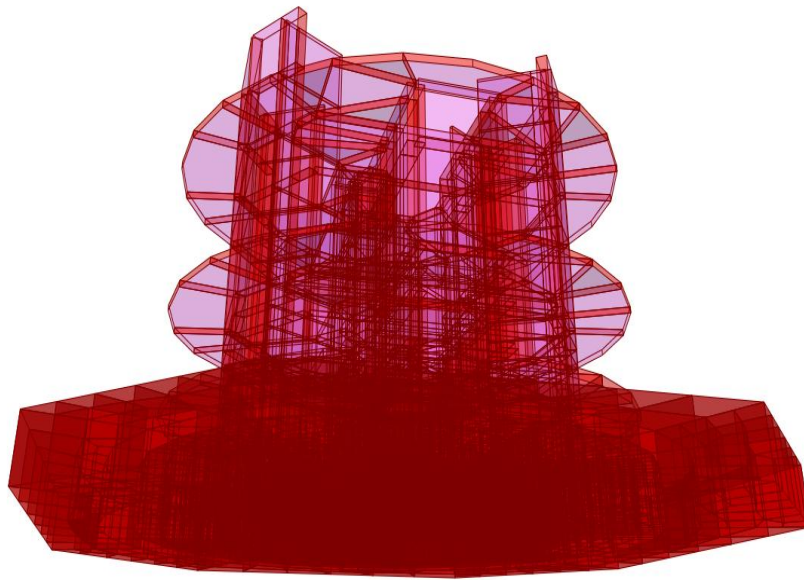


Figura 4.10: Modelo de las estructuras internas considerando fundaciones

4.2.4. Equipos y Puntos de control

Los equipos seleccionados, vasija del reactor y generadores de vapor, se modelaron mediante la asignación de cargas en los puntos de apoyo o nodos sobre las estructuras anteriores^[2]. Para el análisis de la respuesta, se escogieron puntos de interés en las diferentes estructuras. Los puntos de interés para el diseño están orientados al siguiente paso, que es el diseño de los equipos, por lo que los puntos seleccionados para el control son los puntos de apoyo de éstos sobre las estructuras. En ellos se analizaron dos parámetros; deformaciones y aceleraciones. Los puntos se muestran de manera esquemática en la figura 4.11:

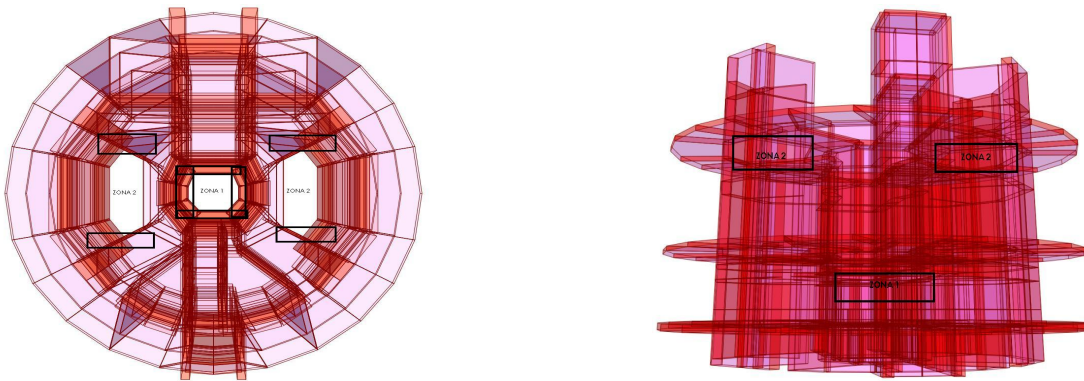


Figura 4.11: Puntos en los modelos para control de aceleraciones

4.2.5. Modelación del Suelo

La modelación del suelo se realiza con el propósito de ver el efecto del suelo sobre la respuesta sísmica de la estructura. La manera por la cual se realiza esta modelación es mediante el uso de resortes con una rigidez equivalente a la del suelo sobre el cual se cimenta la estructura. El lugar escogido para el emplazamiento tiene dos centrales termoeléctricas las cuales fueron fundadas sobre un suelo de buena resistencia. Utilizando información de este tipo de suelo, se modela el suelo de la central nuclear. Para la asignación de resortes en los puntos de apoyo de la fundación se tienen ciertos requerimientos de modelación, entre los que destacamos:

- Una distribución homogénea de los puntos de apoyo permiten una mayor rapidez en la asignación de los resortes y evita cálculos de distribución de los resortes.
- Dependiendo del programa computacional utilizado es necesario verificar el estado tensional del suelo. En algunos programas es posible el control de los resortes en caso de tracción, en otros no es posible teniendo que verificar su estado.

^[2]No se modelaron debido a que esto corresponde a otra etapa en el análisis sísmico no cubierta por este trabajo.

Considerando los requerimientos anteriores, el modelo de las fundaciones se modificó para que tuviera una distribución simétrica en los puntos de apoyo haciendo transiciones de los elementos sólidos, con lo cual no sólo se obtiene una distribución simétrica para los puntos de apoyo sino que una disminución del número de nodos y menor tiempo computacional requerido. Los valores de la constante de balasto se obtienen dependiendo del tipo de suelo sobre el cual se funda la estructura, para este caso, $k_v=20[\text{kg}/\text{cm}^3]$ es un valor correspondiente a un suelo de tipo grava arenosa gruesa la cual está presente en el estrato sobre la roca de fundación del reactor. Además se aplicó una constante de balasto en la dirección X e Y^[3], siendo valores menos relevantes en el comportamiento de la estructura. Aprovechando la simetría de las fundaciones, se hace la siguiente distribución para las diferentes direcciones de la constante de balasto. Se consideran los puntos de apoyo de la fundación sobre el suelo y una distribución simétrica de los puntos de la fundación.

A continuación se muestra en la figura 4.12, la asignación de resortes sobre los nodos de la fundación:



Figura 4.12: Modelo completo del reactor nuclear considerando suelo de fundación

4.2.6. Comentarios y Conclusiones

La modelación de las estructuras se realizó en programas utilizados en oficinas de calculo nacionales. El programa utilizado, SAP2000 v.11.0.6, es un programa de elementos finitos completo, aunque con ciertas limitaciones para el análisis de este tipo de estructuras. Se decidió ver el efecto del suelo en la respuesta de la estructura, para lo cual se fundó el edificio en un suelo de propiedades establecidas. La representación del suelo se realizó mediante la asignación de resortes en los puntos de apoyo, los cuales se ubicaron homogéneamente para evitar distribuciones más complejas en la base. Para lograr una distribución homogénea se realizaron transiciones de elementos sólidos en la fundación. Por lo tanto, la modelación se realizó de dos formas, con la base empotrada y con suelo flexible. La mayor complejidad está dada por el tiempo que requiere la confección de los modelos. La rigidez del suelo se representa por la rigidez de los resortes asignados, dada por la constante de balasto del suelo. Además para tener un análisis más completo de los efectos del tipo de suelo se efectuó una variación de la constante de balasto considerando diferentes tipos de suelo como condición de apoyo para las estructuras.

^[3] $k_h=4.77[\text{kg}/\text{cm}^3]$ para el suelo de fundación, calculado a partir de las propiedades de la fundación.

Capítulo 5

ANÁLISIS SÍSMICO E INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Para el análisis sísmico de las estructuras se utilizan dos métodos: análisis modal espectral y análisis en el tiempo, para los cuales se utilizan las demandas antes descritas. Los modelos analizados son:

- Modelos del edificio de contención, considerando la estructura empotrada en la base.
- Modelos de las estructuras internas, considerando la estructura empotrada en la base.
- Modelos de interacción con el suelo de fundación, en la cual se modela el suelo de fundación junto con las estructuras.

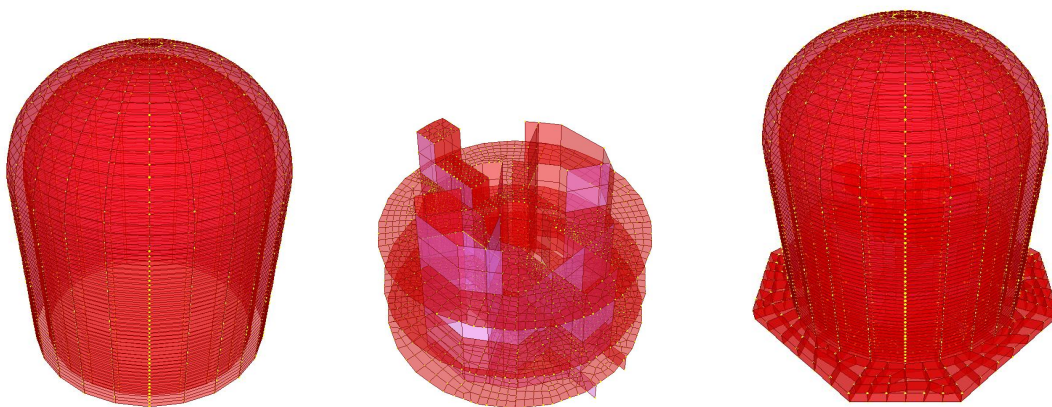


Figura 5.1: Modelos Edificio de Contención, Estructura Interna y Modelo de interacción.

5.1. Método Modal Espectral: Modelo Empotrado

5.1.1. Modos y frecuencias propias de vibrar

El análisis debe incluir suficientes modos de vibrar para que la suma de las masas equivalentes, en cada dirección de análisis, sea igual o superior al 90 % de la masa total. Para tal efecto se toman un total de 500 modos con lo cual se obtuvo el porcentaje requerido por norma. Los resultados de los primeros 20 modos se muestran en la tabla 5.1, además se incluyen las formas modales obtenidas:

Tabla 5.1: Modos y frecuencias propias de vibrar Modelo Empotrado.

Modo	Frecuencia [Hertz]	Periodo [Segundos]	Masas Modales Equivalentes		
			X	Y	Z
1	4,3880	0,2279	1,41 %	32,36 %	0,00 %
2	4,3880	0,2279	31,87 %	1,43 %	0,00 %
3	4,4244	0,2260	0,00 %	16,19 %	0,00 %
4	4,4284	0,2258	15,96 %	0,00 %	0,00 %
5	8,7332	0,1145	8,84 %	0,00 %	0,00 %
6	11,9190	0,0839	0,00 %	0,00 %	26,18 %
7	12,5470	0,0797	0,00 %	0,00 %	25,42 %
8	12,9100	0,0775	8,68 %	0,01 %	0,00 %
9	12,9110	0,0775	0,01 %	8,84 %	0,00 %
10	13,1610	0,0760	0,00 %	5,79 %	0,00 %
11	13,2810	0,0753	0,00 %	6,86 %	0,00 %
12	13,3620	0,0748	3,94 %	0,00 %	0,00 %
13	13,3630	0,0748	0,00 %	3,83 %	0,00 %
14	14,0520	0,0712	2,02 %	0,02 %	0,00 %
15	20,2510	0,0494	0,00 %	0,00 %	2,28 %
16	22,3750	0,0447	0,00 %	0,00 %	1,73 %
17	27,9090	0,0358	0,01 %	0,02 %	6,08 %
18	34,5030	0,0290	0,00 %	0,02 %	1,54 %
19	35,0660	0,0285	0,01 %	0,00 %	1,72 %
20	37,6390	0,0266	0,00 %	0,00 %	1,50 %

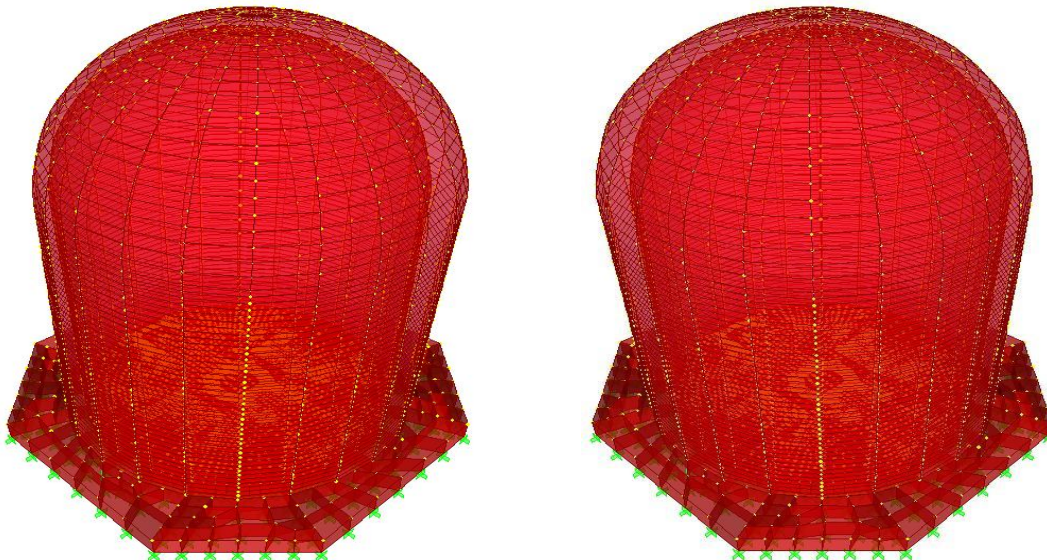


Figura 5.2: Modos de vibrar EC externo, Modo N°1 y Modo N°2

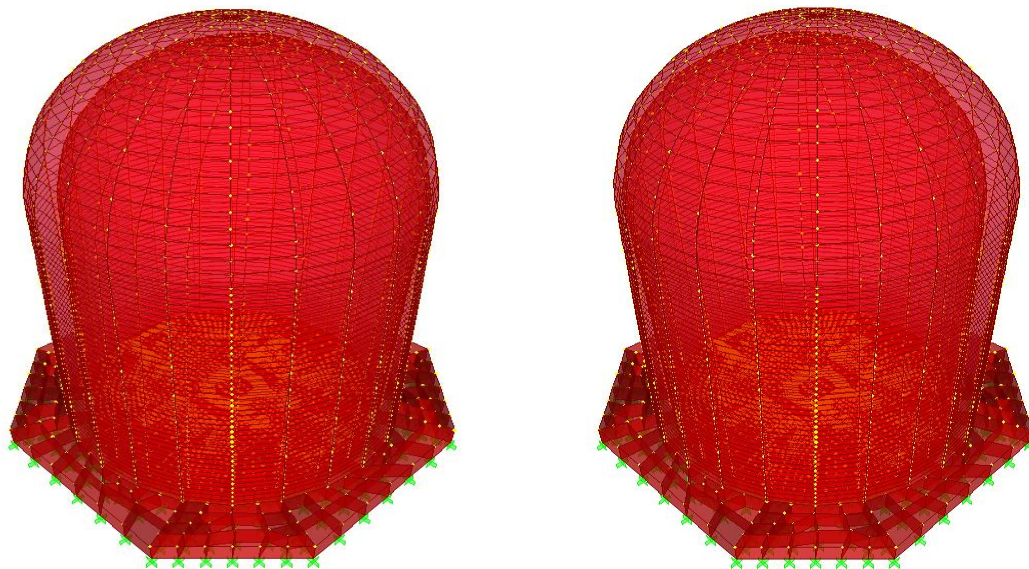


Figura 5.3: Modos de vibrar EC interno, Modo N°3 y Modo N°4

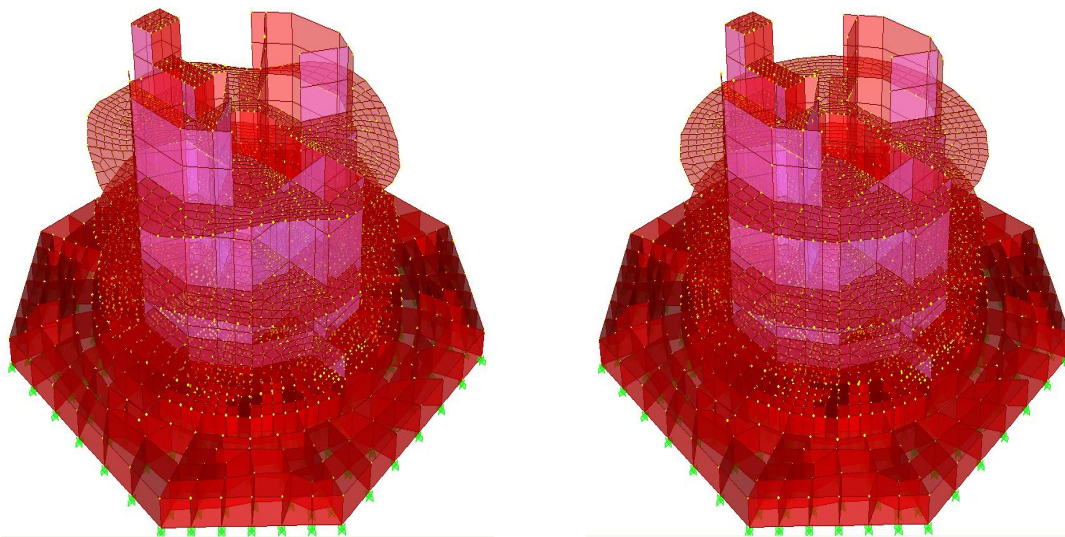


Figura 5.4: Modos de vibrar IC, Modo N°5 y Modo N°17

5.1.2. Esfuerzos

A continuación se muestran los resultados para los esfuerzos de las diferentes estructuras modeladas y los lugares donde se producen para cada estructura:

Tabla 5.2: Esfuerzos máximos obtenidos en cada estructura, Modelo Empotrado.

Esfuerzos Peso Propio			Esfuerzos Sismicos		
Estructura	Dirección	Tensión [Kg/cm ²]	Estructura	Dirección	Tensión [Kg/cm ²]
Edificio de Contención	X	4,30	Edificio de Contención	X	7,64
	Y	4,30		Y	7,64
	Z	19,70		Z	26,60
	XY	1,30		XY	3,60
Estructura Interna	X	16,50	Estructura Interna	X	21,50
	Y	16,50		Y	21,50
	Z	63,50		Z	68,80
	XY	8,50		XY	12,40
Fundaciones	X	3,69	Fundaciones	X	4,90
	Y	4,60		Y	6,10
	Z	11,09		Z	14,60
	XY	1,96		XY	4,30
	YZ	6,90		YZ	9,50
	ZX	7,64		ZX	13,40

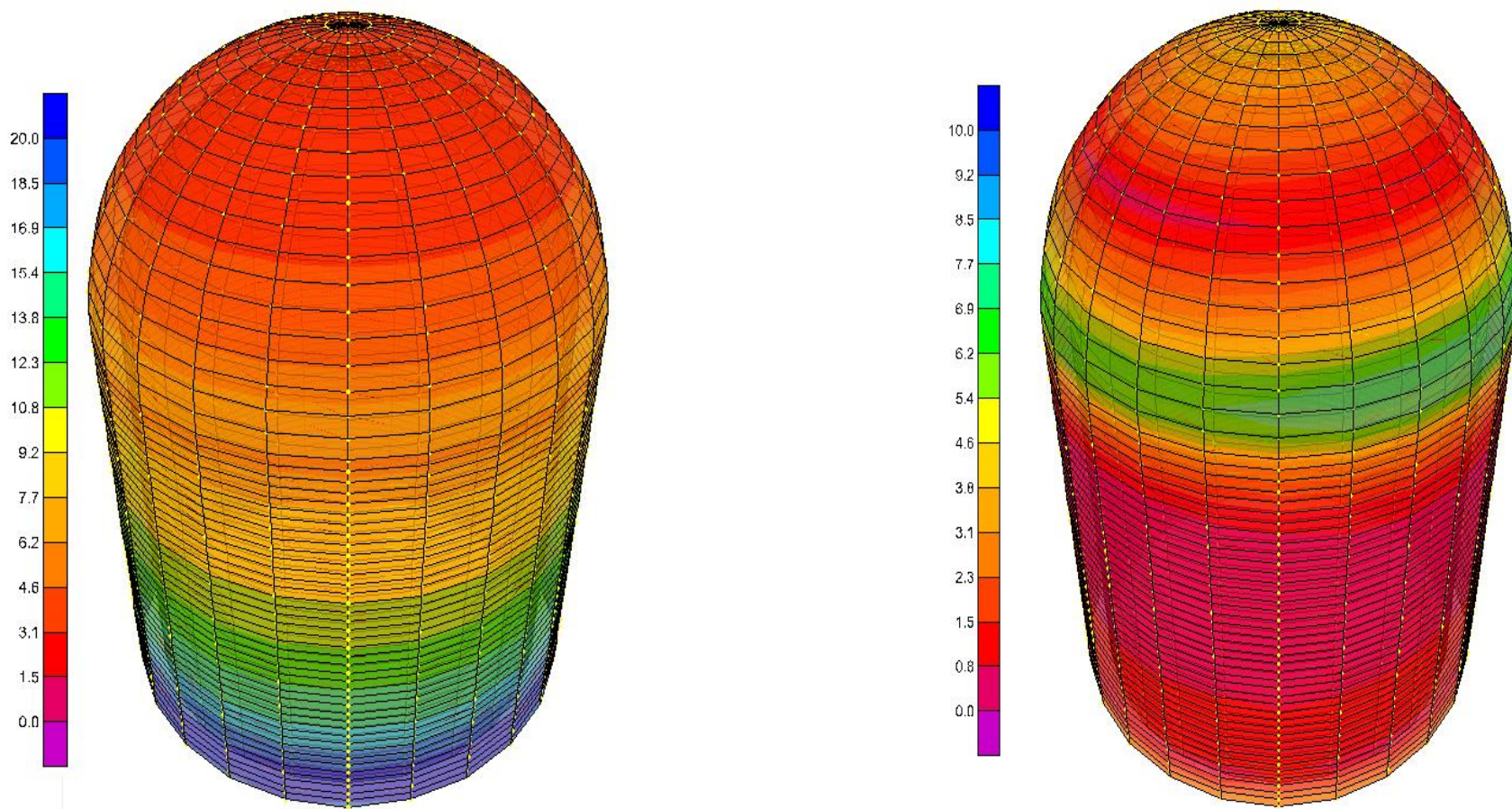


Figura 5.5: Tensiones para Edificio de Contención

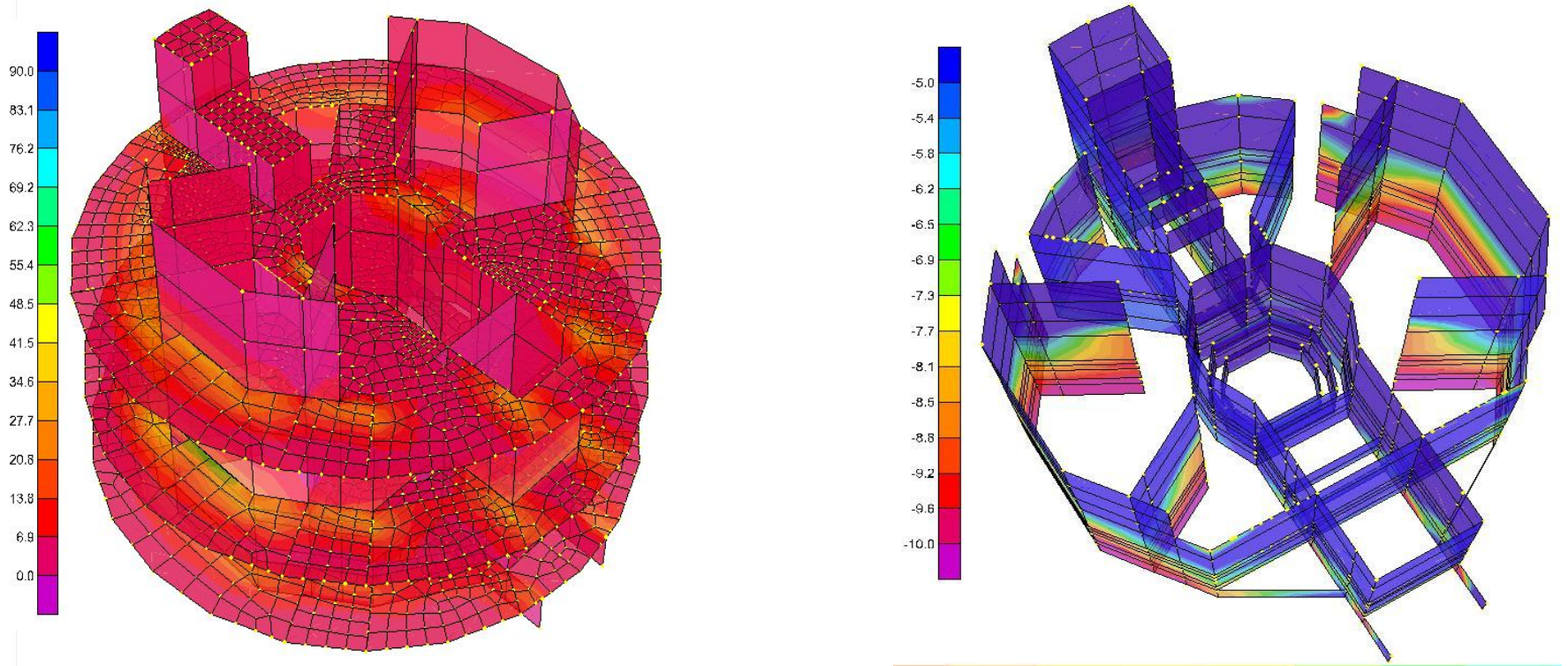


Figura 5.6: Tensiones para Estructura Interna

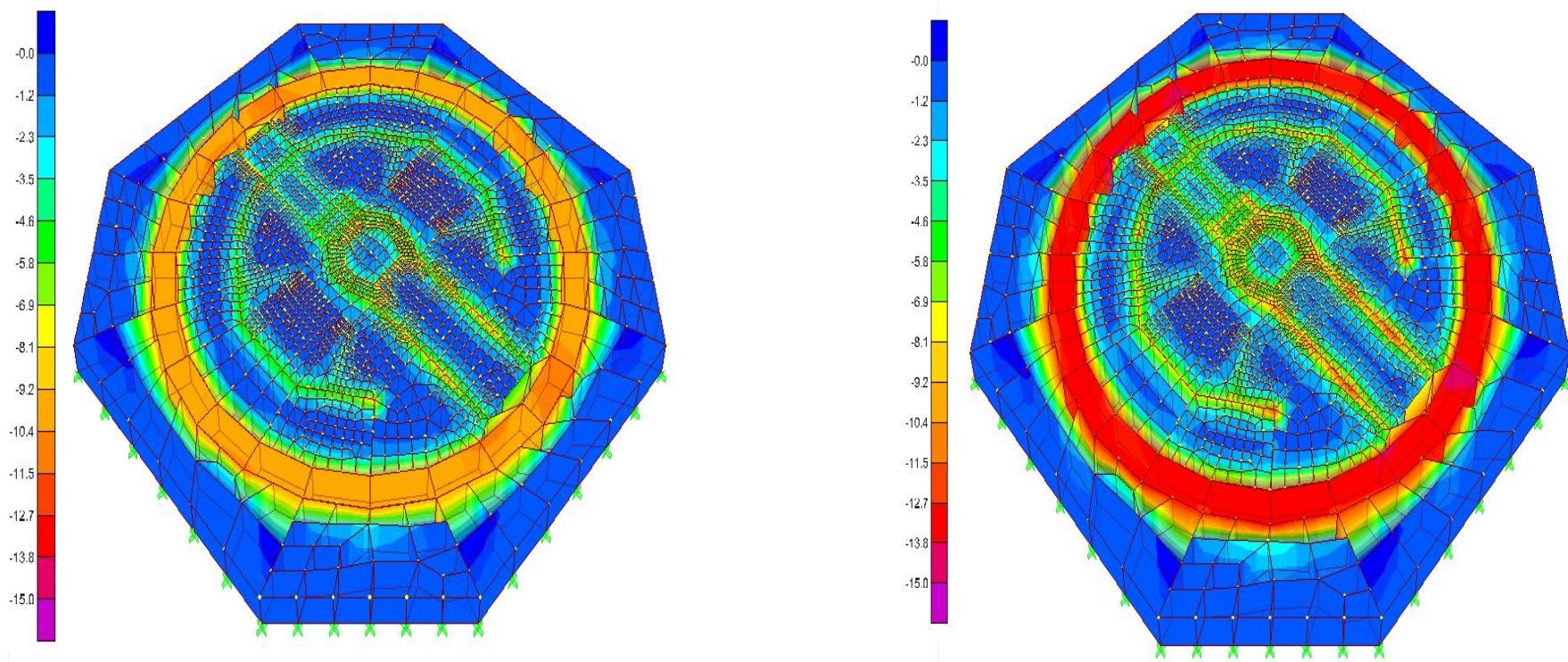


Figura 5.7: Tensiones para Fundaciones

5.2. Método Modal Espectral: Modelos de Interacción

5.2.1. Modos y frecuencias propias de vibrar

De igual manera que para el modelo anterior, se tomaron un total de 500 modos con lo cual se obtuvo el porcentaje requerido por norma. Los resultados de los primeros 20 modos se muestran en la tabla 5.3, además se incluyen las formas modales obtenidas:

Tabla 5.3: Modos y Frecuencias propias de vibrar.

Modo	Frecuencia [Hertz]	Periodo [Segundos]	Masas Modales Equivalentes		
			X	Y	Z
1	2,0043	0,4989	53,40 %	0,00 %	0,00 %
2	2,1601	0,4629	0,00 %	56,78 %	0,00 %
3	4,0494	0,2470	0,88 %	0,00 %	0,00 %
4	4,0644	0,2460	0,00 %	0,98 %	0,02 %
5	5,6368	0,1774	0,00 %	0,01 %	75,13 %
6	5,8422	0,1712	25,97 %	0,00 %	0,00 %
7	6,0619	0,1650	0,00 %	8,03 %	0,00 %
8	6,1738	0,1620	7,39 %	0,00 %	0,00 %
9	6,2310	0,1605	0,00 %	8,09 %	0,00 %
10	6,3090	0,1585	0,00 %	19,21 %	0,02 %
11	6,5103	0,1536	0,00 %	0,26 %	1,62 %
12	7,3961	0,1352	3,37 %	0,00 %	0,00 %
13	7,8560	0,1273	3,73 %	0,00 %	0,00 %
14	8,1623	0,1225	0,95 %	0,00 %	0,00 %
15	11,0030	0,0909	0,00 %	0,00 %	3,15 %
16	15,1030	0,0662	1,48 %	0,00 %	0,00 %
17	15,3810	0,0650	0,00 %	0,00 %	1,04 %
18	17,1640	0,0583	0,00 %	0,00 %	3,12 %
19	17,8110	0,0561	0,00 %	0,00 %	10,34 %
20	19,2820	0,0519	0,00 %	0,00 %	0,61 %

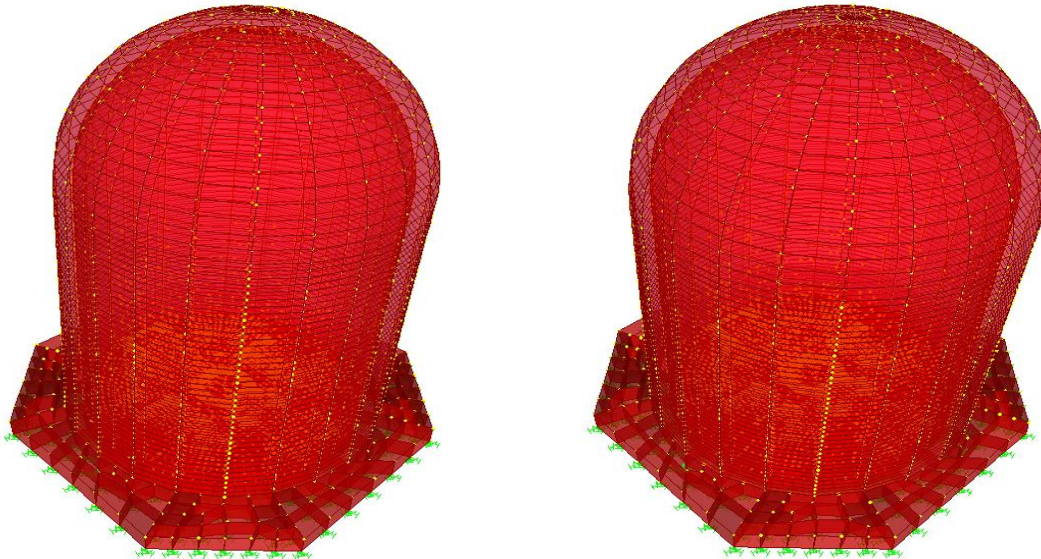


Figura 5.8: Modos de vibrar EC externo, Modo N°1 y Modo N°2

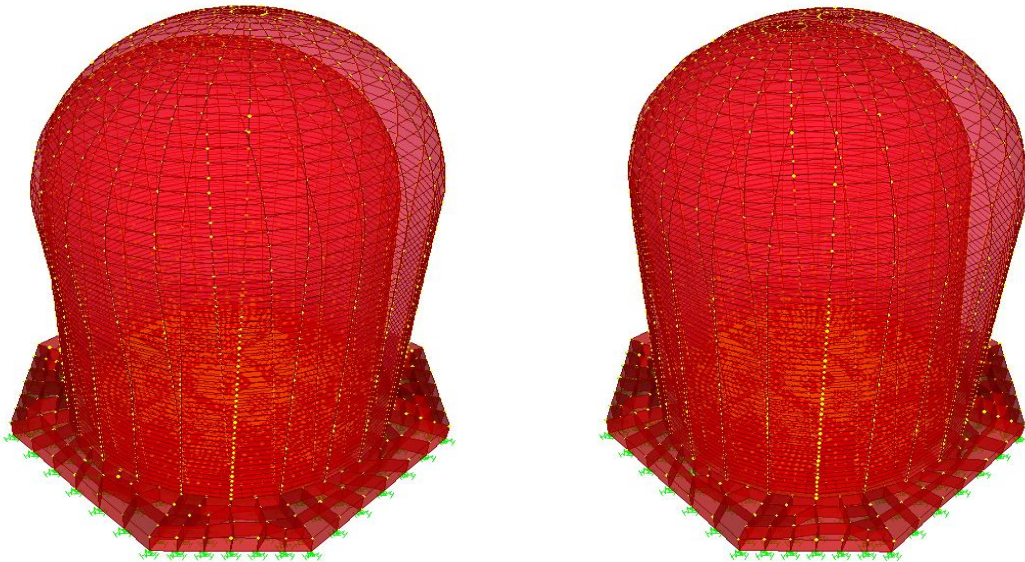


Figura 5.9: Modos de vibrar EC interno, Modo N°3 y Modo N°4

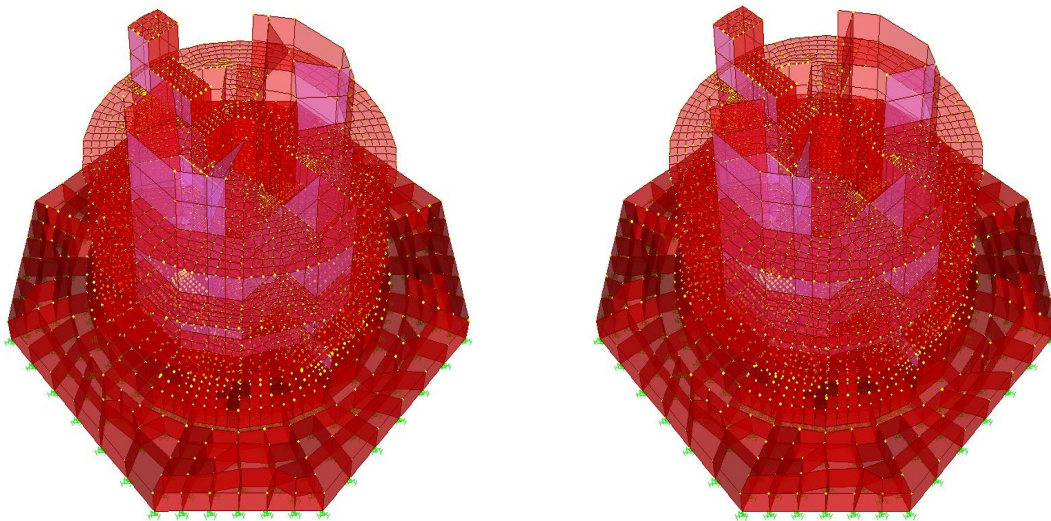


Figura 5.10: Modos de vibrar IC, Modo N°5 y Modo N°6

5.2.2. Esfuerzos

Tabla 5.4: Esfuerzos máximos obtenidos en cada estructura, Modelo con Suelo.

Esfuerzos Peso Propio			Esfuerzos Sísmicos		
Estructura	Dirección	Tensión [Kg/cm ²]	Estructura	Dirección	Tensión [Kg/cm ²]
Edificio de Contención	X	4,10	Edificio de Contención	X	9,50
	Y	4,10		Y	9,50
	Z	22,5		Z	29,70
	XY	2,60		XY	6,40
Estructura Interna	X	39,5	Estructura Interna	X	84,10
	Y	39,5		Y	84,10
	Z	128,5		Z	176,7
	XY	12,70		XY	33,2
Fundaciones	X	124,55	Fundaciones	X	162,9
	Y	151,9		Y	207,4
	Z	58,70		Z	96,30
	XY	83,00		XY	131,7
	YZ	114,8		YZ	154,3
	ZX	148,9		ZX	215,3

5.2.3. Desplazamientos

Se calcularon los desplazamientos máximos para la estructura interna y para el edificio de contención según cada condición de apoyo, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 5.5: Desplazamientos Modelo Empotrado

Estructura	Dirección	Desplazamiento máx. [cm]
Edificio de Contención	X	0,70
	Y	0,65
	Z	0,02
Estructura Interna	X	0,13
	Y	0,41
	Z	0,01

Tabla 5.6: Desplazamientos Modelo con Suelo

Estructura	Dirección	Desplazamiento máx. [cm]
Edificio de Contención	X	0,69
	Y	0,62
	Z	0,07
Estructura Interna	X	0,38
	Y	0,45
	Z	0,32

5.2.4. Estabilidad de Fundaciones

Para este caso, se analiza la estabilidad de la fundación. Se obtienen los resultados para los momentos a nivel basal a modo de verificar las presiones de suelo bajo las fundaciones.

Con estos datos, se verifica el estado de las tensiones bajo las fundaciones como sigue:

Tabla 5.7: Resultados para verificación de tensiones en fundaciones.

Modelo c/Suelo	
Peso Total[Ton]	134274,6896
Msx[Ton-m]	198511,7786
Msy[Ton-m]	180017,9915

$$e_x = \frac{My}{N} = \frac{180017,9915}{134274,691} = 1,34[m] \leq \frac{L}{6}$$

$$e_y = \frac{Mx}{N} = \frac{198511,7786}{134274,691} = 1,48[m] \leq \frac{L}{6}$$

Es decir, la fundación no se levanta en punto alguno.

5.3. Método de Análisis en el Tiempo

Se realiza un análisis en el tiempo en el cual se controlan deformaciones y aceleraciones en la estructura.

5.3.1. Desplazamientos

Tabla 5.8: Desplazamientos Modelo Empotrado caso análisis en el tiempo

Estructura	Dirección	Desplazamiento máx. [cm]
Edificio de Contención	X	3,79
	Y	3,78
	Z	0,15
Estructura Interna	X	1,27
	Y	1,87
	Z	0,13

Tabla 5.9: Desplazamientos Modelo con Suelo caso análisis en el tiempo

Estructura	Dirección	Desplazamiento máx. [cm]
Edificio de Contención	X	5,40
	Y	5,60
	Z	0,07
Estructura Interna	X	2,50
	Y	4,30
	Z	0,60

5.3.2. Aceleraciones en puntos de control

Las aceleraciones obtenidas en los puntos de apoyo de los equipos se grafican y se comparan con las obtenidas en el modelo de interacción. Los datos de aceleraciones se deben utilizar para el futuro diseño de los apoyos.

Nivel +23.60(Generador de Vapor)

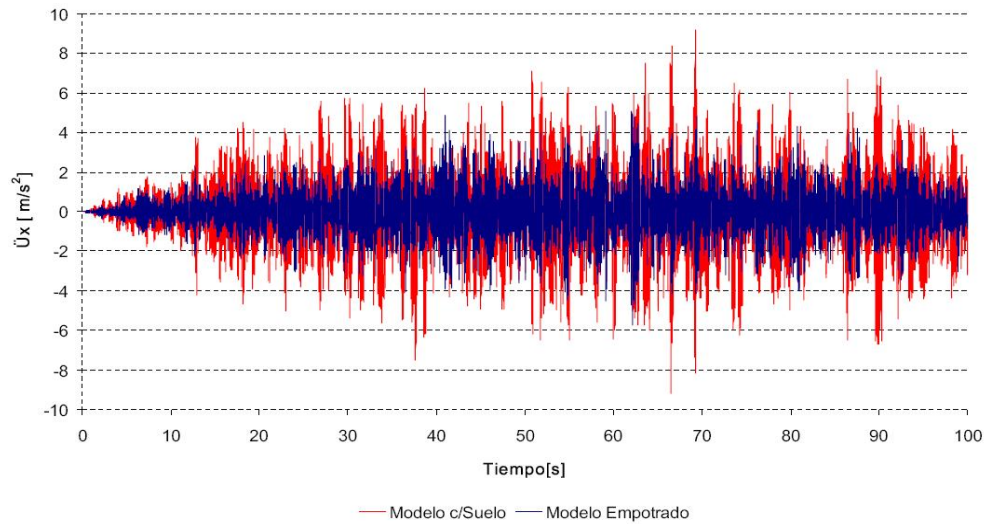


Figura 5.11: Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección X.

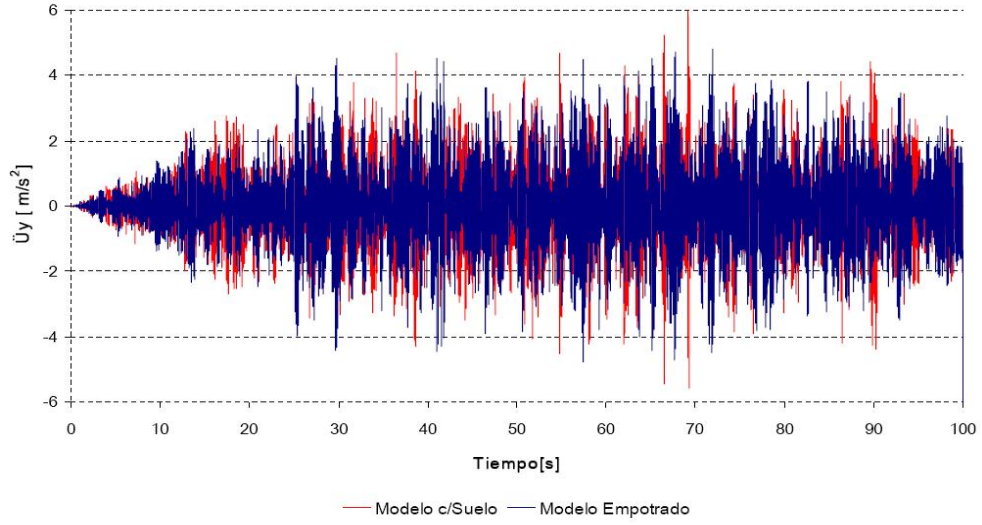


Figura 5.12: Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección Y.

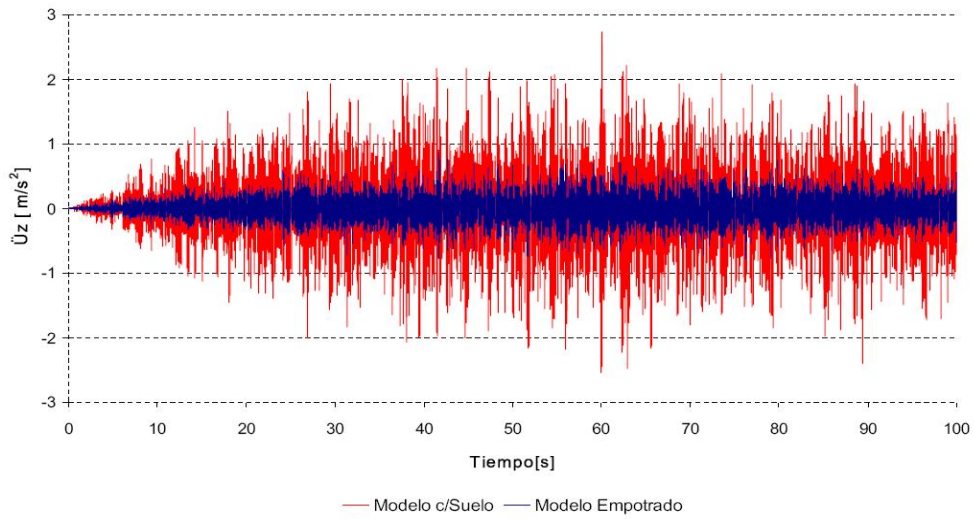


Figura 5.13: Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección Z.

Nivel +8.21(Vasija de Reactor)

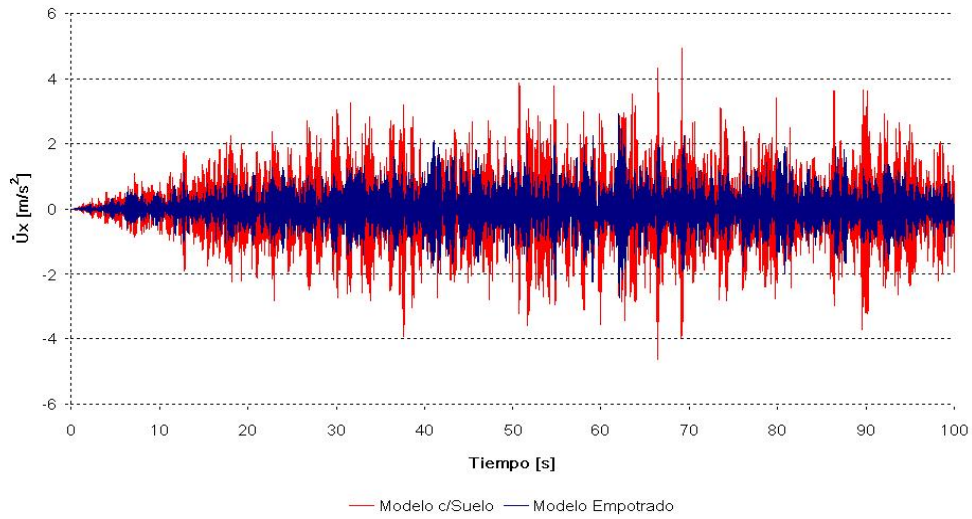


Figura 5.14: Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +8.21, Dirección X.

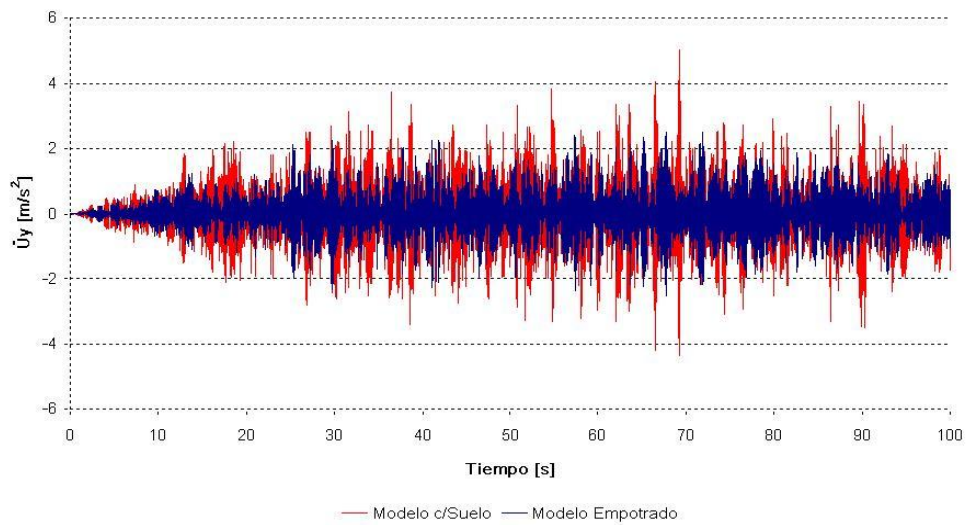


Figura 5.15: Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +8.21, Dirección Y.

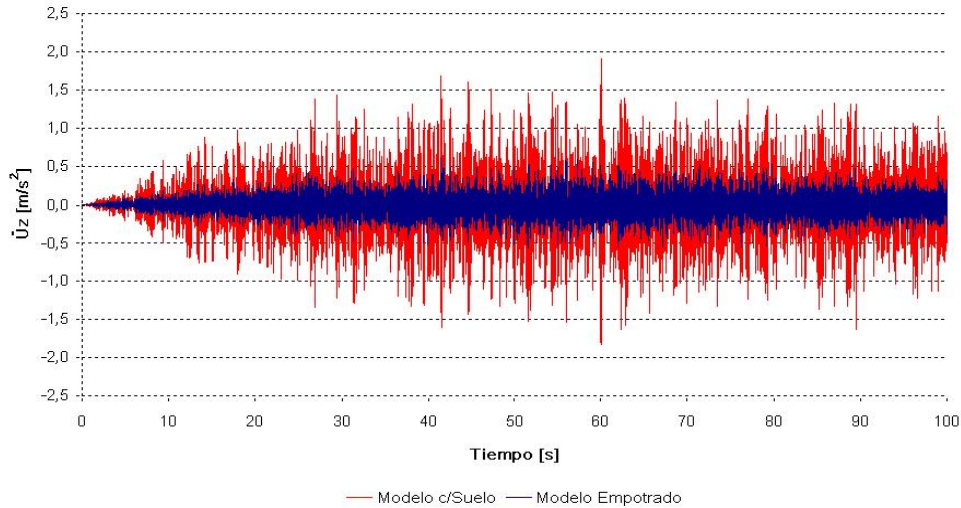


Figura 5.16: Aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +8.21, Dirección Z.

5.4. Análisis de los Resultados

5.4.1. Frecuencias y Modos propios de vibrar

Modelo empotrado

Los resultados de la tabla 5.1 muestran que el rango de frecuencias fundamentales varía entre 4,388 [Hertz] y 12,547 [Hertz], siendo los periodos de 0,2279[seg] fundamentales para las direcciones X e Y, y 0,0839[seg] para la dirección Z. El porcentaje de participación modal para estas frecuencias fundamentales alcanza un 32,36 % para la dirección Y, 31,38 % para la dirección X y un valor menor para la dirección Z de 26,18 %. Estos resultados clasifican al edificio de contención y las estructuras internas como rígidas. El resto de los modos tiene un bajo porcentaje de participación modal siendo en muchos casos menor que el 1 %. Se utilizaron un total de 500 modos alcanzando una acumulación del 91,8 % de participación modal para cada dirección de análisis.

Se analizan las formas modales para los periodos fundamentales de vibración, en la figura 5.2 y 5.3 se observan los modos fundamentales para las direcciones X y Y, siendo los edificios de contención los de mayor participación modal. En la figura 5.4 se observan los modos fundamentales para la dirección Z, siendo las estructuras internas las de mayor participación modal para esta dirección de análisis.

Modelo con suelo

Los resultados de la tabla 5.3 muestran que el rango de frecuencias fundamentales varía entre 2,004 [Hertz] y 5,6368 [Hertz], siendo los periodos de 0,4989[seg] para la dirección X, 0,4629[seg] para la dirección Y, y 0,1774[seg] para la dirección Z. El porcentaje de participación modal para estas frecuencias fundamentales alcanza un 53,40 % para la dirección X, 56,78 % para la dirección Y, y un valor mayor para la dirección Z de 75,13 %. Estos resultados clasifican al edificio de contención y las estructuras internas como rígidas. Se utilizaron un total de 500 modos alcanzando una acumulación del 98,3 % de participación modal para cada dirección de análisis.

Se analizan las formas modales para los periodos fundamentales de vibración, en la figura 5.8 y 5.9 se observan los modos fundamentales para las direcciones X y Y, siendo los edificios de contención los de mayor participación modal. En la figura 5.10 se observan los modos fundamentales para la dirección Z, siendo las estructuras internas y las fundaciones las de mayor participación modal para esta dirección de análisis.

Comparando los resultados obtenidos para las diferentes condiciones de apoyo, se observa un aumento en las participaciones modales en todas las direcciones de análisis, acumulando un 6,5 % más de participación modal que para el caso empotrado. Además, se produce un aumento en los periodos fundamentales para cada dirección de análisis, flexibilizando las estructuras. El efecto de un suelo de fundación flexible, modelado con resortes, hace que las estructuras aumenten sus periodos fundamentales y que la fundación adquiera una mayor participación en la respuesta de las estructuras aumentando el porcentaje de participación modal. Al contrario del caso empotrado, se produce un aumento importante en la participación modal de la dirección Z, en la cual se observa que la fundación común mueve todas las estructuras, haciendo que se acumule una cantidad importante de masa.

En definitiva, se observan cambios importantes en frecuencias, direcciones y participaciones modales de los modos fundamentales de vibrar en la estructura, considerando diferentes condiciones de apoyo. Esto permite afirmar que se observa un cambio en el comportamiento dinámico de la estructura debido a la incorporación del suelo en el modelo.

5.4.2. Tensiones Admisibles

Se realiza una verificación estructural, para lo cual se utilizan los criterios definidos por el código ACI-ASME mencionado anteriormente. Se definen las siguientes tensiones admisibles para los elementos de hormigón:

Tabla 5.10: Tensiones admisibles para los elementos de hormigón

	Resistencia	H30	H35	H40
Compresión	$0,75 \cdot f'c$	187,5	225	262,5
	$0,85 \cdot f'c$	212,5	255	297,5
Corte	$3,5\sqrt{f'c}$	55,4	60,62	65,5
Tracción	$0,57 \cdot \sqrt[3]{f'c^2}$	22,62	25,6	28,31

Los resultados para las tensiones se muestran en las tablas 5.2 y 5.4 para los casos empotrado y con suelo flexible respectivamente. La ubicación de los esfuerzos máximos para el caso de suelo se producen en lugares cercanos a los indicados en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 por lo que no se consideró necesario colocar figuras similares para indicar esas zonas. Si analizamos los esfuerzos para el edificio de contención se observa que se tiene un aumento máximo de 20 %, alcanzando valores de 29,7 [kg/cm²] en compresión, lo cual no tiene problemas para el hormigón. En general para el caso del edificio de contención, las tensiones resultan siempre de compresión lo cual no presenta problemas.

Para el caso de las estructuras internas, se produce una variación importante en los esfuerzos, los cuales sobrepasan la resistencia a tracción del hormigón por lo que se debe diseñar con un hormigón de mayor resistencia que el asumido inicialmente. Los requisitos exigen que para un sismo sin rebaja por ductilidad, esta edificación debe trabajar en fase I, es decir, las tracciones que se produzcan no deben alcanzar a fisurar el hormigón para el caso del sismo definido como OBE. Hay que mencionar que a pesar que el edificio de contención no tienen problemas de tensiones, se permite la fractura de material. Analizando las zonas en las cuales se producen los mayores esfuerzos para las estructuras internas se observa que las uniones entre losas y muros, en especial las zonas que están en volado, poseen las mayores concentraciones de tensiones como se observa en la figura 5.6. Los muros no tienen problemas de tensiones siendo las zonas cercanas a la fundación, las que presentan los mayores esfuerzos. En general se observa un aumento en los valores de las tensiones en el modelo debido a la condición de apoyo de suelo flexible, pero que en ningún caso ocasionaría la falla de los elementos estructurales o pondría en riesgo la operabilidad de la central, además se toman medidas de seguridad en las zonas de mayor demanda, por ejemplo, para el caso del edificio de contención se observan que las mayores tensiones se producen en el contacto entre el domo y el manto, como se aprecia en la figura 5.5, razón por la cual se refuerza esta zona con un anillo de hormigón.

5.4.3. Desplazamientos

Se obtienen los desplazamientos en distintos puntos de la estructura, para el caso de los edificios de contención los máximos desplazamientos se obtuvieron en la altura máxima del domo, además se obtuvieron los desplazamientos en la conexión del manto con el domo, a modo de ver una posible interacción entre estructuras. Para las estructuras internas, los desplazamientos máximos se obtuvieron en los muros que rodean a los generadores de vapor, los cuales tienen una altura libre, y se obtuvieron los desplazamientos en las losas a modo de ver una posible interacción entre las estructuras.

En la sección 5.2.3, se muestran los desplazamientos para el análisis modal en los que se considera el sismo base de operación (OBE) y en la sección 5.3.1 para el análisis en el tiempo en los que se considera el sismo de parada segura (SSE). Para cada tipo de análisis se consideran los modelos empotrado y el modelo con suelo flexible.

Método análisis modal

Los desplazamientos obtenidos para el sismo base de operación no superan el centímetro en ninguna dirección de análisis para el caso más desfavorable. La simetría del edificio de contención hace que los valores de deformación sean parecidos para las direcciones X e Y, caso contrario ocurre en las estructuras internas donde los desplazamientos en la dirección X son menores a los medidos en la dirección Y, siendo ésta su dirección débil, en todo caso los valores en ambas direcciones son bajos, lo que indicaría una buena distribución de elementos estructurales resistentes. Para el edificio de contención se observa un aumento menor al 3% para el caso considerando el suelo de fundación, de igual forma el aumento es menor para las estructuras internas en las direcciones X e Y, pero se debe destacar el aumento importante, en hasta 3 veces, que tienen las deformaciones en la dirección Z para el caso considerando el suelo de fundación.

Método análisis en el tiempo

Los desplazamientos obtenidos para el sismo de parada segura no superan los 6 centímetros en ninguna dirección de análisis para el caso más desfavorable. En este caso se observa un aumento importante, de hasta 2 veces en todas las direcciones de análisis para las diferentes condiciones de apoyo.

Al comparar los resultados obtenidos, se observa que a pesar del aumento de las deformaciones considerando condiciones de suelo flexible, los valores alcanzados no presentan problemas de interacción entre las estructuras, ya que la separación es de 150 [cm] entre el edificio de contención y de 50[cm] entre las estructuras internas y el edificio de contención interno. Los desplazamientos mayores se tienen en los edificios de contención, confirmando el comportamiento de menor rigidez, en comparación con las estructuras internas obtenido en el análisis de las frecuencias, además los cocientes entre las alturas de las estructuras y los valores de deformaciones obtenidos confirman la rigidez de todas las estructuras. Otro aspecto importante de destacar es que los máximos des-

plazamientos se producen en las direcciones transversales, siendo menores en la dirección Z para todas las estructuras.

Finalmente cabe destacar que, a pesar de que la flexibilización de la estructura conlleva un aumento en los desplazamientos, tal cantidad se ve amplificada en este caso por el movimiento de la fundación, lo que lleva a valores mayores a los esperados.

5.4.4. Verificación de Fundaciones

Se calculan las reacciones a nivel basal para ver el estado tensional en que se encuentra el suelo bajo la fundación. Los resultados indican que para los dos casos de sismos, sin importar las condiciones de apoyo de la estructura, el suelo se encuentra totalmente comprimido lo cual valida el modelo de resortes utilizado debido a que no trabaja a tracción.

5.4.5. Aceleraciones

Se obtienen las aceleraciones en distintos puntos de la estructura, específicamente en dos niveles que corresponden a los de instalación de equipos de generación eléctrica y equipos de seguridad.

En la sección 5.3.2, se muestran las aceleraciones obtenidas para análisis en el tiempo en los que se considera el sismo de parada segura (SSE). Las figuras 5.11 a la 5.16, muestran la comparación de las aceleraciones para el modelo empotrado y el modelo con suelo flexible.

Nivel +23.60

Para la dirección X, las aceleraciones obtenidas oscilan entre $-7[m/s^2]$ y $7[m/s^2]$ y $-9[m/s^2]$ y $9[m/s^2]$ para el caso empotrado y de suelo respectivamente. En promedio existe una variación del 33 % para las diferentes condiciones de apoyo. De igual manera para la dirección Y, las aceleraciones obtenidas oscilan entre $-5[m/s^2]$ y $5[m/s^2]$ y $-6[m/s^2]$ y $6[m/s^2]$ para el caso empotrado y de suelo respectivamente, existiendo, en promedio, una variación del 20 % para las diferentes condiciones de apoyo. Para la dirección Z, las aceleraciones obtenidas oscilan entre $-1[m/s^2]$ y $1[m/s^2]$ y $-3[m/s^2]$ y $3[m/s^2]$ para el caso empotrado y de suelo respectivamente. En promedio existe una variación de hasta 3 veces en las aceleraciones para las diferentes condiciones de apoyo.

Nivel +8.21

Para la dirección X e Y, las aceleraciones obtenidas oscilan entre $-2[m/s^2]$ y $2[m/s^2]$ y $-3[m/s^2]$ y $3[m/s^2]$ para el caso empotrado y de suelo respectivamente. En promedio existe una variación del 50 % para las diferentes condiciones de apoyo. Para la dirección Z, las aceleraciones obtenidas oscilan entre $-0,5[m/s^2]$ y $0,5[m/s^2]$ y $-1,5[m/s^2]$ y $1,5[m/s^2]$ para el caso empotrado y de suelo respectivamente. En promedio existe una variación de hasta 3 veces en las aceleraciones para las diferentes condiciones de apoyo.

Analizando los resultados obtenidos, se observa que a pesar de las grandes variaciones para la dirección Z, los valores obtenidos son menores comparados con las direcciones de X e Y, además, si comparamos los valores entre los dos niveles se observa la poca variación lo que confirma la rigidez de la estructura. Los resultados de las aceleraciones para las diferentes condiciones de apoyo indican claramente el efecto de amplificación del suelo, en particular, para el caso de la dirección Z, se explica observando el espectro obtenido del registro utilizado para los análisis, mostrado en la figura 5.17.

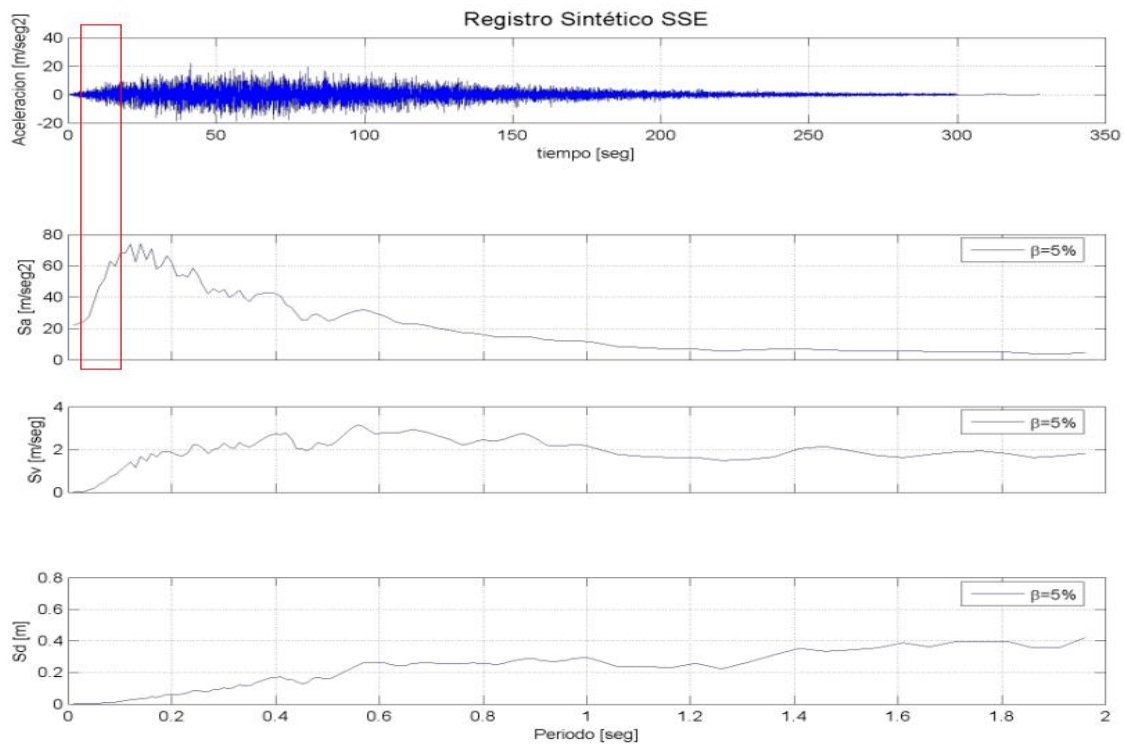


Figura 5.17: Espectro obtenido del registro SSE

En la dirección Z se observa un cambio del período fundamental de 0,0839[seg] a 0,1774[seg]. En la figura se muestra que el cambio de estos períodos se encuentra en una zona de aumento en la aceleración, lo que se observa en las figuras 5.13 y 5.16, el aumento debe ser alto ya que se relaciona con la pendiente de la curva del espectro. Distinto es el caso de las direcciones X e Y en que, su baja participación modal, en sus períodos fundamentales no permite hacer un análisis como en el caso de la dirección Z. Esto hace necesario que se realicen análisis para diferentes registros en el tiempo.

5.5. Análisis de Sensibilidad de los Modelos

Los parámetros más importantes en los análisis son la demanda sísmica y las condiciones de apoyo para las estructuras modeladas. Se realiza una breve discusión al variar los parámetros antes mencionados.

5.5.1. Variación de la demanda sísmica

La norma NCh2369.Of2003 permite obtener distintas demandas sísmicas para zonas del país, con esto se puede obtener la respuesta de las estructuras para distintas condiciones. Se calculan los parámetros y se obtienen las demandas para diferentes zonas sísmicas del país^[1]. Con las consideraciones mencionadas, se obtienen los siguientes parámetros para el análisis:

Tabla 5.11: Parámetros para el análisis elástico dinámico en diferentes zonas sísmicas de Chile

Zona Sísmica	Ao [g]	I	R	T' [Seg]	n	ξ	Cmáx [g]
3	0,4	1,2	1,0	0,2	1,0	0,05	0,66
2	0,3	1,2	1,0	0,2	1,0	0,05	0,50
1	0,2	1,2	1,0	0,2	1,0	0,05	0,33

Con los datos anteriores se obtienen los espectros de los sismos base de operación(OBE) para distintas zonas del país, mostrados en la figura 5.18.

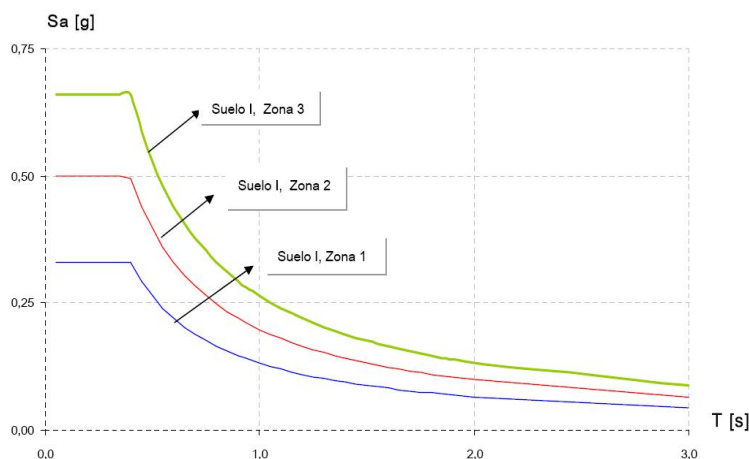


Figura 5.18: Espectro de diseño según NCh2369.Of2003 para diferentes tipos de zona sísmica

Se observa la disminución en la demanda para las diferentes zonas del país, lo que conlleva a menores esfuerzos en las estructuras para el caso del OBE y menores desplazamientos comparados con los obtenidos para el caso analizado en suelo 1 y zona sísmica 3. Este efecto de disminución favorece

^[1]Siempre considerando roca como suelo de fundación.

los esfuerzos y desplazamientos pero no es claro que determine una elección de sitios en las zonas 1 o 2 ya que existen muchos otros parámetros que deben ser evaluados, no relacionados con efectos sísmicos, a modo de determinar el lugar más favorable de un conjunto de sitios.

5.5.2. Variación de la condición de apoyo

Se realiza un análisis de los modelos para diferentes condiciones de apoyo de la estructura, en este caso diferentes tipos de suelo, para lo cual se utilizan diferentes valores para la constante de balasto. En la tabla 5.12 se presentan los coeficientes de balasto en función del tipo de terreno^[2]:

Tabla 5.12: Coeficiente de balasto en función del tipo de terreno

Tipo de Suelo	Kbalasto [Kg/cm ³]
Suelo Arcilla arenosa húmeda	2 a 3
Suelo Arcilla arenosa seca	6 a 8
Suelo de grava arenosa fina	8 a 10
Suelo de grava arenosa gruesa	15 a 20

Para ver las diferentes respuestas se analizaron todos los casos anteriores, a continuación se presentan los resultados obtenidos para tres valores que ejemplifican el efecto de amplificación del suelo en las aceleraciones para las diferentes direcciones de análisis.

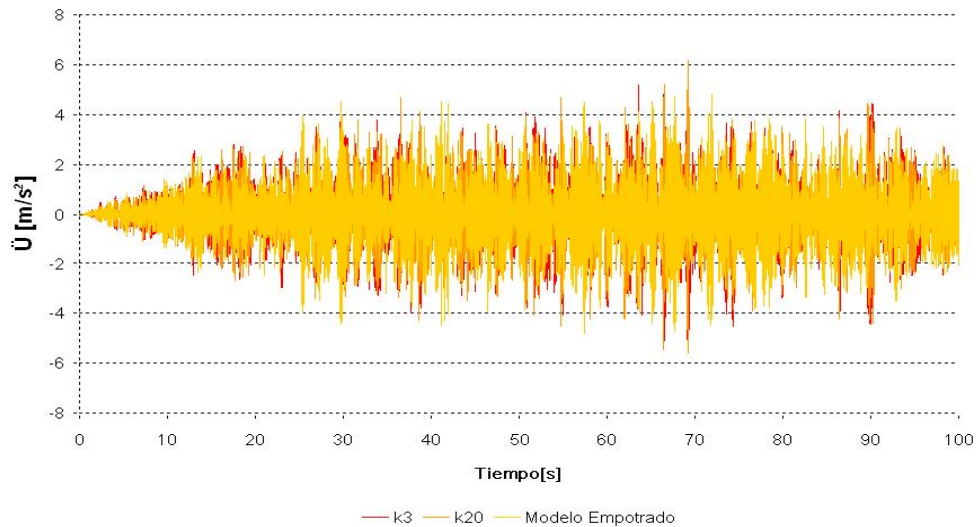


Figura 5.19: Variación de las aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección X, Y.

^[2]Hahn, pág 315.

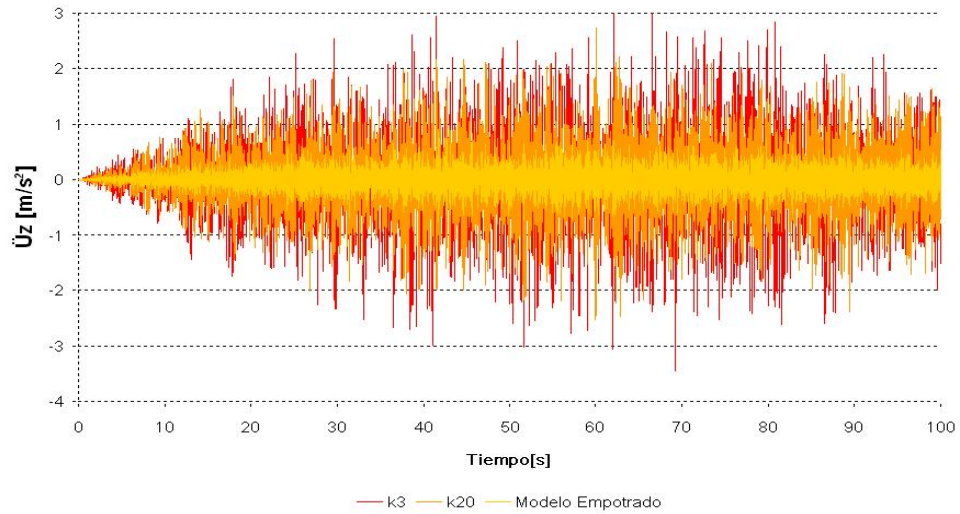


Figura 5.20: Variación de las aceleraciones máximas medidas para diferentes condiciones de apoyo, Nivel +23.60, Dirección Z.

Al variar los tipos de suelo de fundación se observa el efecto de amplificación que provoca sobre las aceleraciones en la estructura, siendo la condición de roca la que presenta menores efectos de amplificación. Estos aspectos se deben tener en consideración para efectos de diseño y de selección de sitio, debido a que se deben analizar los diferentes casos dentro de una misma zona.

Capítulo 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES FINALES

6.1. Estructuración, Modelación y Análisis

Las etapas desarrolladas a lo largo del trabajo permitieron dar una noción acerca de muchos aspectos relacionados con el diseño de reactores nucleares. El proceso de estructuración logró representar los elementos resistentes principales presentes en una estructura de tipo nuclear, como las que albergan los reactores nucleares de potencia. Para lograr una correcta estructuración es de gran importancia conocer la finalidad que tendrá la estructura, pues esto se relaciona con los tipos de cargas a los cuales se verá sometida y los estándares de seguridad que es propicio considerar, tomando en cuenta las condiciones del suelo y la naturaleza de la sismicidad del sitio en el cual se emplaza. Esto último es de especial importancia en el diseño de un reactor nuclear debido a los grandes riesgos implicados. A modo de resumen se puede afirmar que a pesar de ser una estructura de grandes dimensiones y sometida a diversos estados de carga, los elementos estructurales que pueden ser utilizados para el diseño de un reactor nuclear de potencia en Chile, son sistemas de cargas convencionales compuestos de muros y losas de hormigón armado. Se concluye, además, que el modelo junto con otros parámetros estructurales, como la determinación de la demanda sísmica y las condiciones de apoyo, juegan un rol muy importante en la evaluación de la respuesta sísmica de la estructura, sistemas y componentes.

Se identificaron dos parámetros de importancia en la variación de la respuesta sísmica, éstos son la demanda sísmica y las condiciones de resistencia del suelo en el cual se funda la estructura. El análisis de sensibilidad con respecto a estos parámetros, entrega como resultado efectos de variación de la respuesta estructural, reflejadas en especial, en las aceleraciones. Vale la pena mencionar que se debe considerar los posibles efectos locales que de alguna manera pudiesen provocar amplificaciones de las variables relacionadas con la respuesta de la estructura, como son las tensiones, aceleraciones y deformaciones.

Por último, cabe notar que el proceso de análisis es extremadamente complejo ya que involucra una

gran cantidad de expertos en diversas áreas con el objeto de determinar las demandas a las que estará sometida la estructura. Esto se relaciona con las combinaciones de carga que se deben considerar como mínimo para el diseño. En consecuencia, los análisis realizados en el presente trabajo, consideran una pequeña parte de las solicitaciones a las cuales esta estructura debe ser sometida, siendo de interés analizar otras potenciales solicitaciones en futuros estudios.

6.2. Recomendaciones para Chile

Los análisis para diferentes zonas sísmicas del país indican que la disminución de la demanda sísmica conlleva una disminución de los esfuerzos en la estructura. Sin embargo, la determinación del emplazamiento de un reactor en el país no solamente se ve determinado por el nivel de la respuesta estructural. Hay otros factores que tienen gran relevancia en la ubicación del reactor, como son la demanda eléctrica, la distribución de la población, las condiciones hídricas de la zona, entre otras^[1]. Es necesario realizar una evaluación detallada de las condiciones de cada zona y un análisis para cada una de ellas a modo de determinar la mejor zona para la instalación de una central de variados puntos de vista y condiciones.

En el modelo analizado se considera una condición de apoyo empotrada. Sería interesante también analizar la variación de la respuesta para cada zona sísmica considerando diferentes tipos de suelo, para poder así determinar ubicaciones más favorables dentro de una misma zona sísmica.

El tiempo ha demostrado, en lo que respecta a estas estructuras, que las principales fallas son debidas a fallas de operación, es decir, los diseños han logrado sortear los eventos naturales. Los hechos lamentables en las instalaciones de esta índole, han sido en la mayor parte de las ocasiones producidos por operación indebida o por mal uso de la tecnología. Por ello, ante un eventual uso de esta tecnología para la generación de electricidad en Chile, el personal de operación constituye un factor crítico que debería formarse con anticipación.

Las estructuras de tipo nuclear, sean éstas reactores, vasijas de reacción y todos los componentes que están involucrados en los aspectos de diseño, son diseñados con un alto grado de seguridad debido a que su falla, aunque, sea leve, produce un gran riesgo a las personas no sólo que trabajan en las instalaciones sino también a terceros, es por eso que su seguridad es lo fundamental y no su costo.

6.3. General

Se lograron los objetivos generales y específicos que motivaron el estudio, analizando con éxito, mediante el método de los elementos finitos, la respuesta de una estructura ante eventos sísmicos. Se tomó en cuenta los estándares de seguridad que se encuentran en diversas normativas internacionales y chilenas, además de la demanda sísmica presente en nuestro país. El principal aporte que

^[1]Ver estudio anexo.

entrega el trabajo es presentar la metodología utilizada en cada etapa del análisis sísmico de este tipo de estructuras.

Se puede concluir que los requerimientos del diseño sísmico para las centrales nucleares son mas exigentes en comparación con los requerimientos de las estructuras convencionales. El diseño de estructuras, sistemas y componentes de las plantas nucleares necesita ser calificado para los requerimientos de operación contra los efectos de numerosos eventos naturales los cuales son catalogados de manera conservativa, entre los cuales los sismos son de gran importancia.

Las estructuras del reactor y el edificio de contención resisten las solicitaciones de diseño de las normas chilenas sometiendo a tensiones dentro de los límites establecidos a los elementos estructurales, los valores para las frecuencias y desplazamientos están dentro de los resultados de análisis internacionales para este tipo de estructuras. Estos resultados nos permiten afirmar, de manera preliminar, que pese a que Chile califica como uno de los países de mayor sismicidad en el mundo, este hecho no es impedimento para la realización de proyectos de centrales nucleares de potencia en el territorio nacional, debido a que se garantiza una resistencia mínima ante tales eventos.

ANEXO

A. ESTUDIOS DE EMPLAZAMIENTO EN CHILE

BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1976. *Regulatory Guide*. Regulatory Guide 1.92, Revision 1.1976.
- [2] Comisión Nacional de Energía(CNE). 1983. *Desarrollo de tecnologías Nucleares básicas previo a un programa de centrales nucleares en Chile*.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA). 2003. *Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants (Safety Guide)*. Safety Standards Series No. NS G-3.3. Fecha de publicación: 21 de Marzo, 2003.
- [4] Dames and Moore. 1979. *Estudio de Selección de Sitios para emplazamiento de una central nucleoelectrónica*. Comisión Chilena de Energía Nuclear.
- [5] Organismo Internacional de Energía Atómica(OIEA) . 1988. *Código sobre la Seguridad de las Centrales Nucleares: Emplazamiento*. Colección de Seguridad N° 50-C-S (1988).
- [6] Comisión Chilena de Energía Nuclear. 1975. *Bases para ofertar, Estudio sobre selección de sitios de emplazamiento de una central de potencia*.
- [7] José Luis Santa María. 1978. *Informe de evaluación técnica sobre las propuestas recibidas al Estudio sobre selección de sitios de emplazamiento de una central de potencia*. Comisión Chilena de Energía Nuclear.
- [8] Comisión Chilena de Energía Nuclear. 1978. *Reglamento de Seguridad en emplazamiento de centrales nucleares de potencia*.
- [9] The American Society of Mechanical Engineers (ASME). *Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components*. 1998. ASME Boiler and Pressure of Vessel Code, Section III, Division 2. 1998.
- [10] Bath, K. J. 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall, 1982.
- [11] Henriquez Zamora, Carlos. 2000. *Incorporación de potencia nuclear al sistema interconectado central*. Bca. Central, Colección Tesis. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile.
- [12] Instituto Nacional de Normalización (INN). 1985. *NCh170.Of85 Hormigón - Requisitos Generales*. Norma Chilena Oficial, Chile.

- [13] Instituto Nacional de Normalización (INN). *NCh433.Of96 Diseño Sísmico de Edificios*. Norma Chilena Oficial, Chile.
- [14] Instituto Nacional de Normalización (INN). *NCh2369.Of2003 Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Norma Chilena Oficial, Chile.
- [15] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plant (Safety Guide)*. 2003. IAEA, Safety Series No. NS-G-1.6. Fecha de publicación: 20 de Noviembre, 2003.
- [16] International Atomic Energy Agency (IAEA). 1986. *Safety Aspects of Foundations of Nuclear Power Plants*. IAEA, Safety Series No. 50-SG-S8. Fecha de Publicación: 20 de Noviembre, 1986.
- [17] Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). *Código sobre la Seguridad de las Centrales Nucleares: Diseño*. Colección de Seguridad 50-SG-D. 1989.
- [18] Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). *Principios Generales de Diseño para la seguridad en Centrales Nucleares*. Colección de Seguridad 50-SG-S1. 1994.
- [19] Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). 1994. *Terremotos y cuestiones conexas en relación al emplazamiento de Centrales Nucleares*. Colección Seguridad 50-SG-S1. 1994.
- [20] Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). 1986. *Diseño del Sistema de Contención de los Reactores de Centrales Nucleares*. Colección de Seguridad 50-SG-D12. 1986.
- [21] Oñate, Eugenio. 1992. *Cálculo de Estructuras por el método de elementos finitos*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 1992.
- [22] Sepúlveda Soza, Cristian. 1999. *Análisis Sísmico del Reactor Nuclear de Lo Aguirre*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1999.
- [23] Zienkiewicz, O. C. 1980. *El Método de los Elementos Finitos*. Editorial Reverté, Barcelona.