

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
ZACATENCO**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

***ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA DE LA  
CONTENCIÓN PRIMARIA DE UN  
REACTOR NUCLEAR TIPO BWR***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS  
CON ESPECIALIDAD EN  
INGENIERÍA MECÁNICA.**

**P R E S E N T A:**  
**ING. FABIAN LEONOV SANTOYO LÓPEZ**

**DIRIGIDA POR: DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ**



**MÉXICO D.F.**

**2010**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 12:00 horas del día 14 del mes de Junio del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis de titulada:

**“ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA DE LA CONTENCIÓN PRIMARIA DE UN REACTOR NUCLEAR TIPO BWR”.**

Presentada por el alumno:

**SANTOYO**  
Apellido paterno

**LÓPEZ**  
Apellido materno

**FABIÁN LEONOV**  
Nombre(s)

Con registro: 

A	0	8	0	5	5	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECÁNICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de tesis

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Presidente

DR. JUAN ALFONSO BELTRÁN FERNÁNDEZ

Segundo Vocal

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA CALDERÓN

Tercer Vocal

DR. JUAN ALFONSO BELTRÁN FERNÁNDEZ

Secretario

M. EN C. ALEJANDRO ESCAMILLA NAVARRO

DR. CARLOS TORRES TORRES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCIA





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

## CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal el día 23 de Abril del año 2010, el que suscribe **Ing. Fabian Leonov Santoyo López**, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica opción Diseño Mecánico con número de registro **A080552**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. Luis Héctor Hernández Gómez** y cede los derechos del trabajo titulado "**Análisis de Respuesta Sísmica de la Contención Primaria de un Reactor Nuclear tipo BWR**", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico: [salofale@hotmail.com](mailto:salofale@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo en los trabajos realizados.

Ing. Fabian Leonov Santoyo López

## RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para hacer la evaluación del comportamiento dinámico-estructural de la contención primaria de un reactor nuclear del tipo BWR-5 (*Boiling Water Reactor*) sujeto a la acción de un sismo, utilizando el método del elemento finito, Este estudio está enfocado a considerar los sitios más críticos de la estructura bajo estas sollicitaciones dinámicas. La contención está constituida de paredes de concreto de 1.5 metros de espesor, y en el interior está cubierta por placas de acero firmemente soldadas entre sí de 9.525 mm de espesor, asimismo la función primordial de la contención del reactor es la de prevenir que las radiaciones escapen del interior del reactor.

Un aspecto fundamental es realizar un estudio de la integridad mecánica de la contención del reactor para satisfacer los requerimientos de niveles de seguridad. Por lo tanto, el problema consiste en evaluar las condiciones más críticas a ciertos valores de aceleración de la base de la contención para así simular la acción de un sismo y determinar si en algún momento dado se tendrán problemas estructurales de la misma.

Se deja en claro que el problema en cuestión es un análisis estructural del tipo dinámico, se hará énfasis en las ecuaciones de movimiento que determinan este caso de estudio, donde se involucra la segunda ley de Newton para trabajar las fuerzas de inercia que se generan por esta excitación externa de la base (sismo), cuestiones de amortiguamiento, rigidez, la masa y propiamente la forma de la estructura.

En el estudio se considerará, la geometría, fuerzas, y demás condiciones a las que estará sujeta la contención del reactor. Así mismo se excitara la estructura a distintas aceleraciones en su base y también se hará el cálculo de las frecuencia naturales del dominio de estudio.

Los resultados obtenidos se presentan en el último capítulo de esta tesis, en la cual describiremos las zonas más críticas del contenedor, en el primer caso se obtienen los máximos desplazamientos de la estructura a las frecuencias naturales, esto con un análisis de valores y vectores propios, para el segundo caso se hace un análisis de espectros y los resultados obtenidos son los esfuerzos máximos principales a los que se sujetara la estructura, Haciendo uso de imágenes de resultados de las corridas generadas en nuestro trabajo numérico, esto a su vez nos da otro aspecto que posiblemente se estudie en un futuro, que son la detección de grietas debido a estos movimientos de la estructura y delimitando esas zonas a causa de los resultados obtenidos en este trabajo como causa de concentradores de esfuerzos.

## **ABSTRACT**

In this work a methodology has been developed to evaluate the dynamic structural behavior on the primary contention of a nuclear power reactor (BWR) subjected to seismic loads, using the method of the finite element. The analysis, it is focused specifically to the mark II reinforced concrete structure. The building of the primary containment is constituted of walls of concrete of 1.5 meters of thickness. Besides, it is reinforced with steel liner which is 9.525 mm thick. The main function of the wall is to prevent radiation leak from the inner reactor.

A fundamental aspect is to make a study of the mechanical integrity of the containment of the reactor to satisfy the requirements with security levels. Therefore, the problem consists on evaluating the conditions more critics to certain values of acceleration of the base of the containment, thus simulating the action of an earthquake.

In the study it will be considered, geometry, forces, and other conditions to which the containment of the reactor will be subject. The structure it was excited to different accelerations in its base and also natural frequencies it will be calculated.

The obtained results it will describe the zones more critics in the containment building, in the first case obtain the maximum displacements of the structure of the natural frequencies; in the second case, an analysis of spectrum response using modal-spectral method, for obtain the maximum normal stresses with external loads.

## **ÍNDICE**

	<b>PAGINA</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<i>iv</i>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>Xi</b>
<b>OBJETIVO</b> .....	<b>xiii</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xv</b>

### ***CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE PLANTAS NUCLEARES***

	<b>PAGINA</b>
<b>1.1 Antecedentes</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Conceptos Generales Acerca de Sismicidad</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Medición de terremotos.....	<b>3</b>
1.2.2 Escalas de medición sísmicas.....	<b>3</b>
1.2.2.1 Escala de Richter.....	<b>3</b>
1.2.2.2 Escala de Mercalli.....	<b>4</b>
1.2.3 Sismicidad de México.....	<b>5</b>
1.2.4 Regionalización Sísmica.....	<b>8</b>
1.2.5 Capacidad de Predicción.....	<b>9</b>
<b>1.3 Seguridad Sísmica en Plantas Nucleares</b> .....	<b>10</b>
1.3.1 Generalidades.....	<b>10</b>
1.3.2 Categorización Sísmica por Estructuras en plantas nucleares.....	<b>11</b>
1.3.2.1 Categorización.....	<b>11</b>
1.3.2.2 Lista de Elementos para Categorías Sísmica.....	<b>12</b>
1.3.3 Principales características de Seguridad en Reactores Nucleares.....	<b>12</b>
1.3.3.1 Sistemas y Componentes del Reactor y su Relación con la Seguridad.....	<b>12</b>
1.3.3.2 Edificio de Contención del Reactor Nuclear.....	<b>13</b>
<b>1.4 Diseño Sísmico de Plantas Nucleares</b> .....	<b>13</b>
1.4.1 Bases de Diseño para Sismos.....	<b>13</b>
1.4.2 Aceleración máxima del terreno.....	<b>14</b>
<b>1.5 Planteamiento del Problema</b> .....	<b>16</b>

	<b>PAGINA</b>
<b>1.6 Metodología</b> .....	17
<b>1.7 Referencias</b> .....	18
 <b><i>CAPÍTULO II: CONCEPTOS GENERALES EN EL ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS</i></b> 	
<b>2.1 Generalidades</b> .....	20
2.1.1 Análisis en estructuras.....	21
<b>2.2 Conceptos Fundamentales Sobre Dinámica Estructural</b> .....	21
2.2.1 Generalidades.....	21
2.2.2 Respuesta Estructural.....	22
2.2.3 Valor Máximo de la Respuesta.....	23
2.2.4 Limitaciones.....	23
2.2.5 Grado de Libertad.....	23
<b>2.3 Análisis Dinámico de Estructuras Simples</b> .....	24
2.3.1 Estructuras Simples.....	24
2.3.2 Relación Fuerza Desplazamiento.....	25
2.3.3 Sistemas Linealmente Elásticos.....	26
2.3.4 Fuerza de Amortiguamiento.....	28
2.3.5 Descripción y Ecuación de Equilibrio Dinámico en Sistemas Lineales de un Grado de Libertad.....	30
<b>2.4 Respuesta a Movimiento del Terreno</b> .....	33
2.4.1 Generalidades.....	33
<b>2.5 Ecuación de Movimiento</b> .....	33
2.5.1 Excitación por Sismo. ....	33
2.5.2 Respuesta Sísmica en un Sistema Lineal: Excitación Sísmica.....	37
<b>2.6 Sumario</b> .....	37
<b>2.7 Referencias</b> .....	38

## ***CAPITULO III: ANÁLISIS SÍSMICO DE LA CONTENCIÓN PRIMARIA DE UN REACTOR NUCLEAR***

	<b>PAGINA</b>
<b>3.1 Análisis Sísmico Dinámico</b> .....	40
3.1.1 Concepto de Espectro de Respuesta. ....	41
3.1.2 Espectro Combinado Desplazamiento – Velocidad – Aceleración (D-V-A).....	42
<b>3.2 Análisis Numérico Modal</b> .....	45
3.2.1 Modo natural de Vibración.....	45
3.2.2 Resonancia.....	46
3.2.3 Usos del Análisis Modal.....	46
3.2.4 Procedimiento para Generar el Análisis Numérico.....	47
3.2.4.1 Construcción del Modelo.....	47
3.2.4.2 Aplicar las Condiciones de Frontera.....	47
3.2.4.3 Expansión de los Modos.....	47
<b>3.3 Análisis Espectral</b> .....	48
3.3.1 Tipos de Espectros en el Análisis Numérico.....	48
3.3.2 Espectro de Respuesta de un Solo Punto.....	48
3.3.3 Espectro de Respuesta de Multipuntos.....	49
3.3.4 Método de Análisis de Diseño Dinámico.....	49
3.3.5 Procedimiento Para el Análisis Numérico Espectral.....	49
3.3.6 Obtención de la Solución Espectral.....	49
3.3.7 Expansión de los Modos Naturales de Vibración.....	50
3.3.8 Combinación de los Modos Naturales de Vibración.....	50
<b>3.4 Análisis Numérico de la Contención Primaria de un Reactor Nuclear</b> .....	51
3.4.1 Descripción del Modelo Computacional de la Contención del Reactor Nuclear tipo BWR.....	52
3.4.2 Propiedades Mecánicas de la Contención del Reactor.....	55
3.4.3 Consideraciones para el Análisis.....	56
<b>3.5 Procedimiento para la Generación del Análisis Modal Espectral</b> .....	57
3.5.1 Malla de la Contención del Reactor Nuclear.....	57
3.5.2 Condiciones de Frontera de la Contención del Reactor Nuclear.....	58
3.5.3 Espectro de Aceleración en las Condiciones de Frontera.....	59
<b>3.6 Sumario</b> .....	60
<b>3.7 Referencias</b> .....	61

## ***CAPITULO IV.- EVALUACIÓN DE RESULTADOS***

	<b>PAGINA</b>
<b>4.1 Calculo de las Frecuencias Naturales de la Contención del Reactor Tipo BWR.....</b>	63
4.1.1 Resultados de las Frecuencias Naturales.....	63
<b>4.2 Análisis Espectral a la Contención del Reactor Nuclear Tipo BWR.....</b>	65
4.2.1 Análisis de resultados de la Contención del Reactor Nuclear a 0.5g.....	65
<b>4.3 Análisis de Resultados.....</b>	71
<b>4.4 Referencias.....</b>	73
<b>CONCLUSIONES.....</b>	74
<b>RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....</b>	76
<b>ANEXO A.....</b>	77
<b>ANEXO B.....</b>	78
<b>ANEXO C.....</b>	79

**Índice de Figuras**

NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
1.1	Primeras estaciones sísmicas de México	6
1.2	Sismicidad de México entre 1964 y 1995, con Magnitud > 4.5	6
1.3	Los grandes sismos del siglo (M > 6.5 escala de Richter)	7
1.4	Zonas de ruptura de los grandes sismos del siglo XX	8
1.5	Regiones Sísmicas de México	9
2.1	Diferentes tipos de vibraciones	22
2.2	a) Péndulo invertido, b) Vibración libre debido a un movimiento	25
2.3	Representación de la relación fuerza-desplazamiento	26
2.4	a) Estructura con rigidez finita, b) Estructura con rigidez infinita, c) Estructura sin rigidez	27
2.5	a) Amortiguamiento viscoso, b) Fuerza externa, c) Relación entre $f_D$ y $u$	29
2.6	Sistema simple con amortiguamiento viscoso	30
2.7	Vibraciones libres del sistema de la figura 2.6	32
2.8	a) Comportamiento de una estructura idealizada sujeta a una carga $p(t)$ ; b) Fuerza actuando en la masa en un instante de tiempo; c) diagrama de cuerpo libre en tiempo $t$ .	33
2.9	Desplazamiento relativo entre una masa y el suelo.	34
2.10	Fuerza sísmica efectiva: movimiento horizontal del suelo.	35
2.11	Fuerza sísmica efectiva: movimiento rotatorio del suelo.	36
3.1	Métodos de análisis dinámico	40
3.2	Espectro de respuesta ( $\zeta = 0.02$ ) del sismo en "El centro": (a) Espectro de respuesta a la deformación; (b) Espectro de respuesta a la velocidad; (c) espectro de respuesta a la aceleración	43
3.3	Espectro de respuesta combinado $D - V - A$ ; $\zeta = 2\%$	44
3.4	a) Espectro de respuesta en un solo punto, b) espectro de respuesta de multipuntos	48
3.5	Estructura de Concreto	53
3.6	Estructura del Liner	55
3.7	Contención del Reactor Nuclear	55
3.8	Generación de la Malla de Elemento Finito de la Contención del Reactor Nuclear	58
3.9	Condiciones de Frontera de la Contención del Reactor Nuclear (Empotre Total)	59
3.10	Espectro de aceleración de la Contención del Reactor	59

NÚMERO	TÍTULO	PAGINA
3.11	Espectro de aceleración de la Contención del Reactor para una dirección	60
4.1	Modo 1> 7.17900 Hz	64
4.2	Modo 2> 7.18000 Hz	64
4.3	Modo 3> 12.3720 Hz	65
4.4	Modo 4> 12.3723 Hz	65
4.5	Modo 5> 17.6840 Hz	65
4.6	Eje coordinado	66
4.7	Excitación de la estructura con 0.5g 19 Mpa Excitación en "X"	67
4.8	Excitación de la estructura con 0.5g 1.14 Mpa Excitación en "Y"	67
4.9	Excitación de la estructura con 0.5g 18.19 Mpa Excitación en "Z"	68
4.10	Excitación de la estructura con 0.4g 17.0 Mpa Excitación en "X"	68
4.11	Excitación de la estructura con 0.4g 0.9968 Mpa Excitación en "Y"	69
4.12	Excitación de la estructura con 0.4g 16.27 Mpa Excitación en "Z"	69
4.13	Excitación de la estructura con 0.3g 14.72 Mpa Excitación en "X"	70
4.14	Excitación de la estructura con 0.3g 0.863 Mpa Excitación en "Y"	70
4.15	Excitación de la estructura con 0.3g 14.0 Mpa Excitación en "Z"	71
4.16	Rigidez afectada por la altura	72

### **Índice de Tablas**

<b>FIGURA</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PAGINA</b>
1.1	Escala Mercalli de Intensidades Sísmicas	5
1.2	Criterios para la selección de los sismos de diseño (aceleración máxima de la componente horizontal).	15
1.3	Zonas de peligro sísmico y sus aceleraciones máximas	15
3.1	Propiedades Mecánicas del Liner para el Analisis Numérico	56
3.2	Propiedades Mecánicas de la Estructura de Concreto empleadas para el Análisis Numérico	56
4.1	Frecuencias Naturales de la Contención del Reactor Nuclear tipo BWR	63
4.2	Desplazamientos de la Contención del Reactor Nuclear que pertenecen a cada Frecuencia Natural	64
4.3	Esfuerzos normales principales para 0.5g	71
4.4	Esfuerzos normales principales para 0.4g	71
4.5	Esfuerzos normales principales para 0.3g	72

### OBJETIVO:

En el presente trabajo, se evalúan los niveles de seguridad disponibles en la contención primaria de un reactor nuclear de tipo BWR, Se aplica el Método del Elemento Finito al Análisis de Respuesta Sísmica, con este análisis se determinará el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de sollicitaciones de carga dinámicas, específicamente sismos, evitando con esto probables fallas estructurales que pudieran suscitarse debido a un mal diseño mecánico, También de manera numérica, se consideran las cargas dinámicas representadas por espectros de aceleración aplicadas a sus condiciones de frontera en las direcciones X, Y y Z con valores de 0.5g, 0.4g y 0.3g, porcentajes de la aceleración de la gravedad terrestre y asimismo con esto se tiene un mayor conocimiento de los problemas que se pueden presentar bajo estas condiciones dinámicas.

### JUSTIFICACIÓN:

Actualmente, se tiene el interés por parte de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), un organismo que rige y delimita las cuestiones nucleares que se generan en México, acerca de los niveles de seguridad en plantas nucleares. En este caso, este trabajo se enfoca al estudio de la contención primaria del tipo Mark II, en la cual se aloja un reactor nuclear tipo BWR. La función de esta estructura es evitar una fuga radiactiva por lo que, es de vital importancia evaluar su integridad estructural a diversas sollicitaciones de carga. En este caso, se analiza su respuesta a la acción de un sismo, para así calcular su comportamiento a estos movimientos en su base.

Por otro lado, la contención del reactor está construida de un material compuesto (concreto reforzado), Este material se puede encontrar en múltiples construcciones por ejemplo, puentes peatonales, vehiculares, edificios, presas, entre otros. Este material es empleado en la construcción de la contención, por lo que el grado de complejidad es alto, ya que, este contenedor tiene un arreglo helicoidal de varillas como refuerzo dentro del concreto, esta requiere, de un modelado especial en un programa para así después hacer la exportación de la geometría a otro de elementos finitos, por lo que, después de esto, grandes cantidades de tiempo de preproceso y solución se requieren para determinar las frecuencias naturales y los análisis de espectros. Dada la importancia de este elemento estructural, es importante establecer sus niveles de seguridad después de algún sismo. Consecuentemente, Es necesario que estos equipos tengan un alto índice de confiabilidad y disponibilidad. El diseño bajo condiciones estáticas es un trabajo que ya se ha realizado en el pasado, pero en esta ocasión se presenta una sollicitación dinámica, por lo tanto, la acción de un sismo es una cuestión compleja. La herramienta a utilizar en este trabajo es el análisis numérico usando el Método del Elemento Finito.

Cabe destacar que la falla de la contención del reactor puede ocasionar grandes pérdidas económicas y, asimismo, puede atentar contra la vida humana de la gente que labora dentro de estas centrales, así como también gente que viva a los alrededores de las mismas, ocasionando un problema de gran magnitud que se puede ver reflejado en problemas de gran índole nacional e internacional.

Por lo tanto se ha propuesto realizar el análisis antes mencionado, de tal manera que se pueda conocer el comportamiento de la estructura, conociendo así el posible mecanismo de falla que en un momento dado será de gran utilidad para la toma de decisiones.

i

# CAPÍTULO I

## CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE PLANTAS NUCLEARES

*En este capítulo, se presentan los conceptos fundamentales de sismicidad, mencionando también los mapas sísmicos de México y las zonas de ruptura, asimismo se plantean las cuestiones de seguridad sísmica en plantas nucleares y sus acciones de diseño en las mismas, en función de esto, se plantea el caso de estudio y la metodología a seguir en el desarrollo del trabajo.*

### **1.1 Antecedentes [1.1]**

Desde tiempos históricos se tiene conocimiento de terremotos que han ocasionado destrucción en ciudades y poblados de todos los continentes de la tierra. Un elevado porcentaje de los centenares de miles de víctimas cobradas por los sismos, se debe al derrumbe de construcciones hechas por el hombre; el fenómeno sismo se ha ido transformando así en una amenaza de importancia creciente en la medida en que las áreas urbanas han crecido y se han hecho más densas. Las soluciones constructivas más duraderas han sido aquellas capaces de resistir las acciones externas; entre estas, en vastas extensiones de nuestro planeta, deben incluirse las acciones sísmicas.

Hasta hace poco, las soluciones adoptadas para resistir las acciones sísmicas se desarrollaron esencialmente analizando los efectos de los terremotos en las construcciones, sin el apoyo teórico de causas y características de los sismos, ni de información cuantitativa sobre la naturaleza de los movimientos del terreno. Un ejemplo de adaptación progresiva a las sacudidas telúricas, lo constituye las edificaciones de la segunda capital de Guatemala, hoy mejor conocida como Antigua. Algunas de sus edificaciones, monumentos en la actualidad, han resistido con daños moderados, a las acciones de los sismos en una de las zonas más activas de Centro América. Durante varios siglos; las soluciones constructivas, con muros de 4 y 5 m de grosor, bóvedas de 60 cm de espesor, contrafuertes, columnas de esbeltez reducida, etc., fue el resultado de un proceso de prueba y error durante los siglos XVI, XVII y parte del XVIII.

La incorporación y desarrollo de la Resistencia de Materiales en el proyecto de las edificaciones facilitó la predicción cuantitativa del estado de esfuerzos en las construcciones. De igual modo, la aplicación de procedimientos de análisis y la incorporación del acero en la construcción, incrementaron sensiblemente la seguridad en las edificaciones. A mediados del siglo pasado, los problemas específicos de la Ingeniería Sísmica progresivamente dejan de ser resueltos en base a observaciones y comienza a desarrollarse una disciplina fundamentada sobre bases científicas, con un cuerpo organizado de conocimientos, programas de investigación para entender ciertos problemas no resueltos y una fértil interacción entre ciencias básicas de un lado (geofísica, sismología), y la experiencia de ingenieros proyectistas y constructores por el otro.

### **1.2 Conceptos Generales Acerca de Sismicidad**

Los terremotos causan en el mundo anualmente miles de pérdidas humanas y lesionados, afectan la economía de los territorios donde ocurren a un costo de millones de pesos, impactando de forma negativa el medio ambiente y el desarrollo sostenible de las comunidades, sobre todo cuando estas son vulnerables, Se estima que varios millones de terremotos se producen en el mundo cada año. Muchos no se detectan debido a que ocurren en zonas bastante remotas o son de baja magnitud. En la actualidad se encuentran y localizan cerca de 50 terremotos cada día, lo que es cerca de alrededor de 20.000 sismos en un año. A medida que más y mejores sismógrafos son instalados alrededor del mundo, más terremotos han sido localizados y medidos, sin embargo, el número de grandes terremotos (de magnitud 6,0 grados en la escala de Richter o superior) se ha mantenido relativamente constante. [1.1]. Los sismos, temblores o terremotos son fenómenos geológicos que ocurren repentinamente, producto de la liberación súbita de la energía acumulada en una zona del interior de la tierra.

La sismología es una ciencia que estudia los terremotos. Implica la observación de las vibraciones naturales del terreno y de las señales sísmicas generadas de forma artificial, con muchas ramificaciones teóricas y prácticas. Como rama de la geofísica, la sismología ha aportado contribuciones esenciales a la comprensión de la tectónica de placas, la estructura del interior de la Tierra, la predicción de terremotos y es una técnica valiosa en la búsqueda de minerales.

### **1.2.1 Medición de Terremotos**

Se realiza a través de un instrumento llamado sismógrafo, el que registra en un papel la vibración de la Tierra producida por el sismo (sismograma). Informa sobre la magnitud y la duración. Este instrumento registra dos tipos de ondas: las superficiales, que viajan a través de la superficie terrestre y que producen la mayor vibración de ésta (y probablemente el mayor daño) y las centrales o corporales, que viajan a través de la Tierra desde su profundidad.

Las ondas centrales a su vez son de dos tipos: las ondas primarias ("P") o compresivas y las ondas secundarias ("S") o cortantes. Lo interesante de estas ondas es que las "P" viajan a través del magma (zona de rocas fundidas) y llegan primero a la superficie ya que logran una mayor velocidad y van excitando pequeñas partículas de material delante de ellas y arrastrando otro tanto detrás. Las ondas "S" en cambio, por ir más lentas, van desplazando material en ángulo recto a ellas (por ello se les denomina también "transversales").

La secuencia típica de un terremoto es: primero el arribo de un ruido sordo causado por las ondas ("P") compresivas, luego las ondas ("S") cortantes y finalmente el "retumbar" de la tierra causado por las ondas superficiales.

En el pasado, los sismogramas eran registrados en tambores de papel rotativos. Algunos usaban carretes en papel común, y otros utilizaban papel fotosensible expuesto a rayos de luz. Actualmente, prácticamente todos los sismógrafos registran la información de forma digital, de modo de hacer un análisis automático más fácilmente. Algunos sismógrafos de tambor aún son utilizados.

### **1.2.2 Escalas de Medición Sísmica**

#### **1.2.2.1 Escala de Richter**

La escala sismológica de Richter, nombrada así en honor a Charles Richter (1900-1985), sismólogo nacido en Hamilton, Ohio, Estados Unidos. También conocida por su nombre más adecuado como escala de magnitud local ( $M_L$ ), es una escala logarítmica arbitraria, que asigna un número para cuantificar el tamaño de un terremoto.

Richter desarrolló su escala en la década de 1930. Calculó que la magnitud de un terremoto o sismo puede ser medida conociendo el tiempo transcurrido entre la aparición de las ondas P y las ondas S, y la amplitud de éstas. Las primeras hacen vibrar el medio en la misma dirección que la del desplazamiento de la onda, son ondas de compresión y dilatación. De velocidad de propagación muy rápida -de 5 a 11 km/s, Son las primeras en aparecer en un sismograma. A continuación llegan las ondas S, ondas de cizalla, que hacen vibrar el medio en sentido

perpendicular a la dirección de su desplazamiento. Con base en estos hechos, Richter desarrolló la siguiente ecuación:

$$M = \log_{10} A(mm) + 3 \log_{10}(8\Delta t(s)) - 2.92 \quad (a)$$

donde  $A$  es la amplitud de las ondas  $S$  en milímetros, medida directamente en el sismograma, y  $\Delta t$  el tiempo en segundos desde el inicio de las ondas  $P$  al de las ondas  $S$ , asignando una magnitud arbitraria pero constante a terremotos que liberan la misma cantidad de energía. El uso del logaritmo en la escala es para reflejar la energía que se desprende en un terremoto. El logaritmo incorporado a la escala hace que los valores asignados a cada nivel aumenten de forma exponencial, y no de forma lineal.

La escala de Richter es utilizada para evaluar y comparar la intensidad de los sismos. Esta mide la energía del terremoto en el hipocentro o foco y sigue una escala de intensidades que aumenta exponencialmente de un valor al siguiente.

### 1.2.2.2 Escala de Mercalli

La Escala de Mercalli tiene 12 puntos desarrollados para evaluar la intensidad de los terremotos a través de los daños causados a distintas estructuras. Debe su nombre al físico italiano Giuseppe Mercalli

Los niveles bajos de la escala están asociados por la forma en que las personas sienten el temblor, mientras que los grados más altos se relacionan con el daño estructural observado.

Grado	Descripción
<b>I. Muy débil</b>	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
<b>II. Débil</b>	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
<b>III. Leve</b>	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
<b>IV. Moderado</b>	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
<b>V. Fuerte</b>	La mayoría de las personas lo percibe aun en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y pueden llegar a derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
<b>VI. Bastante Fuerte</b>	Lo perciben todas las personas. Se siente <u>inseguridad</u> para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se hace visible el movimiento de los <u>árboles</u> , o bien, se les oye crujir.
<b>VII. Muy</b>	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse

<b>fuerte</b>	en pie. Se producen daños de consideración en estructuras mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen trozos de mampostería, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos.
<b>VIII. Destructivo</b>	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y, aún, el derrumbe parcial en estructuras bien construidas. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
<b>IX. Ruinoso</b>	Pánico generalizado. Todos los edificios sufren grandes daños. Las casas sin cimentación se desplazan. Se quiebran algunas canalizaciones subterráneas, la tierra se fisura.
<b>X. Desastroso</b>	Se destruye gran parte de las estructuras de toda especie. El agua de canales, ríos y lagos sale proyectada a las riberas.
<b>XI. Muy desastroso</b>	Muy pocas estructuras quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las cañerías subterráneas quedan totalmente fuera de servicio.
<b>XII. Catastrófico</b>	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

*Tabla 1.1 Escala Mercalli de Intensidades Sísmicas [1.2]*

### **1.2.3 Sismicidad en México**

El territorio mexicano se encuentra dividido entre cinco placas tectónicas. El movimiento relativo entre estas, ocasiona uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo. Este riesgo llevó al gobierno de Porfirio Díaz a fundar el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el 5 de Septiembre de 1910. La red sísmica operada por el SSN, se consolidó entre los años de 1910 y 1923 (Figura 1.1). En aquel tiempo una de las más avanzadas en el mundo, permitió localizar sismos en todo la república con magnitudes mayores o iguales a 6.0 en escala de Richter. Una magnitud mucho menor a la permitida por la red sísmica mundial en aquel entonces, que podía registrar sismos en cualquier parte del mundo, siempre y cuando su magnitud fuese mayor a 6.8 en escala de Richter.



Figura 1.1 Primeras estaciones sísmicas de México. [1.3]

En la Figura 1.2 se muestran los sismos con magnitudes mayores o iguales a 4.5 en escala de Richter localizados en la República Mexicana entre 1964 y 1995. Los puntos rojos representan sismos superficiales (profundidades menores a 50 Km), mientras que los azules representan sismos con profundidades mayores a 50 Km.

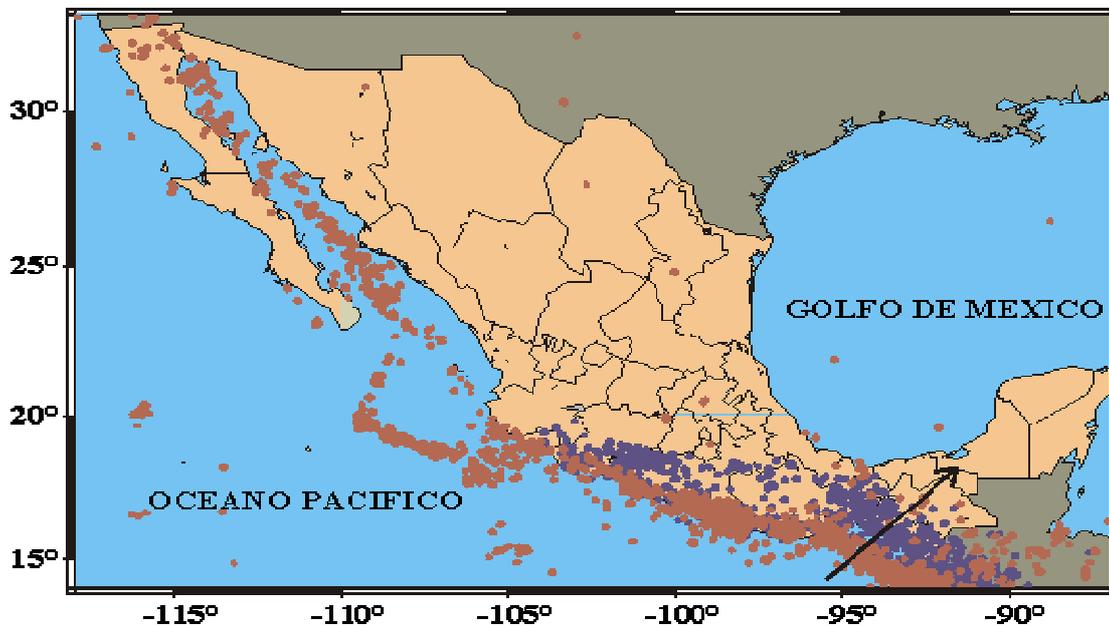
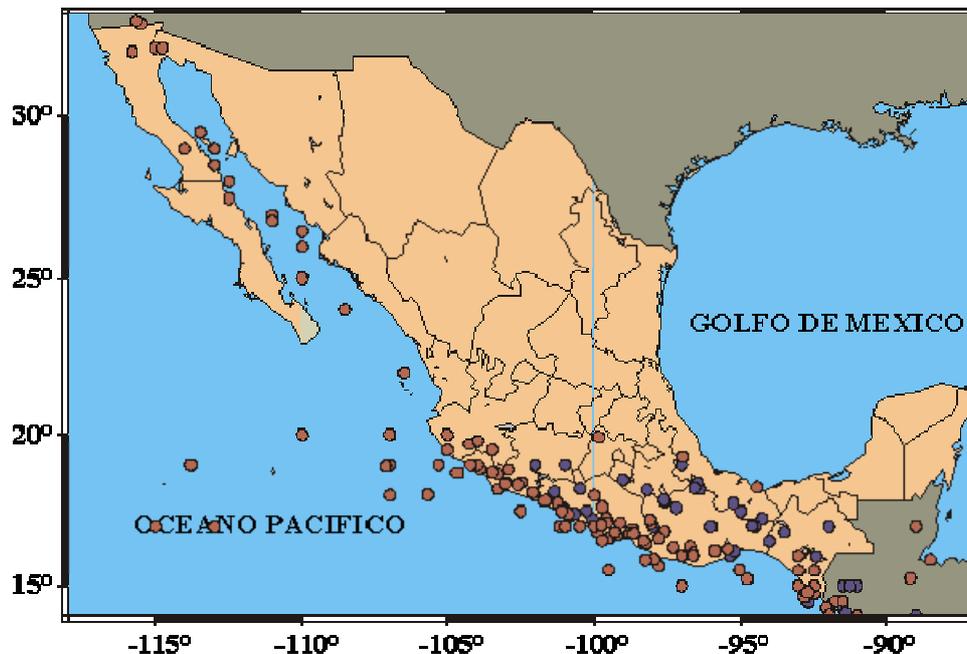


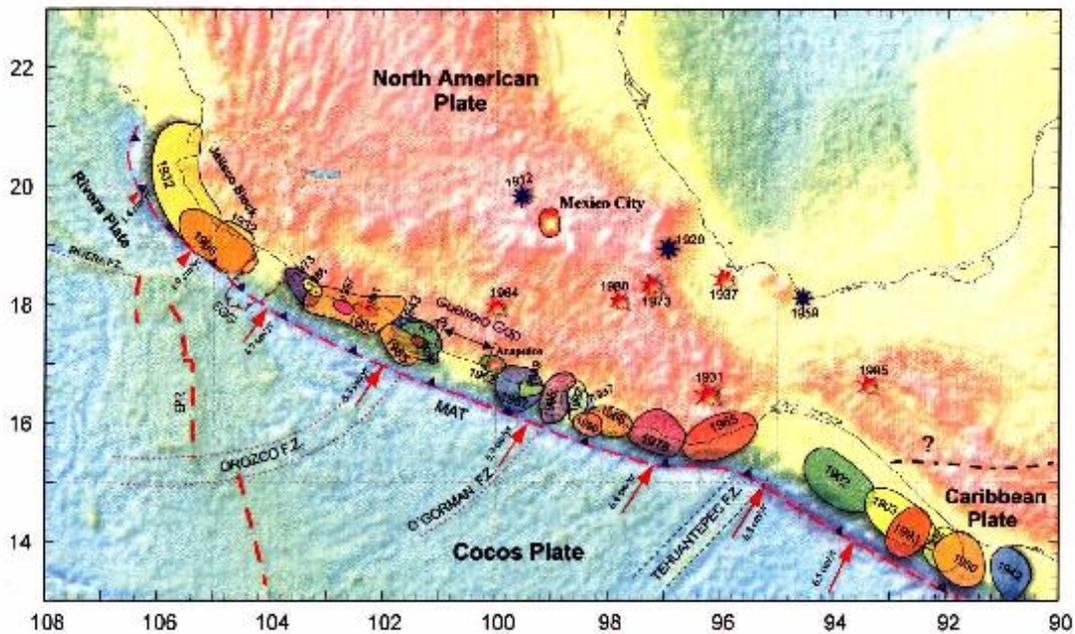
Figura 1.2 Sismicidad de México entre 1964 y 1995, con Magnitud > 4.5 [1.3]

La figura 1.3 muestra que el mayor peligro lo presentan los sismos que ocurren a lo largo de las costas del Pacífico, entre las ciudades de Puerto Vallarta y Tapachula. No solo se producen sismos con mayor frecuencia, sino también los mayores sismos registrados en México tienen su ocurrencia entre estas dos poblaciones. Estos sismos, que por su cercanía a las costas representan un grave peligro a las poblaciones costeras, también afectan al Valle de México, como se ha constatado durante los grandes sismos de 1911, 1957, 1979 y 1985.



**Figura 1.3 Los grandes sismos del siglo ( $M > 6.5$  escala de Richter). [1.3]**

La Figura 1.4 muestra las zonas de ruptura de algunos de los sismos más significativos que han ocurrido durante el siglo anterior. Estos se localizan frente a las costas del Océano Pacífico y son producto de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental. Los eventos ocurren a lo largo de la falla o interface entre dichas placas denominada Fosa Mesoamericana. La falla se extiende desde Puerto Vallarta en Jalisco, hasta el sur de Costa Rica en Centroamérica. Las zonas de ruptura de los grandes sismos llegan a alcanzar hasta 200 km como en el caso del mayor registrado por instrumentos durante el siglo XX, el de 1932 frente a las costas de Jalisco. Otras más de apreciables magnitudes son los sismos de Michoacán de 1985 y el de Oaxaca de 1965. La mayor parte de esta zona de falla se ha roto por un gran sismo. Se notan varias brechas en la figura, dos pequeños segmentos, uno frente a las costas de Colima-Michoacán, y otro frente al istmo de Tehuantepec, de los cuales no se tiene información histórica de la ocurrencia de un gran sismo en el pasado. Es posible que estas zonas sean asísmicas, esto es, la energía elástica acumulada no se libera a través de grandes sismos. El otro segmento importante que se enfatiza en la figura es la brecha de Guerrero. En este segmento, se tiene conocimiento de sismos ocurridos en el pasado, entre 1909 y 1911, se produjeron varios eventos con magnitudes mayores a 7.5 grados en la escala de Richter, que pudieron haber fracturado este segmento de la falla. Sin embargo la escasa información con que se cuenta, no permite definir las zonas de ruptura de este segmento.



**Figura 1.4 Zonas de ruptura de los grandes sismos del siglo XX [1.3]**

Este tipo de estudios permite definir las zonas liberadas de energía elástica, las regiones de mayor peligro sísmico, y la ubicación de los sismos que con mayor probabilidad ocurrirán en un futuro.

Otro peligro para las grandes ciudades asentadas a lo largo de la faja volcánica son los sismos que ocurren a profundidades mayores a 50 Km. Estos sismos se localizan en las placas oceánicas que subducen bajo el continente. La Figura 1.4 muestra con estrellas rojas los sismos más significativos que han ocurrido en ciertas regiones de México. Los grandes sismos a estas profundidades han provocado en el pasado daños a las ciudades de Morelia y México (1858), Oaxaca (1931), y Orizaba (1973).

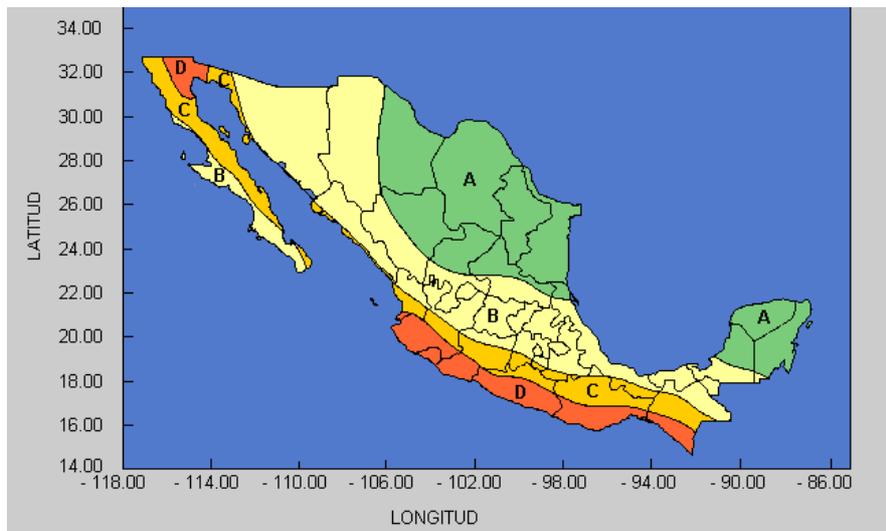
Se muestra de igual manera, en la Figura 1.4, los sismos importantes que han ocurrido durante el siglo XX, dentro del continente y a profundidades someras, se ve con estrellas azules. La magnitud de estos sismos rara vez llega a sobrepasar la magnitud de 7.0 grados en escala de Richter, y su ocurrencia es mucho más esporádica que los sismos de la costa. Sin embargo, debido a lo superficial de la fuente y la cercanía de las grandes poblaciones, estos sismos representan uno de los mayores peligros de México.

### **1.2.4 Regionalización Sísmica**

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas como se muestra en la figura 1.5. Para realizar esta división, se utilizaron catálogos de sismos registrados en la República Mexicana desde inicios de siglo pasado, se consideraron los grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos. Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo.

En la zona A no se tienen registros históricos de sismos, No se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. Alternativamente, en la zona D se han reportado grandes sismos históricos, su ocurrencia es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Las otras dos zonas (B y C) son intermedias, Se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. Aunque la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, pueden esperarse altas aceleraciones. **[1.3]**



**Figura 1.5 Regiones Sísmicas de México [1.3]**

### 1.2.5 Capacidad de Predicción

La idea prevalente sobre el vocablo predicción es el de un pronunciamiento determinístico sobre un evento futuro de naturaleza no determinística tal como la magnitud, sitio, día y hora de un futuro sismo **[1.4]**. Una revisión sobre este aspecto y sus implicaciones de prevención, permite afirmar lo siguiente:

- Para cuestiones de estudio, no se poseen aún, teorías generales en base a las cuales se puedan hacer predicciones confiables sobre futuros sismos. De una manera general, la predicción debe verse como una probabilidad condicional a ser revisada a medida que se produce nueva información. Para ello se requiere como mínimo:
  1. Identificar las áreas en las cuales se considere más probable la ocurrencia de un sismo importante, en un periodo corto;
  2. Seleccionar los parámetros o indicadores que resulten más confiables;
  3. Contar con los medios adecuados para medirlos u observarlos sistemáticamente durante lapsos que suelen ser de varios años.

- La capacidad de hacer una predicción confiable, en el sentido de poder efectuar un anuncio público de un próximo sismo, no permite intervenir con el fin de reducir sustancialmente las pérdidas materiales directas en zonas densamente pobladas. Salvo en casos aislados, la estrategia más eficiente para limitar las pérdidas materiales, es la de proyectar y construir utilizando racionalmente los conocimientos de la Ingeniería Sismorresistente.
- La experiencia demuestra que una vez admitida una predicción, es posible tomar medidas de defensa civil que reduzcan sustancialmente el riesgo de pérdidas de vidas, así como de cierto tipo de pérdidas indirectas.

Como puede observarse, la principal preocupación de la predicción sísmica gira alrededor de poder predecir con la mayor exactitud la ocurrencia de un sismo; y no es para menos, por que grandes asentamientos humanos se desarrollaron sobre zonas sísmicas, por lo cual, es necesario explorar otro tipo de técnicas y herramientas que permitan una mayor confiabilidad en la detección de eventos sísmicos futuros. Sobre todo por las desgracias que ello involucra.

Por lo tanto, un análisis de esta naturaleza, se puede apoyar en una herramienta fundamental, como es la utilización de la Mecánica Fractal, para desarrollar un análisis del historial sísmico de México. Pretendiendo que ello contribuya para tener mejor confiabilidad.[1.5]

A los fines de la Ingeniería Estructural, interesa centrar nuestra atención en la capacidad de pronosticar la respuesta y el desempeño de *Plantas Nucleares* existentes bajo la acción de sismos. Es decir, dada una Planta de Generación Nuclear ubicada en cierto escenario sísmico, evaluar las consecuencias de esa exposición.

### **1.3 Seguridad Sísmica en Plantas Nucleares [1.6]**

#### **1.3.1 Generalidades**

La seguridad nuclear está gobernada por requerimientos estrictamente regulados, considerando conceptos de seguridad establecidos, de esta forma, el estudio de la seguridad sísmica es también parte de un estudio de la seguridad total de una planta nuclear. Los conceptos de seguridad implican la postulación de muchos eventos extraordinarios, como accidentes internos (acciones internas) y externos (acciones externas). Fuego, explosión, fallas de componentes etc. son casos de accidentes internos. **Terremotos**, impacto de aviones, relámpagos, inundaciones y sabotaje son parte de acciones externas. En general, los requisitos de seguridad son legalmente fijos y especificados detalladamente en las pautas nacionales e internacionales. Los operadores están obligados a satisfacer estos requerimientos por medio de contramedidas apropiadas y de verificaciones correspondientes. El funcionamiento de la emergencia y las funciones críticas de seguridad tienen que ser garantizados durante y después de los acontecimientos.

Para este efecto, se hacen recomendaciones para la categorización de estructuras, sistemas y componentes de una *Planta de Potencia Nuclear en términos de su Seguridad*, Esto es para eventos en base a Criterios para un Terremoto.

Un programa de garantía de calidad debe ser establecido y aplicado para cubrir los elementos, servicios y procesos que afectan a la seguridad y se encuentran dentro del ámbito de aplicación. El programa de garantía de calidad debe asegurar la recopilación de datos, procesamiento de datos, estudios, análisis y calificación, validación de código y la verificación, y otras actividades necesarias para cumplir las recomendaciones de esta guía de seguridad que se llevan a cabo correctamente.

### **1.3.2 Categorización Sísmica de Estructuras en Plantas Nucleares**

Los principales efectos que cabe esperar en un sitio, donde se presenta un terremoto, están relacionados con las vibraciones inducidas en la base a través de las estructuras de la planta. Estas pueden afectar las funciones de seguridad de la planta nuclear, directa o indirectamente por mecanismos, tales como la interacción entre los elementos mecánicos, liberación de sustancias peligrosas, incendios o inundaciones provocados el terremoto, y la falta de disponibilidad de las rutas de evacuación o vías de acceso.

Todas las experiencias y eventos de cargas sísmicas y otras que puedan ocurrir en una planta nuclear, no son necesariamente relacionadas a cuestiones de su seguridad, si no es más conveniente asociarlas a una clasificación, que está en base en la demanda de todas las funciones de seguridad requeridas en función a las condiciones de diseño de la misma, Para hacer una orientación para el diseño y alcance de una planta nuclear se pueden agrupar en 3 categorías, en términos de su importancia durante y después de un evento sísmico.

#### **1.3.2.1 Categorización**

La categorización sísmica es el proceso en el que a una planta de potencia nuclear se le asigna una categoría sísmica en acorde con el funcionamiento requerido, antes y después de un sismo, en adición a otras clasificaciones tales como seguridad, calidad y mantenimiento de la misma, El criterio de aceptación está asociado a cada categoría.

De acuerdo en el manual de diseño de obras civiles, sección C. Estructuras, Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad, y en atención a la seguridad estructural se aconsejan tres tipos de grupos: [1.7]

*GRUPO A:* Estructuras en las que se requiere un grado de seguridad alto. Además, cuya falla estructural cause la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas de magnitud excepcionalmente alta. Aquí también se incluyen también todas aquellas estructuras de plantas de generación de energía eléctrica cuya falla por peligro sísmico genere un estado crítico de operación de la misma, así como las estructuras para la transmisión y distribución de energía eléctrica.

*GRUPO B:* Estructuras en las que se requiere un estado de seguridad intermedio que así mismo genere pérdidas de magnitud intermedia o que la falla de una de estas genere un peligro en estas o alguna del grupo A. incluyen todas aquellas estructuras de plantas de generación de energía eléctrica que en caso de fallar por temblor no paralizarían el funcionamiento de la planta.

*GRUPO C:* Estructuras en las que es admisible un grado de seguridad bajo. Donde el fallo estructural ocasionaría pérdidas de magnitud sumamente pequeña y no causaría problemas ni daños a las estructuras de las categorías A y B ni pérdida de vidas.

### **1.3.2.2 Lista de Elementos para Categorías Sísmicas**

Con el fin de especificar la importancia de cada uno de los elementos que se encuentran en una planta de potencia nuclear, y en función de cómo se agrupan, a continuación se muestran los listados.

#### **Grupo A**

- Procesos del Sistema:
  - Sistema Enfriamiento Primario
  - Sistemas de alimentación principal de vapor
  - Sistema de remoción de calor primario
  - Sistemas de barras de control
  
- Sistemas Eléctricos
  - Suministro de poder de emergencia
  
- Instrumentación y sistemas de control
  - Protección del Reactor
  - Sistema de control requerido para paro de seguridad del reactor
  - Cuarto de Control

#### **Grupo B**

- Construcción donde se aloja la turbina
- Pilas de ventilación
- Estructuras de toma de agua de alimentación para refrigeración
- Caminos de acceso

#### **Grupo C**

- Combustible Gastado en el Proceso
- Edificio de Residuos Radiactivos

### **1.3.3 Principales Características de Seguridad en Reactores Nucleares**

#### **1.3.3.1 Sistemas y Componentes del Reactor y su Relación con la Seguridad.**

Todos los componentes y sistemas del reactor contemplan por separado y en su conjunto diversos parámetros directamente relacionados con la seguridad de la planta. Es así como se ha diseñado, construido y montado con los más estrictos estándares de seguridad los siguientes sistemas y componentes fundamentales del reactor:

- Elementos combustibles del reactor
- Núcleo del reactor, donde se alojan los elementos combustibles
- Sistema de regulación de la reactividad y protección

- Sistemas de instrumentación y control
- Sistemas de la instrumentación nuclear
- Instrumentación de procesos
- Sistema de vigilancia del reactor
- Control automático
- Circuitos de refrigeración
- **Edificio de Contención del Reactor**

### **1.3.3.2 Edificio de Contención del Reactor Nuclear**

A continuación se muestran los modos de falla potenciales para contenciones de centrales nucleares y su influencia en el comportamiento de las mismas bajo diferentes escenarios, Se definen 10 que generan estado de daño en las plantas. **[1.8]**

1. Explosión de Vapor
2. Falla de Aislamiento
3. Sobrepresión por Combustión de Hidrógeno
4. Misil Interno causado por la eyección del recipiente de presión al fallar el mismo, solo en aquellas centrales con una cavidad del reactor pequeña
5. Fusión penetrante del Liner de acero, por contacto con material fundido, típicamente en contenciones tipo Mark I.
6. Sobrepresión Cuasiestática
7. Penetración de la Losa de Hormigón
8. By pass de la Contención
9. Calentamiento Directo de la Contención. Generado por la eyección de material del núcleo fundido finamente particulado, al fallar el recipiente de presión en condiciones de alta presión interna. Este material a alta temperatura transfiere mucha energía a la atmosfera de la contención en muy corto tiempo y la presuriza.
10. **Colapso de la estructura a causa de movimientos sísmicos**

Para el presente trabajo, se hará énfasis a las cuestiones sísmicas que provocarían algún daño en el Edificio de contención del reactor nuclear.

## **1.4 Diseño Sísmico de Plantas Nucleares**

### **1.4.1 Bases de Diseño Contra Sismos**

En las primeras etapas del diseño de la planta, un bosquejo preliminar de las instalaciones principales debe ser preparado, lo que debe ser revisado periódicamente para lograr la solución más adecuada para el diseño sísmico. Todos los procedimientos que se realicen debe estar firmemente sustentados de anteriores terremotos destructivos, y este conocimiento debe ser adoptado y aplicado de manera realista. **[1.9]**

En las fases de diseño preliminar, los efectos sísmicos (en términos de fuerzas y efectos indeseados de torsión) deben reducirse al mínimo, La correspondiente selección de un diseño estructural con la aplicación de determinados criterios generales, tales como:

- Localizar el centro de gravedad de las estructuras tan bajo como sea posible
- Selección de una planicidad y elevación que sean tan simples y de regularidad posible, para evitar diferentes profundidades empotramiento
- Evitar secciones salientes (es decir, falta de simetría) en la medida de lo posible
- Localizar el centro de rigidez en las elevaciones diferentes lo más cerca posible, en el centro de gravedad
- Evitar conexiones rígidas entre las estructuras o equipos de diferentes categorías para mantener un comportamiento dinámico

Un enfoque específico también podría aplicarse a todo el diseño, o a una parte de la misma a través del uso de los sistemas antisísmicos y de dispositivos tales como aisladores de base. Esta técnica debe ser integrada con disposiciones especiales en el diseño de un sistema de cimentación más complicada y procedimientos operativos para la inspección periódica y mantenimiento de los dispositivos de aislamiento, los pueden ser ampliamente compensados por una reducción significativa en la demanda sísmica. El campo de mayor desplazamiento relativo puede plantear problemas para el diseño de interfaces estructurales y conexiones, y debe mencionarse expresamente en el diseño. Por otra parte, los efectos del uso aisladores sísmicos deben ser evaluados en relación a la respuesta a las cargas de otros donde la respuesta puede empeorar.

#### 1.4.2 Aceleración Máxima del Terreno

Las acciones sísmicas establecidas se caracterizan por la aceleración máxima de la componente horizontal y son seleccionadas a partir de un estudio generalizado de la amenaza sísmica. En término medio y según el país, se encuentran asociadas a probabilidades de excedencia que oscilan entre 10% y 40% en 50 años, lo cual representa períodos de retorno de 475 a 100 años respectivamente. [1.10]

De una manera general, en obras civiles muy importantes y en todas aquellas donde el mal funcionamiento puede tener consecuencias catastróficas, es necesario alcanzar un nivel consistente de protección contra las acciones sísmicas, tanto en las edificaciones, como en las instalaciones, sistemas y componentes. Estos, además de soportar las acciones gravitacionales previstas, deben quedar diseñados de modo tal que puedan resistir los efectos de aquellas combinaciones de **acciones cuya probabilidad de ocurrencia simultánea no se considere remota**. Es usual incluir en estas combinaciones, aquellas acciones cuya probabilidad de excedencia  $P$  durante la vida útil de la instalación en cuestión ( $t$  años), no supere valores prefijados (del orden de 1% al 5%). Esto se traduce en acciones cuyo período medio de retorno  $T$  en años se puede expresar como:

$$T \cong \frac{1}{1 - (1 - p)^{\frac{1}{t}}} \quad (b)$$

Por otra parte, los criterios generales para la selección de la aceleración máxima de la componente horizontal de los sismos de diseño, se sintetizan en la Tabla 1.1

En las normas para edificaciones antisísmicas, las edificaciones hospitalarias y centros de salud son clasificadas como de importancia vital en caso de terremoto. Por esta razón, el coeficiente de importancia  $\alpha$ , igual a 1,0 para edificaciones destinadas a vivienda, oficinas o comercio, es mayor que la unidad; esta varía entre 1,20 y 1,50 en diferentes normas. Su influencia en la probabilidad de excedencia de los valores de diseño, y por tanto en el período medio de retorno, depende de la peligrosidad de la localidad.

Objetivo de Diseño	Periodo Medio de Retorno	Criterio de Diseño
Minimizar daños menores, o la disrupción de operación en plantas industriales	1 a 2 veces la vida de la edificación	Respuesta elástica
Control de daños en componentes críticos. Estabilidad estructural	4 a 6 veces la útil	Respuesta elástica. Cedencia incipiente en las zonas más solicitadas
Estabilidad de embalsas. Interrupción de funcionamiento de plantas nucleares. Estabilidad de equipos en subestaciones eléctricas de alto voltaje	De mil a 3 mil años	Agotamiento resistente

**Tabla 1.1 Criterios para la selección de los sismos de diseño (aceleración máxima de la componente horizontal). [1.3]**

Ubicación de la localidad	Fracción de la gravedad $A_0$
Zona de peligro elevado( Zona sísmica D)	0,30g
	0,36g
	0,50g
Zona de peligro bajo ( Zona sísmica A)	0,15g
	0,18g
	0,225g

**Tabla 1.2. Zonas de peligro sísmico y sus aceleraciones máximas. [1.3]**

Cabe destacar que para el presente trabajo, se ha postulado, para evaluar la seguridad estructural y el desempeño del contenedor del reactor nuclear en base a la simulación numérica la ocurrencia de sismos en una zona de peligro elevado con Zona sísmica D como sería en el estado de Oaxaca, Guerrero, Chiapas y el Golfo de Tehuantepec, esto es, que las aceleraciones propuestas están en el rango de 0.5g a 0.3g porcentajes de la gravedad terrestre (ver tabla 1.2).

### 1.5 Planteamiento del Problema

De manera introductoria al presente trabajo, en este capítulo se habla de las principales características de seguridad y diseño de una planta nuclear bajo la acción de un escenario sísmico y asimismo como aplicarlas.

Con la finalidad de hacer notar la importancia de las estructuras que se alojan en una planta nuclear y ante la posibilidad de realizar estudios sobre la Contención Primaria del Reactor Nuclear, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) mostró interés en realizar una evaluación estructural del tipo dinámico, esto para evaluar los niveles de seguridad disponible en un contenedor primario tipo Mark II que está hecho de concreto reforzado y un recubrimiento interno de acero llamado Liner, esto considerando el diseño estructural de la contención.

Aunque la contención del reactor se considera una estructura estática, se pretende caracterizar la estructura bajo solicitaciones dinámicas ya que ante la posible sacudida de un terremoto está puede ponerla en movimiento ocasionando serios daños a la integridad de la planta, Por lo tanto, se requiere que los sistemas contenidos en la planta se encuentren en buen estado y que la seguridad sea integral para el mismo, en otras palabras, se requiere que se mantenga también la integridad estructural.

Finalmente se plantea el problema de realizar diversos escenarios sísmicos a los que se sujetará el contenedor del reactor, esto para obtener en primera instancia, los máximos desplazamientos de la estructura en base a un análisis modal de donde se extraerán sus frecuencias naturales y sus modos de forma, para posteriormente calcular los esfuerzos existentes bajo las diferentes cargas dinámicas.

Las solicitaciones dinámicas a las que estará sujeta la contención del reactor están en función de espectros de aceleración constantes por lo que las sacudidas de la misma se hacen a lo largo de sus frecuencias naturales y para dar solución al problema se emplea el Método del Elemento Finito con las siguientes condiciones:

- 0.5g, 0.4g, 0.3 g que son porcentajes de la aceleración de la gravedad terrestre.
- Las direcciones a las que se aplican estas aceleraciones al contenedor del reactor son "X", "Y" y "Z" en su fundación, ver figura 4.6.

Para generar los resultados de la respuesta del sistema se utilizará el método de superposición modal espectral, esto requiere en primera instancia hacer el cálculo de las frecuencias naturales del sistema para así expandirlas y comenzar a generar la combinación modal espectral.

Cabe destacar que el presente trabajo ha sido mejorado, ya que por un lado, se han tomado en cuenta las condiciones de contacto entre la contención del reactor nuclear y la placa llamada Liner y asimismo se ha modelado de manera adecuada los refuerzos (varillas) helicoidales de acero estructural en la geometría del contenedor, lo que en el trabajo denominado "*Análisis de esfuerzos de la Contención Primaria tipo Mark II de un Reactor Nuclear de Agua en Ebullición*" no se consideró en su momento.

## 1.6 Metodología

1. *Recopilación de la información:* obtención de la geometría de la contención del reactor y Liner, así como también las propiedades mecánicas de los mismos, esto para modelar cada uno de ellos en un paquete CAD (Autodesk Inventor Professional 2009) y asimismo generar el ensamble y planos de especificación de los mismos, también para poder cargar los valores numéricos en la fase de preproceso dentro de la simulación a generar en el análisis de Elemento Finito (Ansys Classic, Ansys Workbench). Con estos datos podemos delimitar el trabajo presente.
2. *Consideraciones del Análisis:* Se mencionan las premisas importantes para el análisis numérico. Naturaleza mecánica del concreto y acero, así como también poder idealizar las condiciones de trabajo, cargas a utilizar, condiciones de frontera, tipos de elementos finitos a designar al modelo, proceso de generación de malla, ensamble de los elementos con los cuales está constituida la contención.
3. *Extracción de las Frecuencias Naturales del Edificio del Reactor:* Se hace el cálculo de las frecuencias naturales de la contención del reactor en su forma reducida, esto quiere decir, que la solución no completa el cálculo de los modos de forma de manera completa. Este paso es requerido únicamente para saber qué valores de frecuencia hacen susceptible a la estructura del contenedor primario, en los casos en que igualamos la frecuencia externa con la calculada, y determinar si entra o no en resonancia mecánica, más con este cálculo no se puede proceder a realizar un análisis de espectros, por lo que, se requiere hacer la expansión de la solución.
4. *Análisis de Espectro de Respuesta de un Solo Punto:* Se agrega un espectro de aceleración en las condiciones de frontera de la contención del reactor, para excitar a la estructura de la contención a distintas aceleraciones en los tres respectivos ejes, esto para simular diferentes escenarios sísmicos.
5. *Expansión de las Frecuencias Naturales:* Aquí es necesario hacer la solución completa de los modos de forma y frecuencias naturales, para proceder a generar una expansión de las frecuencias naturales a lo largo de los diferentes espectros agregados a las condiciones de frontera y poder simular la superposición modal-espectral.
6. *Combinación Modal Espectral:* aquí se determina la respuesta modal de la estructura a la combinación del espectro con las frecuencias naturales, y con esto proceder a evaluar los resultados obtenidos.

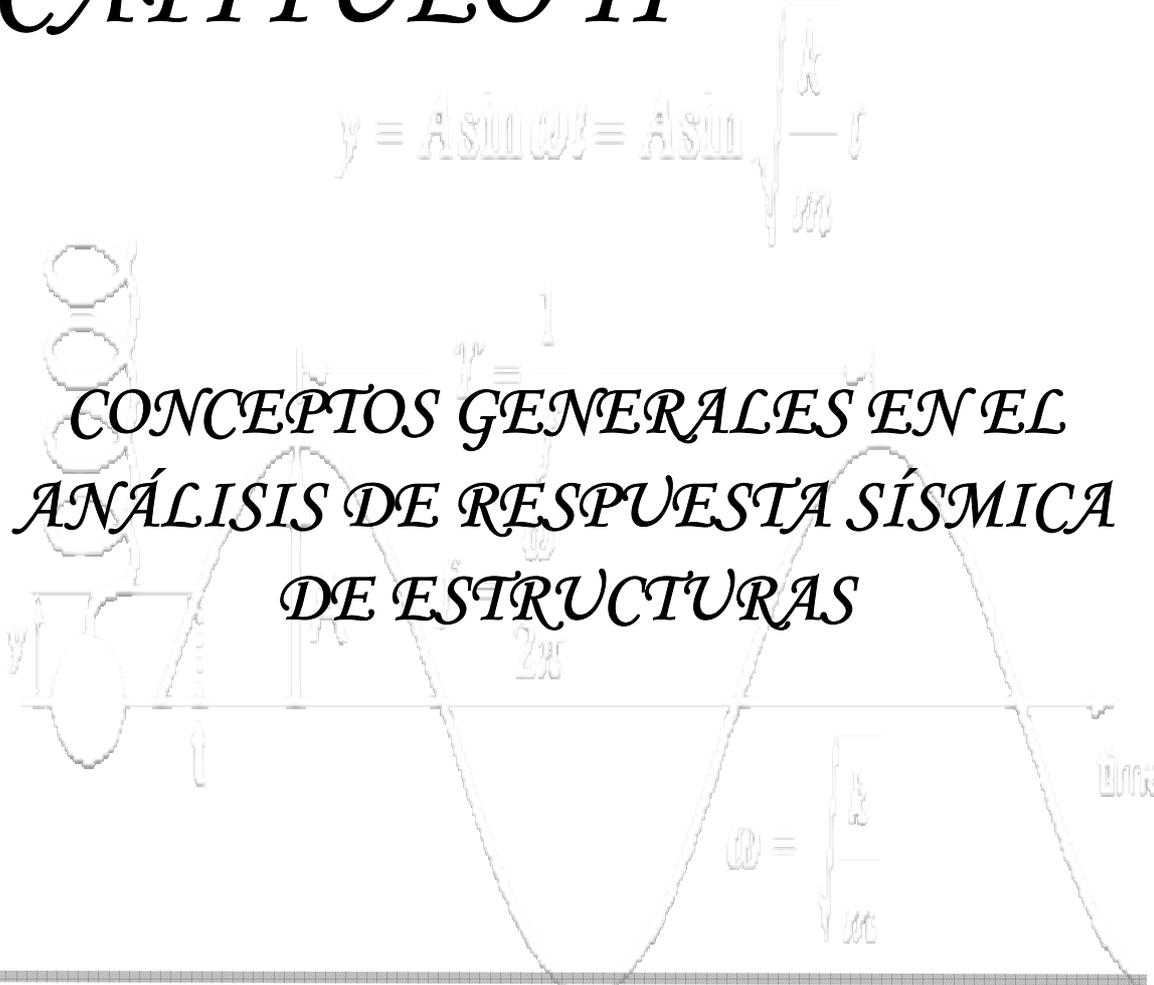
7. *Obtención de los Resultados del Análisis de Elemento Finito*: Aquí se piden los resultados numéricos de los análisis, como son los desplazamientos y esfuerzos que se tengan para cada escenario sísmico, y realizar las conclusiones pertinentes.

## 1.8 Referencias

- [1.1] Rodríguez de la torre F. *La geografía y la historia de los sismos*, Universidad de Barcelona, Año XVI. Número 97 Noviembre 1992
- [1.2] Recuperado de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Escala\\_sismológica\\_de\\_Mercalli](http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismológica_de_Mercalli)
- [1.3] Servicio Sismológico Nacional, <http://www.ssn.unam.mx/>
- [1.4] *Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants*, Safety Standards Series, IAAE International Atomic Energy Agency, Austria November 2003
- [1.5] Patiño Ortiz J, “*Aplicación de la Mecánica Fractal para el Análisis de la Sismicidad en la República Mexicana*”, Tesis de Doctorado, SEPI ESIME-IPN, Febrero de 2009.
- [1.6] Galen J. Suppes, *Sustainable Nuclear Power*, Elsevier, 2007
- [1.7] Comisión Federal de Electricidad, *Manual de Diseño de Obras Civiles*, Sección C. Estructuras, Capítulo 3, Diseño por Sismo, México D.F Octubre de 1993
- [1.8] Metodología de análisis de la respuesta de contención para el APS de la central CAREM-25 Barón, J.H
- [1.9] *Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants*, Safety Standards Series, IAAE International Atomic Energy Agency, Austria December 2002
- [1.10] *Earthquakes: Simulations, Sources and Tsunamis*, Kristy F. Tiampo, Pageoph Topical Volumes, 2008 Birkhäuser Verlag AG

# CAPÍTULO II

## CONCEPTOS GENERALES EN EL ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS



*En este capítulo, se presentan los conceptos fundamentales de la dinámica de estructura e ingeniería sísmica, asimismo se plantea la ecuación del movimiento para frecuencias naturales y para el concepto de masa, resorte y amortiguamiento para concluir con la ecuación en función de la carga sísmica.*

---

## 2.1 Generalidades

### 2.1.1 Los Programas para Análisis Dinámico Estructural

El análisis de la respuesta de estructuras sometidas a las acciones de sismos en particular requiere una evaluación de su comportamiento dinámico. La cuestión es por demás compleja en los casos reales. Por un lado, se tiene la realidad de la estructura misma, que pocas veces admite la representación con modelos teóricos suficientemente sencillos como para que el análisis sea posible con los medios disponibles. Por el otro, se tiene la complejidad de la excitación, que en el caso de sismos es de características caóticas, tanto en que la evolución de la acción en el tiempo, como en lo que se refiere a la intensidad máxima que la misma puede tener y que tampoco admite esquematizaciones teóricas sencillas.

El advenimiento de los ordenadores cada vez más poderosos al mundo del trabajo profesional diario, sumado al desarrollo de programas con posibilidades de modelación cada vez más avanzadas, que llegan al asombro, parecería que permite eliminar las dificultades antes mencionadas. Sin embargo no es así. Las computadoras y los programas sólo descargan al usuario de la tarea del trabajo rutinario de cálculo, pero dejan intacta la tarea de representar la estructura y las acciones con un modelo teórico confiable y la tarea aún más exigente de interpretar los resultados del análisis que eventualmente puede llevar pocos segundos a la máquina. La masa de resultados suele ser imponente y al profesional desprevenido puede resultarle muy difícil manejarla adecuadamente. No falta el caso de aquel que cree de buena fe que “debe estar bien porque es el resultado de la computadora y del programa.

Los propios autores de los programas comerciales, son expertos en programación, pero muchas veces no conocen la práctica de la disciplina a la que se aplicarán sus programas, tienen fe ciega en ellos y pocas veces proporcionan a los usuarios la información sobre los alcances y limitaciones de los algoritmos en lo que se **refiere a la representación del fenómeno físico real**. En rigor esto no es parte de la especialidad del programador, pero tampoco es fácil que el usuario novel lo adquiera por sus propios medios, salvo que tenga una cierta experiencia como programador, lo que no es frecuente. Se crea así un vacío que debe ser llenado si los programas y las computadoras van a ser utilizados responsablemente. **[2.1]**

En el campo del estudio dinámico, hoy es moneda corriente la utilización de programas para el análisis dinámico modal de las estructuras, pero no es tan frecuente que se conozcan los alcances y las limitaciones que pueden esperarse de ese tipo de análisis en primer término. Tampoco es frecuente que se conozcan los alcances y las limitaciones de los programas disponibles en relación con la validez física de los procedimientos propuestos, más allá de que los mismos transcriban un procedimiento de reglamento. Precisamente, en el campo del análisis sísmico es indispensable una aplicación razonada, conceptual del reglamento y no solo el seguimiento de la letra. Estas ideas se refuerzan aún más cuando se consideran las acciones dinámicas extremas, es decir cuando se está aceptando que la construcción debe alcanzar el estado límite de esfuerzos sin llegar al colapso, como es el caso habitual del proyecto de construcciones sismo resistentes. En esos casos, el modelo se complica porque es necesario considerar la influencia de toda la construcción, no sólo la de los componentes “estructurales”, porque normalmente es muy difícil hacer un análisis no lineal y se representa el funcionamiento último de la construcción por referencia a un estado límite elástico y a una excitación de origen “elástico” (el espectro de proyecto). En algunos casos el

análisis dinámico se emplea - un tanto ingenuamente - porque se cree que sistemáticamente se obtendrán valores menores que los resultantes del método estático.

Esto ya presupone una falla de enfoque en el trabajo profesional. Lo importante no es el resultado que se obtenga para el dimensionado, sino la descripción confiable del funcionamiento de la estructura para mejorar el diseño.

### **2.1.2 Análisis en Estructuras**

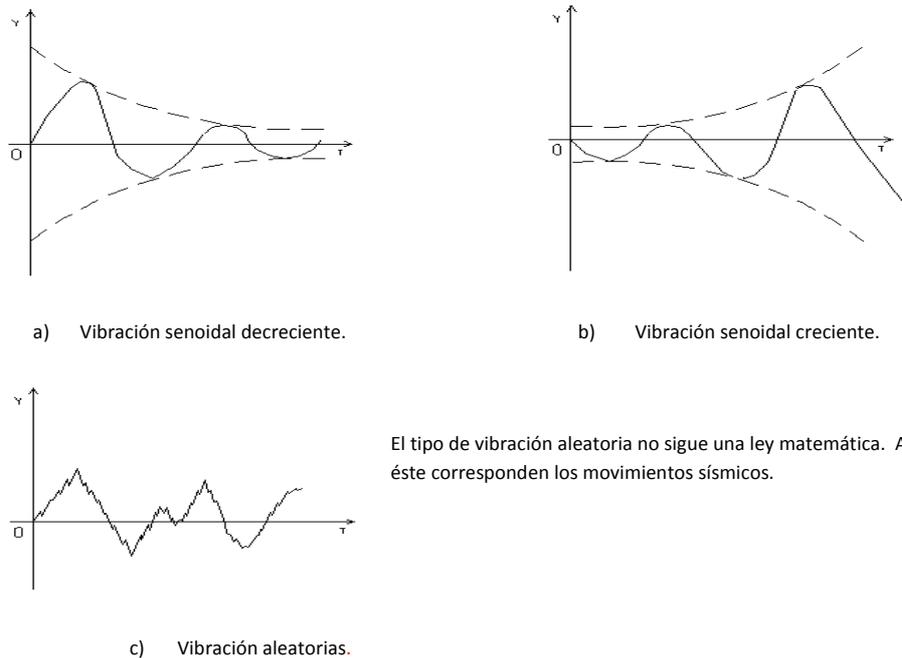
Es bastante común que la aplicación de los procedimientos de análisis actuales (estático o dinámico) oscurezca con sus dificultades y con la profusión y espectacularidad de la información. Se tiende a sorprenderse por la cantidad de información y por la aparente precisión de los resultados. Por eso, es pertinente volver una y otra vez sobre el objeto de análisis: predecir el comportamiento probable de la estructura sometida a las acciones que puedan ocurrir durante su vida útil, con una precisión aceptable para garantizar la seguridad y la economía. El análisis (dinámico o de cualquier otro tipo) debería ser utilizado como indicador del funcionamiento futuro: si es bueno para aceptar el diseño y si es malo para modificarlo. Antes de iniciar el análisis estructural, se han cumplido las etapas más importantes de la concepción de la estructura: Se definieron los sistemas resistentes y se dimensionaron sus componentes. Los caminos para cumplir esas etapas son muy variados y dependen principalmente de la experiencia y de la capacidad de quien diseña. Obviamente, los resultados de etapas intermedias de análisis deberían ser realimentados para optimizar la estructura.

Lo que acá interesa destacar es que el método de análisis, por sí sólo, no mejora el funcionamiento de una estructura mal concebida, sólo puede, siempre que esté bien interpretado, mostrar los defectos. Es necesario entonces que los métodos de análisis se utilicen con prudencia, en especial los más complejos. Muchas veces, las incongruencias y dificultades resultantes de la aplicación de un método de análisis muy elaborado nacen de fallas de diseño, ya que se ve que la estructura tiene un comportamiento ambiguo o dudoso. Otras veces muestran que ese método de análisis no sirve para representar confiablemente el funcionamiento de la estructura. En el caso del presente trabajo, no se pretende generar el diseño de la contención del reactor, si no aplicar un análisis riguroso bajo las condiciones sísmicas descritas en el planteamiento del problema, para esto se enfoca el presente a un análisis numérico con el Método del Elemento Finito para generar la simulación.

## **2.2 Conceptos Fundamentales sobre Dinámica Estructural**

### **2.2.1 Características de los Análisis Dinámicos de Estructuras**

La actuación de cargas que están en función del tiempo, hace aparecer efectos de inercia; cuya influencia en el análisis estructural es fundamental. A este tipo de cargas  $p = p(t)$  se les denomina, cargas dinámicas, Por consiguiente, este análisis se le llama "análisis dinámico". De esta forma, fuerzas fluctuantes producen vibraciones en los sistemas estructurales. Estas se definen como los movimientos de una partícula o sistema de partículas, que oscilan alrededor de una posición de equilibrio. Estas vibraciones pueden ser producidas por máquinas, cargas rodantes, efectos sísmicos, etc. Como se muestra en la figura 2.1.



**Fig 2.1. Diferentes tipos de vibraciones**

Una estructura puede estar sujeta a vibraciones libres o vibraciones forzadas. Las primeras son aquellas que se produce bajo la ausencia de una acción externa permanente, es decir, que la estructura sigue vibrando, aún cuando cesa la acción de la fuerza a partir de que se originaron las condiciones en que se encuentra vibrando. Una vibración forzada, se tiene cuando un agente externo que varía según una función de tiempo, actúa permanentemente.

El número de coordenadas independientes necesarias para definir la posición de un cuerpo es llamado *grado de libertad*. Así, un número infinito de coordenadas son necesarias para describir el movimiento de un cuerpo elástico, tales cuerpos tendrán un número infinito de grados de libertad. A éstos se les conoce como “sistemas continuos” [2.1]. Sin embargo, puede suponerse que la masa del cuerpo puede concentrarse en un punto, entonces se tratará de un sistema con un grado de libertad, puesto que una coordenada define la posición de la masa.

### 2.2.2 Respuesta estructural

Se debe elegir un indicador apropiado para definir el comportamiento de la estructura. El más adecuado es la respuesta de la estructura que se materializa en el estado de deformación. Este determina la supervivencia de la estructura. Las solicitaciones o los esfuerzos - que resultan de las deformaciones según una ley teórica dada - son **indicadores teóricos** que pueden ser más fáciles de manejar, pero sólo indirectamente representan el estado de seguridad de una construcción.

En la práctica se pueden elegir distintos indicadores como: los desplazamientos de puntos escogidos, fuerzas de inercia equivalentes, solicitaciones en los componentes estructurales, etc. A primera vista, la elección del indicador debería ser sencilla. Sin embargo, la experiencia prueba

que no es así: de otro modo, no se explica que una estructura proyectada, conforme a los criterios de análisis más actuales se dañen gravemente o aún colapsen en cada terremoto.

Es obvio que la respuesta podría obtenerse en un nivel de detalle tan grande como se deseara, al menos teóricamente. Por ejemplo sería posible obtener el momento flector en todas las secciones de una estructura que son infinitas. Por consiguiente se impone la necesidad de restringir el número de componentes de la respuesta y esto es una primera causa de limitaciones.

### **2.2.3 Valor Máximo de la Respuesta**

En muchos casos es suficiente encontrar el valor máximo de la respuesta para compararla con un valor de referencia, que depende de las características constructivas de la estructura y predecir la seguridad. Esto es así cuando la respuesta elegida es única y definitiva del comportamiento de la estructura. En estructuras complejas y con materiales heterogéneos la cuestión no se define tan directamente.

### **2.2.4 Limitaciones**

Un ejemplo sencillo puede aclarar estos aspectos. Supongamos una pieza de hormigón armado sometida a flexión compuesta. La combinación del esfuerzo normal de compresión máximo con el momento flector máximo no es necesariamente la más peligrosa. Sería necesario estudiar al menos cuatro casos para obtener una envolvente de situaciones y determinar la seguridad: El momento flector máximo con el esfuerzo normal simultáneo, el momento flector mínimo con el esfuerzo normal simultáneo, el esfuerzo normal mínimo (de compresión) con el momento flector simultáneo y el esfuerzo normal máximo (de tracción) con el momento flector simultáneo. Se debe poner atención sobre la palabra “simultáneo” en todos los casos. Y si la estructura es espacial, la cantidad de combinaciones es mucho mayor. En estos casos es muy dudoso que el valor máximo de una sola magnitud proporcione el indicador buscado.

El indicador que toman los reglamentos para definir los métodos llamados estáticos de evaluación de la acción sísmica, parte de estudiar como respuesta las fuerzas equivalentes aplicadas en las masas que producen el **máximo corte** en cada piso. Esto es válido en edificios “de pisos” pero puede ser muy diferente en otro tipo de estructuras. El asunto no ha recibido la atención que merecería, porque la principal preocupación hasta ahora es era proporcionar métodos sencillos de verificación para un grupo de construcciones muy frecuentes y también muy peligrosas. Los últimos terremotos demuestran la vulnerabilidad de todo tipo de construcciones y la peligrosidad de generalizar procedimientos sin un análisis más detallado de sus limitaciones.

### **2.2.5 Grado de libertad**

El concepto de grado de libertad está vinculado al de un movimiento (desplazamiento o giro) de un punto cualquiera de la estructura. Obviamente, en una estructura hay un número infinito de puntos, pero sus movimientos no son independientes porque están vinculados con un número de componentes de la estructura. En consecuencia **se considera el grado de libertad a todo movimiento independiente de un punto de la construcción**. Esta definición parece absoluta, pero al reflexionar un poco se advierte que es contingente ya que depende del propósito para el que se utilizará el “grado de libertad”.

Desde el punto de vista del estudio dinámico de la estructura, se puede decir que hay que definir tantos grados de libertad como sea necesario para **representar adecuadamente el intercambio de energía en una construcción**. Se podría pensar que se pueden representar todos los sistemas como continuos y estudiar en toda generalidad el problema. Sin embargo, un examen rápido del tema pone en evidencia las limitaciones para hacerlo. En primer término, la cantidad de datos y de resultados crece rápidamente y su interpretación se vuelve imposible. En segundo término, muchos de los resultados son irrelevantes para el problema en cuestión: el movimiento propio o local de un muro fuera de su plano puede ser peligroso para el muro, pero tal vez no tenga significación para el movimiento de la construcción completa.

Por último, se debe considerar que los métodos numéricos tienen errores propios que crecen con la cantidad de operaciones a realizar, en particular cuando se dan ciertas circunstancias desfavorables que sintéticamente se pueden expresar en el intento de comparar variables de importancia muy diferente.

Por esta razón, es práctica corriente “discretizar” el movimiento de la estructura concentrando las masas en unos pocos puntos y refiriendo a esos puntos los grados de libertad dinámicos. Es el caso de considerar las masas concentradas en los pisos para las estructuras de edificios comunes. Conviene advertir, sin embargo, que este procedimiento implica que esos movimientos **representan adecuadamente todo el efecto dinámico sobre la estructura**. En muchos casos esa hipótesis puede ser inválida.

## **2.3 Análisis Dinámico de Estructuras Simples**

### **2.3.1 Estructuras Simples**

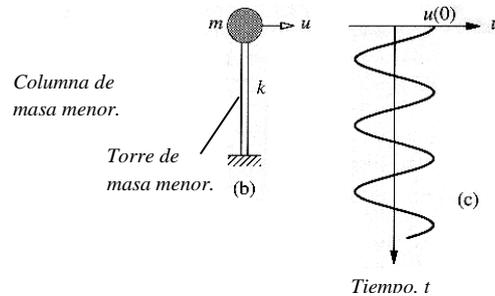
Es conveniente iniciar el estudio de estructuras dinámicas con estructuras simples, como el del péndulo invertido de la figura 2.2. Se prestará principal atención en el entendimiento de que las vibraciones de estas estructuras cuando se encuentran sujetas a una fuerza lateral (horizontal), las fuerzas en la cima o grandes movimientos horizontales son ocasionadas por un terremoto.

A este tipo de estructuras se les puede llamar *simples* por que pueden ser idealizadas como una concentración o conjunto de masas  $m$  soportadas por una masa estructural menor con una rigidez  $k$  en la dirección lateral (horizontal). Este es considerado como una sumatoria de masas  $m$  soportadas por una torre relativamente ligera que puede ser asumida como una masa menor.

La torre en voladizo soportando el tanque de agua provee una rigidez lateral  $k$  de la estructura. Por el momento se asumirá que el movimiento lateral de esta estructura es pequeño, en el sentido de que la estructura soporta deformaciones dentro de su límite lineal elástico. La ecuación diferencial que gobierna el desplazamiento lateral  $u(t)$  sin excitación externa aplicada es:

$$m\ddot{u} + ku = 0 \tag{2.1}$$

Donde un punto sobre la letra  $u$  denota diferenciación con respecto al tiempo; de aquí que  $\dot{u}$  denote la velocidad de la masa y  $\ddot{u}$  es la aceleración [2.2].



**Figura 2.2 (a) Péndulo Invertido**  
**(b) Vibración libre debido a un desplazamiento inicial.**

### 2.3.2 Relación Fuerza Desplazamiento.

Considere el sistema mostrado en la figura 2.3 (a), sin ninguna excitación, sujeta a una fuerza estática externamente aplicada  $f_s$  a lo largo de su grado de libertad  $u$  como se muestra. La fuerza interna resistiendo el desplazamiento  $u$  es igual y opuesta a la fuerza externa  $f_s$  (Figura 2.3 (b)). Es deseable determinar la relación entre la fuerza  $f_s$  y el desplazamiento relativo  $u$  asociado con las deformaciones en la estructura. Esta relación fuerza - desplazamiento puede ser lineal en presencia de deformaciones pequeñas, pero podría convertirse en no lineal en grandes deformaciones (figura 2.3 (c)); ambas relaciones no lineales y lineales son consideradas como se muestra en las figuras 2.3 (c) y (d). [2.1].

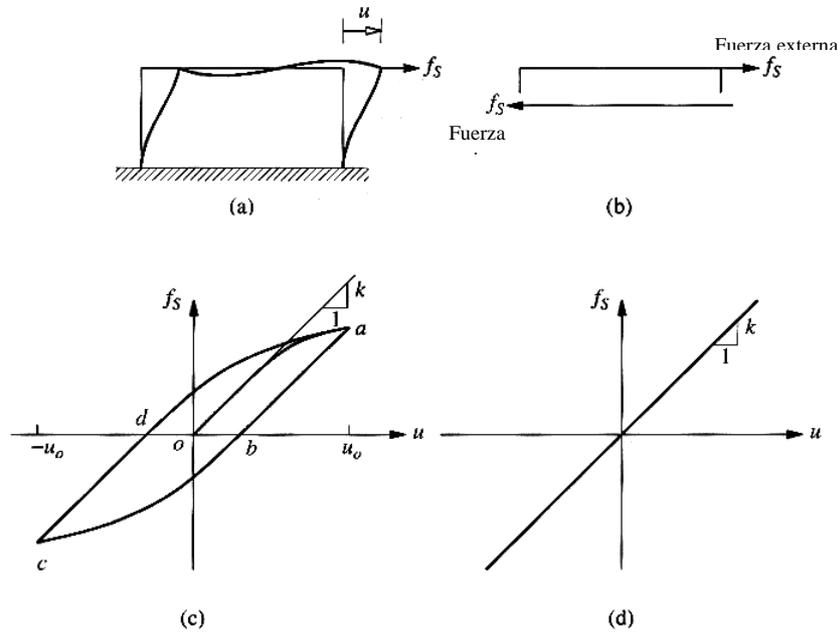


Figura 2.3 Representación de la relación Fuerza – Desplazamiento.

### 2.3.3 Sistemas Linealmente Elásticos.

Para un sistema lineal, la relación entre la fuerza lateral  $f_s$  y la deformación resultante  $u$  es lineal, es decir:

$$f_s = ku \quad (2.2)$$

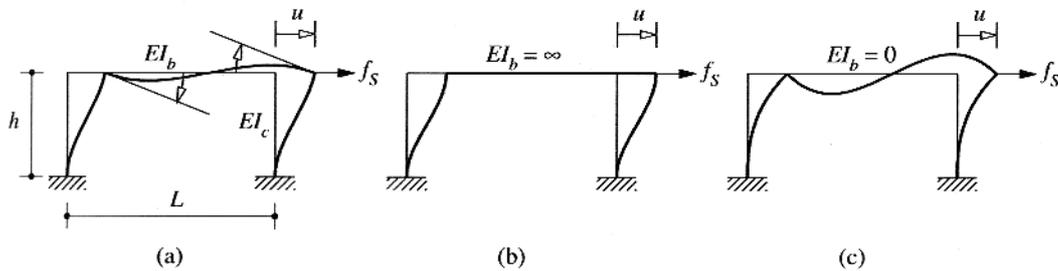
Donde  $k$  es la rigidez lateral del sistema, con pequeñas deformaciones de la estructura y es también válida para grandes deformaciones. Debido a que la fuerza de resistencia es una función de un solo valor  $u$  y el sistema es elástico, se obtiene el término de “sistema linealmente elástico”.

Considere la estructura de la figura 2.4 (a) con una longitud  $L$ , altura  $h$ , módulo de elasticidad  $E$ , y un momento de inercia a lo largo del eje de flexión =  $I_b$  e  $I_c$  para las vigas y columnas respectivamente; las columnas están fijadas a la base. La rigidez lateral de la estructura puede ser determinada para los dos casos extremos: Si la viga es rígida o bien, la rigidez a la flexión es  $EI_b = \infty$  (figura 2.4 (b)),

$$k = \sum_{\text{columnas}} \frac{12EI_c}{h^3} = 24 \frac{EI_c}{h^3} \quad (2.3)$$

De otra manera, para vigas sin rigidez es decir  $EI_b = 0$  (figura 2.4 (c)),

$$k = \sum_{\text{columnas}} \frac{3EI_c}{h^3} = 6 \frac{EI_c}{h^3} \quad (2.4)$$



**Figura 2.4** (a) Estructura con rigidez finita; (b) Estructura con rigidez infinita; (c) Estructura sin rigidez

Se observa que para los dos valores extremos de la rigidez de la viga, la rigidez lateral de la estructura es independiente de la longitud de la viga.

La rigidez lateral promedio de una estructura o la rigidez real de una viga pueden ser calculadas por procedimientos estándares de análisis estructural estático. La matriz de rigidez es formulada con respecto a los tres grados de libertad: desplazamiento lateral  $u$  y la rotación de las dos uniones viga - columna (figura 2.4 (a)). Por simplificación estática, o eliminación de la rotación de los grados de libertad, la relación de desplazamiento - fuerza de la lateral de la ecuación (2.5) es determinada aplicando este procedimiento a la estructura con  $L = 2h$  y  $EI_b = EI_c$  y su rigidez lateral es obtenida.

$$k = \frac{96}{7} \frac{EI_c}{h^3} \quad (2.5)$$

La rigidez lateral de la estructura puede ser calculada en forma similar para varios valores de  $I_b$ , usando el coeficiente de rigidez de la estructura. Si las deformaciones cortantes en los elementos no son consideradas, el resultado puede ser escrito en la siguiente forma:

$$k = \frac{24EI_c}{h^3} \frac{12\rho + 1}{12\rho + 4} \quad (2.6)$$

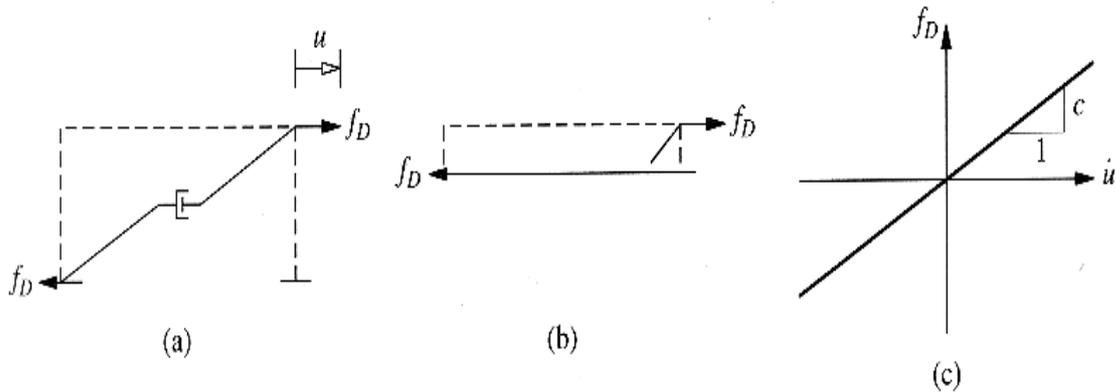
Donde,  $\rho = I_b / 4I_c$  es la razón de rigidez de la viga - columna. Para  $\rho = 0, \infty$  y  $1/4$ , la ecuación (2.6) reduce los resultados de las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.5) respectivamente.

Esto implica, que se debe tener en cuenta no únicamente en análisis estático los efectos de la rigidez en las estructuras. Por ende, para trabajar un sistema dinámico, como es el caso del presente trabajo, debe tomarse la ecuación 2.2, donde se deduce la rigidez, también conocida como la Ley de Hooke.

#### **2.3.4 Fuerza de Amortiguamiento.**

El proceso por el cual la vibración libre disminuye constantemente en amplitud es llamado amortiguamiento. En este caso, la energía del sistema de vibración es disipada por varios mecanismos, y frecuentemente más de uno puede estar presente al mismo tiempo. En sistemas simples tales como los modelos de los laboratorios, la mayoría de la disipación de energía presumiblemente surge del efecto térmico de deformación elástica repetida del material y desde la fricción interna cuando un sólido es deformado. Sin embargo, en estructuras reales, muchos otros mecanismos contribuyen a la disipación de energía. Dentro de la vibración de estructuras, éstas incluyen fricción en las conexiones de acero, aperturas y cierres de microgrietas en el concreto, fricción entre la estructura misma y los elementos no estructurales, tales como particiones de paredes. Esto parece imposible para describirlo o identificar matemáticamente cada uno de estos mecanismos de disipación de energía en un edificio [2.2].

El amortiguamiento en estructuras reales es usualmente representado de manera idealizada. Para muchos propósitos, el amortiguamiento en una estructura de un grado de libertad puede ser satisfactoriamente idealizado por un amortiguador viscoso lineal. El coeficiente de amortiguamiento es seleccionado para que la energía vibracional disipada sea equivalente a todos los mecanismos de amortiguamiento combinados presentes en la estructura actual. Esta idealización es por lo tanto llamada “*amortiguamiento equivalente viscoso*”.



**Figura 2.5 (a) Amortiguamiento viscoso; (b) Fuerza externa; (c) Relación entre  $f_D$  y  $u$ .**

La figura 2.5 (a) muestra un amortiguador viscoso lineal sujeto a una fuerza  $f_D$  a lo largo del grado de libertad. La fuerza en el amortiguador es igual y opuesta a la fuerza externa  $f_D$  (figura 2.5 (b)). Como se muestra en la figura 2.5 (c), la fuerza de amortiguamiento  $f_D$  está relacionada con la velocidad  $\dot{u}$  a través del amortiguador lineal viscoso por:

$$f_D = c\dot{u} \quad (2.7)$$

Donde la constante  $c$  es el coeficiente de amortiguamiento viscoso. Este tiene unidades de fuerza multiplicado por tiempo/longitud.

Ya que no es fácil identificar todos los mecanismos que disipan la energía vibracional de un sistema. Por lo tanto, los experimentos de vibración sobre una estructura proveen los datos para la evaluación del coeficiente de amortiguamiento de dicho parámetro.

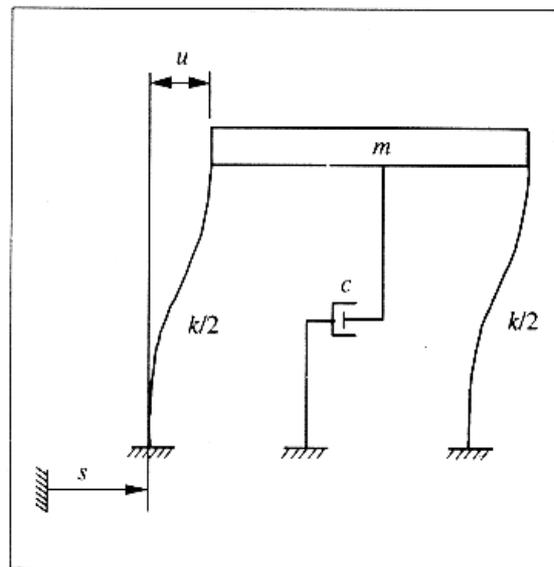
El coeficiente de amortiguamiento  $c$ , determinado experimentalmente, puede variar con la amplitud de deformación. Esta no-linealidad usualmente no se considera explícitamente en análisis dinámicos. Esto puede sostenerse indirectamente por la selección de un valor para el coeficiente de amortiguamiento que sea apropiado para la amplitud de deformación esperada, usualmente tomada como la deformación asociada a los límites lineales elásticos de la estructura.

En grandes deformaciones, la energía es disipada debido al comportamiento inelástico de la estructura. Bajo fuerzas cíclicas o deformaciones, éste comportamiento implica la formación de un ciclo de histéresis fuerza - deformación (figura 2.3 (c)). Esta energía de amortiguamiento disipada durante un ciclo de deformación entre deformaciones límites  $\pm u_0$  es dada por el área dentro del ciclo de histéresis  $abcd$ .

Esta energía no es usualmente modelada por un amortiguador viscoso, especialmente si la excitación es un temblor de tierra. Sin embargo, la aproximación más común y directa para

calcularla es reconocer la relación inelástica entre la resistencia y la deformación. Esta es obtenida en experimentos sobre estructuras o componentes estructurales a bajos rangos de deformación, por lo tanto excluyen cualquier disipación de energía surgida de efectos dependientes de la velocidad. El cálculo usual es el modelar este amortiguamiento, en el rango inelástico de deformaciones, para el mismo amortiguador viscoso que fue definido para deformaciones pequeñas dentro del rango lineal – elástico [2.3].

### 2.3.5 Descripción y ecuación de equilibrio dinámico en sistemas lineales de un grado de libertad.



**Figura 2.6** Sistema simple con amortiguamiento viscoso

Para fines prácticos, se considera el sistema de un piso mostrado en la figura 2.6, constituido por una masa concentrada que puede tener un desplazamiento horizontal  $u$ , ligado al terreno mediante varios elementos verticales representados esquemáticamente por dos columnas elásticas y por un amortiguador.

Cuando el terreno experimenta un desplazamiento horizontal  $s$ , en la ecuación de equilibrio dinámico aparece la fuerza de inercia, igual a la masa por su aceleración absoluta  $\ddot{x}$ , la fuerza de rigidez y la de amortiguamiento. En el caso más sencillo, las fuerzas de rigidez y de amortiguamiento son, respectivamente, proporcionales al desplazamiento  $u$  y a la velocidad  $\dot{u}$  de la masa con respecto a su base. Sean  $k$  y  $c$  las correspondientes constantes de proporcionalidad que se supone que no cambian con respecto al tiempo;  $k$  es lo mismo que la matriz de rigidez lateral, en este caso de 1 por 1, y  $c$  se llama coeficiente o relación de amortiguamiento.

El conjunto de  $m$ ,  $c$  y  $k$  constituyen un sistema lineal, con amortiguamiento viscoso o lineal; utilizando el principio de D’Alembert, la ecuación diferencial de equilibrio dinámico:

$$m\ddot{x} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.8)$$

El punto sobre una cantidad significa derivación con respecto al tiempo, considerando que  $x = s + u$ , la ecuación anterior se escribe:

$$m\ddot{x} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{s} \quad (2.9)$$

Dividiendo esta ecuación entre  $m$  y definiendo  $\omega = \sqrt{k/m}$ ,  $c_{cr} = 2\sqrt{km}$  y  $\zeta = c/c_{cr}$  se llega a:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{s} \quad (2.10)$$

$\omega$  se denomina frecuencia circular natural del sistema;  $c_{cr}$  se conoce como amortiguamiento crítico y  $\zeta$  es la fracción de amortiguamiento crítico que usualmente se expresa como porcentaje. De las definiciones de  $\omega$  y  $c_{cr}$  se deduce que  $c_{cr} = 2m\omega$ , lo cual muestra que el amortiguamiento crítico está relacionado con la frecuencia fundamental de vibración.

### 2.3.6 Vibraciones libres.

El sistema descrito en la ecuación 2.8 vibra libremente, cuando la masa se mueve, pero el terreno permanece inmóvil y no actúan fuerzas externas. En este caso, el segundo miembro de esta se anula y su solución es:

$$u(t) = Ae^{-\zeta\omega t} \cos\omega_a(t - \gamma) \quad (2.11)$$

Donde:

$$\omega_a = \omega\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.12)$$

Siendo  $\omega_a$  la frecuencia natural amortiguada del sistema,  $A$  y  $\gamma$  son constantes que dependen de las condiciones iniciales, es decir, del desplazamiento y la velocidad cuando  $t = 0$ .

La ecuación (2.11) da  $u(t) = A \cos \omega(t - \gamma)$  cuando no existe amortiguamiento ( $\xi = 0$ ), y se dice que la masa tiene un movimiento armónico. El tiempo  $t$ , que dura un ciclo de oscilación

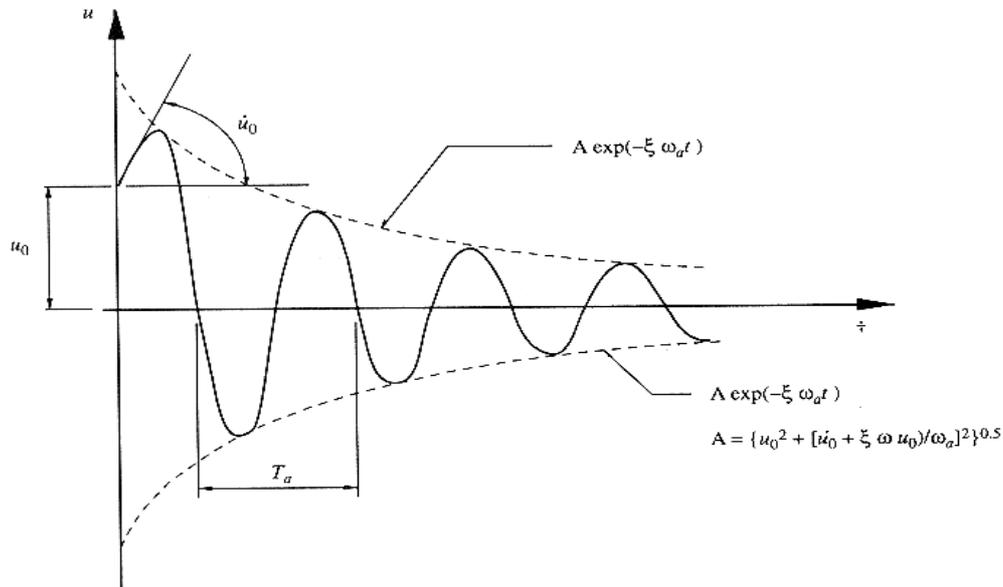


Figura 2.7 Vibraciones libres del sistema de la figura 2.7.

completo, se llama periodo de vibración natural del sistema y es igual a  $2\pi / \omega$ . Por otro lado, si el amortiguamiento es igual al crítico ( $\xi = 1$ ) se encuentra que  $\omega_a = 0$  y, por lo tanto,  $u(t) = Ae^{-\xi\omega t}$ , La masa se mueve sin oscilar y vuelve a su posición de equilibrio estático,  $u = 0$ , luego de un tiempo finito.

En el análisis de edificios, es de mayor interés el caso de amortiguamientos menores que el crítico, para el cual, si el desplazamiento y la velocidad de la masa en el instante  $t = 0$  valen, respectivamente  $u_0$  y  $u_0'$ :

$$u(t) = Ae^{-\xi\omega t} \left\{ (u_0' + \xi\omega u_0) \frac{\sin\omega_a t}{\omega_a} + u_0 \cos\omega_a t \right\} \quad (2.13)$$

Esta ecuación describe un movimiento oscilante de la masa con frecuencia  $\omega_a$  y con amplitud exponencialmente decreciente como se ilustra en la figura 2.7.

El periodo de amortiguamiento,  $T_a = 2\pi / \omega_a$ , es el tiempo que tarda un ciclo completo de oscilación, y es una propiedad de la estructura, independientemente de cómo se le excite [2.4].

Normalmente, el amortiguamiento de estructuras de edificios no excede 10 por ciento del crítico, o sea que típicamente  $\xi$  es menor que 0.1. Aún para este límite, relativamente alto, la ecuación (2.12) da  $\omega_a = 0.995\omega$ ; en casos prácticos, la influencia del amortiguamiento en la frecuencia de

vibración es pequeña, siendo su efecto más importante disminuir la amplitud de dicha vibración conforme avanza el tiempo, según lo expresa el tiempo exponencial de la ecuación (2.13) y se ilustra en la figura (2.8).

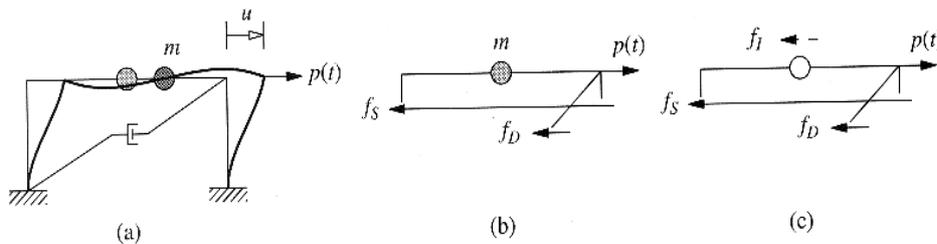
## 2.4 Respuesta a Movimiento del Terreno

### 2.4.1 Generalidades

El segundo término  $\ddot{s}$ , de la ecuación (2.10) describe cómo varía la aceleración del terreno con el tiempo y se conoce como acelerograma. En textos de dinámica estructural [2.5] se muestra que, cuando tal término no es nulo, la solución de la ecuación aludida es:

$$u(t) = 1/\omega_a \int \ddot{s}(t) \exp\{-\xi\omega(t-\tau)\} \sin \omega_a(t-\tau) d\tau \quad (2.14)$$

Como en el caso de vibraciones libres, las dos propiedades de un sistema de un grado de libertad que determinan su respuesta ante un movimiento prescrito del terreno son: su frecuencia natural



**Figura 2.8** (a) comportamiento de una estructura idealizada sujeta a una fuerza  $p(t)$ ; (b) Fuerza actuando en la masa en un instante de tiempo; (c) diagrama de cuerpo libre en tiempo  $t$ .

y su fracción de amortiguamiento crítico [2.6].

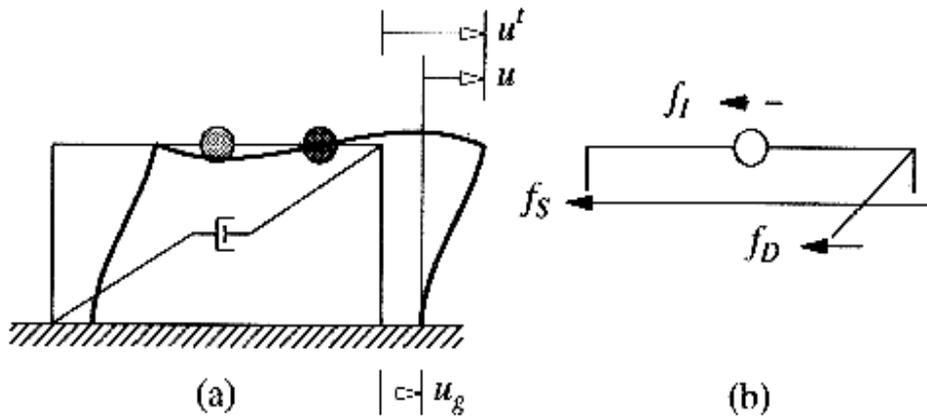
## 2.5 Ecuación de Movimiento

### 2.5.1 Excitación por Sismo.

En regiones expuestas a sismos, el problema principal de la dinámica estructural, es el comportamiento de las mismas, las cuales se encuentran sujetas al movimiento basal inducido por un sismo. El desplazamiento del suelo es denotado por  $u_g$ , el desplazamiento total (o absoluto) de la masa es denotado por  $u^t$ , y el desplazamiento relativo entre la masa y el suelo es denotado por  $u$  (figura 2.9). En cada instante el desplazamiento es descrito por:

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (2.15)$$

Donde  $u^t$  y  $u_g$  se refieren a la misma estructura inercial de referencia y dirección en sentido positivo coincidente.



**Figura 2.9 Desplazamiento relativo entre una masa y el suelo.**

La ecuación de movimiento para un historial de un sistema idealizado (figura 2.9 (a)) sujeto a una excitación sísmica puede ser determinada por el concepto de equilibrio dinámico [2.7]. Del diagrama de cuerpo libre se introduce la fuerza inercial  $f_I$  como se muestra en la figura (2.9 (b)), la ecuación de equilibrio dinámico es:

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (2.16)$$

Solo el movimiento relativo  $u$  entre la masa y la base debido a la deformación estructural produce fuerzas elásticas y de amortiguamiento (la componente cuerpo - rigidez del desplazamiento de la estructura no produce fuerza inercial). Así para un sistema lineal, las ecuaciones (2.2) y (2.7) son válidas. La fuerza inercial  $f_I$  es relacionada con la aceleración  $\ddot{u}^t$  de la masa por:

$$f_I = \ddot{u}^t \quad (2.17)$$

Substituyendo las ecuaciones (2.2), (2.7) y (2.17) en la ecuación (2.16) y usando la ecuación (2.15) se obtiene:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.18)$$

Esta es la ecuación de movimiento que gobierna al desplazamiento relativo o deformación  $u(t)$  de la estructura lineal de la figura 2.10 (a) sujeta a la aceleración del suelo  $\ddot{u}_g(t)$ .

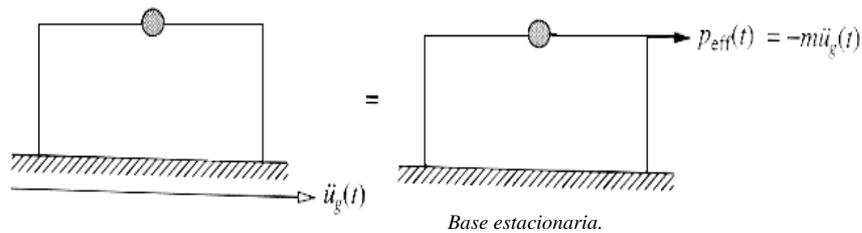
Para un sistema inelástico, la ecuación (2.16) es válida, pero la ecuación (2.2) " $f_s = ku$ " debe ser reemplazada por la ecuación

$$f_s = f_s(u, \dot{u}) \quad (2.19)$$

Donde la ecuación de movimiento resultante es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.20)$$

Las ecuaciones (2.20) y (2.18), muestra que la ecuación de movimiento para la estructura sujeta a dos excitaciones separadas de aceleración de la tierra  $\ddot{u}_g(t)$  y fuerza externa  $f_s = -m\ddot{u}_g(t)$  son únicos e iguales. De aquí, el desplazamiento relativo o deformación  $u(t)$  de la estructura, debido a la aceleración del suelo  $\ddot{u}_g(t)$  sería idéntico al desplazamiento  $u(t)$  de la estructura, si su base fuera estacionaria, y si ésta estuviera sujeta a una fuerza  $f_s = -m\ddot{u}_g(t)$ .



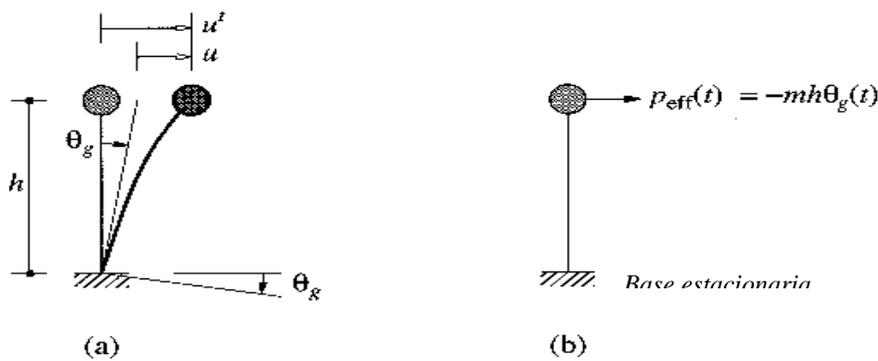
**Figura 2.10 fuerza sísmica efectiva: movimiento horizontal del suelo.**

Como se muestra en la figura 2.10, donde, el movimiento del suelo puede ser representado por la fuerza efectiva del sismo (indicada por *eff*):

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.21)$$

Esta fuerza es igual a la masa - tiempo de la aceleración de la tierra, actuando en sentido opuesto de la aceleración. Es importante reconocer que la fuerza efectiva del sismo es proporcional a la masa de la estructura. De esta forma, el diseño estructural aumenta la fuerza efectiva del sismo, si la masa estructural aumenta.

Aunque las componentes rotacionales del movimiento del suelo no son medibles durante un sismo, éstas pueden ser estimadas por las medidas de las componentes de translación y esto es de interés para aplicar el siguiente concepto que es la excitación. Para este propósito, se considera la torre en voladizo de la figura 2.11 (a) la cual puede ser analizada como un modelo de un péndulo invertido de la figura 2.2 sujeto a una rotación de base  $\theta_g$ .



**Figura 2.11 Fuerza sísmica efectiva: movimiento rotatorio del suelo.**

El desplazamiento total  $u'$  de la masa consta de dos partes:  $u$  asociado con la deformación estructural y una componente del cuerpo rígido  $h\theta_g$  donde  $h$  es la altura de la masa con respecto a la base. En cualquier momento estos desplazamientos son relacionados por:

$$u'(t) = u(t) + h\theta_g(t) \quad (2.22)$$

Las ecuaciones (2.19) y (2.20) son aún válidas, sin embargo la aceleración total  $\ddot{u}'(t)$ , debe ser determinada de la ecuación (2.22). Agrupando todas estas ecuaciones se tiene:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -mh\ddot{\theta}_g(t) \quad (2.23)$$

La fuerza efectiva del sismo asociada con la rotación de la tierra es:

$$p_{eff}(t) = -mh\ddot{\theta}_g(t) \quad (2.24)$$

### 2.5.2 Respuesta sísmica en un Sistema Lineal: Excitación Sísmica

Para propósitos de ingeniería, el tiempo de vibración de la aceleración de la tierra es el camino más usado para definir la sacudida de la tierra durante un sismo. La aceleración del suelo  $\ddot{u}_g(t)$  aparece al lado derecho de la ecuación diferencial (2.21) gobernando la respuesta de estructuras con excitación sísmica. De aquí, para una aceleración del suelo, el problema a ser resuelto es definido completamente por un sistema de un solo grado de libertad con una masa conocida, rigidez y propiedades de amortiguamiento.

El instrumento básico para llevar la anotación de las tres componentes de la sacudida del suelo durante un sismo es el acelerógrafo fuerza – movimiento, el cual no se encuentra grabando continuamente pero es activado por la primera onda al iniciar un sismo [2.8]. Ésto es porque, siempre en regiones sísmicas a lo largo de la superficie terrestre, tales como California y Japón, durante meses y a veces en años, no hay muchos movimientos de tierra fuertes para registrarlos. Consecuentemente, las grabaciones continuas de cientos de estos instrumentos podrían ser ejercicios desperdiciados. Después del accionamiento, la grabación continúa por algunos minutos o hasta que el sismo alcanza niveles de movimiento imperceptibles. Desde luego, los instrumentos continuamente deben recibir mantenimiento para que cuando ocurra una nueva sacudida éstos den una buena lectura.

El elemento básico de un acelerógrafo es un elemento transductor, el cual de manera simple es un sistema de un grado de libertad con un sistema masa – velocidad – amortiguamiento. Por lo tanto, el elemento transductor es representado por esta frecuencia natural  $f_n$  y la relación de amortiguamiento viscoso  $\zeta$ ; típicamente,  $f_n=25\text{Hz}$  y  $\zeta=60\%$  para un acelerógrafo análogo moderno; y  $f_n=50\text{Hz}$  y  $\zeta=70\%$  en un acelerógrafo digital moderno. Estos parámetros del transductor habilitan al instrumento digital para grabar, sin una excesiva distorsión, las funciones aceleración - tiempo con frecuencias menores a 30Hz; el instrumento análogo es exacto en un rango de frecuencia angosto hasta de 15 Hz. [2.9]

### 2.6 Sumario

El estudio de la dinámica de estructuras, Es un rama fundamental de la Ingeniería Mecánica que permite determinar la respuesta de las estructuras a sollicitaciones que varían con el tiempo, es por eso que para fines del presente trabajo se ha hablado en este capítulo sobre los conceptos teóricos fundamentales de la misma, como son la deducción de la ecuación del movimiento en frecuencia libre, con amortiguamiento, con rigidez y para finalizar se formula esta con las cargas externas sísmicas que permiten poner en práctica el caso de estudio, así mismo se considera de manera fundamental encontrar una herramienta de trabajo que posibilite la solución de este problema, por lo que el Método del Elemento Finito es la técnica numérica que se adapta más al caso de estudio debido a su complejidad.

Los métodos dinámicos presentados con anterioridad permiten efectuar el análisis sísmico de estructuras resolviendo las ecuaciones de movimiento, por lo cual, además de las características de rigidez que se emplean en un análisis estático, incluyen las propiedades inerciales y de amortiguamiento. Por otro lado, conviene tener presente que la precisión de un análisis más

refinado depende también de la certidumbre con que se conozcan los datos adicionales requeridos.

Esto permite a su vez, aplicar los conceptos en el siguiente capítulo, que habla acerca de la puesta en marcha de la simulación para los casos de cálculo de extracción frecuencias naturales, simulación del espectro de aceleraciones, expansión de las frecuencias naturales extraídas y finalmente realizar la superposición modal-espectral.

## 2.7 Referencias

- [2.1] **Magdaleno, C**, *Análisis Sísmico Modal*, Talleres Gráficos de la Dirección de Publicaciones y Materiales Educativos del IPN, México, D. F., 1983.
- [2.2] **Anil K. Chopra**, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1995.
- [2.3] **C. E Beards BSc, PhD** ,*Structural Vibration: Analysis and Damping*, , C Eng, MRAeS, MIOA, 1996
- [2.4] **Clough, R. W., and Penzien, J.**, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [2.5] **Enrique B, / Meli, R**, *Diseño Sísmico de Edificios*, Limusa Noriega Editores, Balderas 95, México, D. F., 1999.
- [2.6] **S. Graham Kelly** , *Mechanical Vibrations*, , Schaum's, Mc Graw Hill,1996
- [2.7] **S. Graham Kelly**, *Fundamental of Mechanical Vibrations*, Mc Graw Hill, International Editions 2000
- [2.8] **Paz, M.** *Structural Dynamics: Theory and Computation*. Van Nostrand Reinhold Co. New York, EEUU,(1985).
- [2.9] **Oller-Eduardo, S**, *Respuesta Dinámica de la Estructuras*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Abril 1999



# CAPÍTULO III

## *ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA DE LA CONTENCIÓN PRIMARIA DE UN REACTOR NUCLEAR TIPO BWR.*

---

*En este capítulo, se presenta la metodología empleada para generar el análisis numérico, en la primera parte se exponen las cuestiones que se utilizan para generar espectros de respuesta sísmica, después se muestra como generar un análisis modal para calcular las frecuencias naturales del sistema en estudio, posteriormente se muestra como generar un análisis de espectros, para así finalizar con la aplicación de estas metodologías aplicadas a la contención del reactor nuclear.*

---



para cualquier combinación de cargas estáticas, transitorias y armónicas. Así pues, la escala del tiempo de las cargas es tal, que los efectos inerciales así como los de amortiguamiento son considerados de gran importancia.

### 3.1.1 Concepto de Espectro de Respuesta.

Housner [3.3] desempeñó un papel fundamental en la aceptación generalizada del concepto de espectro de respuesta introducido por Bioton [3.2] en 1932, como un significado práctico de la caracterización del movimiento del suelo y sus efectos en las estructuras. Hoy en día, es un concepto central en la ingeniería sísmica. El espectro de respuesta provee un significado conveniente para resumir todas las posibles respuestas máximas de un sistema lineal de un grado de libertad para una componente particular de un movimiento de tierra. Esto, además provee, un aprovechamiento particular para aplicar el conocimiento de la dinámica estructural para el diseño de estructuras y el desarrollo de requerimientos de fuerzas laterales en códigos de construcción.

Un diagrama del valor máximo de un medidor de respuesta, como una función del periodo natural de frecuencia  $T_n$  del sistema, o un parámetro relativo como una frecuencia circular  $\omega_n$  o frecuencia cíclica  $f_n$ , es llamado "espectro de respuesta" para dicho medidor.

Cada diagrama es para sistemas de un grado de libertad, teniendo una relación de amortiguamiento  $\zeta$ , y varios de estos diagramas para diferentes valores de  $\zeta$  son incluidos para cubrir los valores del rango de amortiguamiento encontrados en estructuras reales. Si la respuesta máxima es graficada de nuevo para  $f_n$  o  $T_n$  es construida amigablemente personalizada.

Una variedad de espectros de respuesta puede ser definida dependiendo de la calidad de respuesta que es graficada. Considerando las siguientes respuestas máximas:

$$u_0(T_n, \zeta) \equiv \max_t |u(t, T_n, \zeta)|$$

$$\dot{u}_0(T_n, \zeta) \equiv \max_t |\dot{u}(t, T_n, \zeta)|$$

$$\ddot{u}_0^t(T_n, \zeta) \equiv \max_t |\ddot{u}^t(t, T_n, \zeta)|$$

El espectro de respuesta de deformación es graficado de  $u_0$  contra  $T_n$  por un arreglo de  $\zeta$ . Un diagrama similar para  $\dot{u}_0$  es el *espectro de respuesta de la velocidad relativa*. Y para  $\ddot{u}_0$  es el *"espectro de respuesta de la aceleración"* [3.3].

### 3.1.2 Espectro Combinado Desplazamiento – Velocidad – Aceleración (D-V-A).

Los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración para movimientos de tierra contienen la misma información. Los tres son simplemente diferentes formas de presentar la misma respuesta estructural. Conociendo tan solo uno de los espectros, los otros dos se pueden obtener mediante operaciones algebraicas como:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.1)$$

y

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (3.2)$$

Donde:

$V$ = velocidad;  $D$ = Desplazamiento;  $T_n$ = Periodo Natural;  $\omega_n$ = Frecuencia Natural:  $A$ = *aceleración*

Entonces, ¿por qué se necesitan tres espectros si cada uno contiene la misma información? Una de las razones es que cada uno de ellos proporciona directamente una cantidad físicamente significativa. El espectro de deformación provee la deformación máxima de un sistema. El espectro de velocidad está directamente relacionado a la energía de tensión máxima almacenada en el sistema durante el terremoto. El espectro de la aceleración es directamente relacionado con el valor máximo de la fuerza estática equivalente que en el presente trabajo se considera un espectro de aceleración constante que estará superpuesto a lo largo de las frecuencias naturales calculadas para el sistema de la contención del reactor.

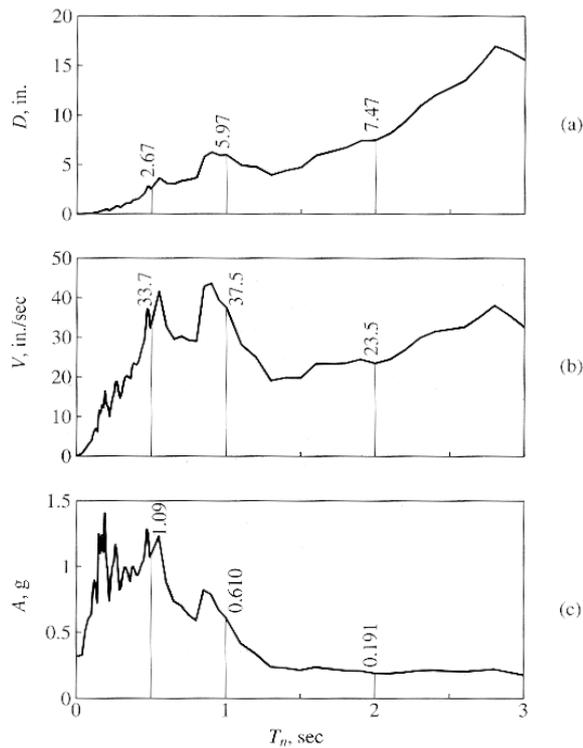
Otra segunda razón es que la forma del espectro puede aproximarse más rápidamente para los propósitos de planeación con la ayuda de las tres cantidades espectrales en lugar de solo uno de ellos. Para este propósito un diagrama combinado muestra las tres cantidades espectrales siendo este especialmente útil. Este tipo de diagrama fue desarrollado para espectros de respuesta sísmica, aparentemente por primera vez por A.S. Veletsos [3.4] Y N.M. Newmark [3.5] en 1960.

Esta presentación integrada es posible debido a que las tres cantidades espectrales son interrelacionadas por las ecuaciones (3.1) y (3.2) reescribiéndolas como:

$$\frac{A}{\omega_n} = V = \omega_n D \quad \text{ó} \quad \frac{T_n}{2\pi} A = V = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.3)$$

A continuación en la figura (3.2) se observan los diagramas espectrales de desplazamiento, velocidad y aceleración del sismo ocurrido en una ciudad de Estados Unidos ( $\zeta = 0.02$ ) [3.6].

Estos diagramas realmente pueden ser combinados y obtener un punto común. El par de datos numéricos de  $V$  y  $T_n$  que fueron representados en la figura 3.2 (b) en una escala lineal son redibujados en la figura 3.3 en una escala logarítmica. Para un periodo natural dado  $T_n$ , los



**Figura 3.2** Espectro de respuesta ( $\zeta = 0.02$ ) del sismo en “El centro”: (a) Espectro de respuesta a la deformación; (b) Espectro de respuesta a la velocidad; (c) espectro de respuesta a la aceleración [3.6].

valores de  $D$  y  $A$  pueden ser leídos en las escalas diagonales. Como ejemplo, para  $T_n = 2s$ . se obtiene que  $D = 7.47p1g$ . y  $A = 0.191g$ , en realidad estos números no pueden ser obtenidos con tanta precisión de la gráfica; en este caso los valores fueron obtenidos de la figura 3.2 y en una forma más compacta se presentan en la figura 3.3.

La medida individual más importante de la respuesta sísmica, es el desplazamiento máximo, ya

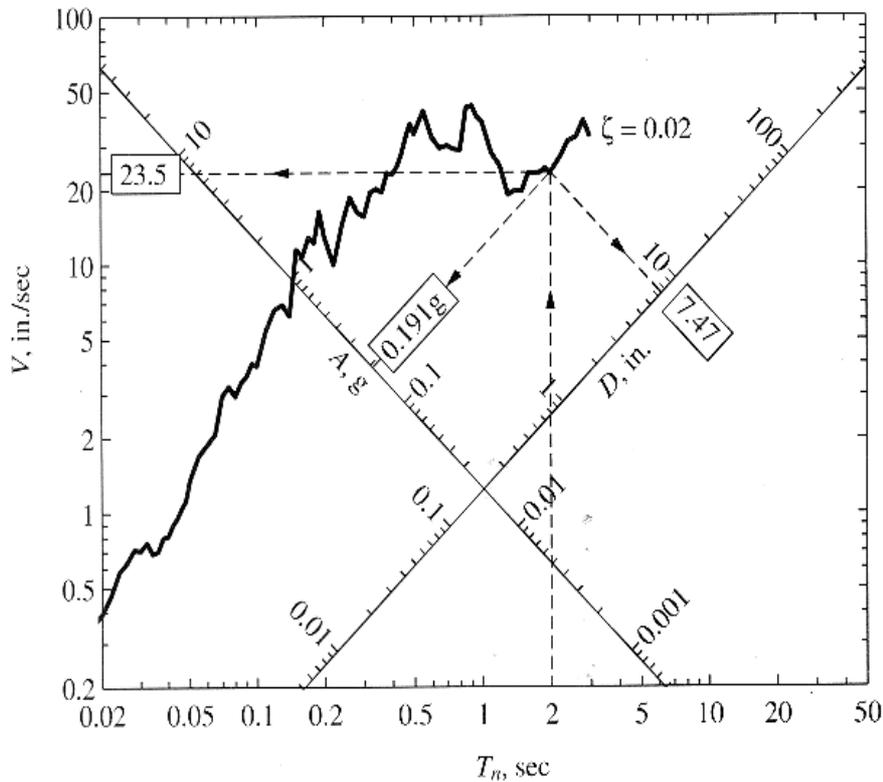


Figura 3.3 Espectro de respuesta combinado  $D - V - A$  ;  $\zeta = 2\%$  [3.6].

que se relaciona directamente con la amplitud de las vibraciones, con daños en elementos estructurales y no estructurales, con posibles impactos a estructuras vecinas, y con las fuerzas y momentos máximos de diseño. En el caso de estructuras no lineales sujetas a temblores severos, se esperan inclusiones significativas más allá del límite elástico y que el desplazamiento máximo excede al de fluencia. Cuando se trata de sistemas elastoplásticos de un grado de libertad, para medir el grado de inclusión en el intervalo de comportamiento inelástico, se usa el *factor de ductilidad* o simplemente *ductilidad*  $\mu$ , definido como el cociente entre el desplazamiento y la fluencia, en este caso la contención del reactor nuclear es un material frágil y por lo tanto no se asocia al este factor antes mencionado, así mismo se hace uso de la teoría de falla del máximo esfuerzo normal [3.7].

Ahora bien, la ecuación (2.10) mostrada en el capítulo dos pone en evidencia que la respuesta sísmica de un sistema lineal elástico de un grado de libertad, depende de su frecuencia de vibración  $\omega$ , o lo que es lo mismo, depende de su período de vibración  $T = 2\pi / \omega$ . Ésto se refleja en que la respuesta máxima de un sistema a un temblor varía principalmente con el período de vibración. La representación gráfica de esta variación se denomina espectro de respuesta.

### 3.2 Análisis Numérico Modal

El análisis modal se utiliza para determinar las características de vibración (frecuencias naturales y modos de forma) de una estructura o un componente de máquina mientras se encuentra en fase de diseño. Este es un punto de partida que se requiere para generar diseños de manera más detallada, estos se presentan bajo sollicitaciones dinámicas, como son, análisis dinámicos transitorios, análisis de respuesta armónica o análisis de espectros, que en el caso del presente trabajo, se hace referencia a este último tipo de análisis, por lo que la carga repentina a la que se sujetará la contención del reactor nuclear a analizar se estudia con el espectro de diseño.

Estas frecuencias naturales y modos de forma son requeridos para caracterizar las condiciones de la estructura bajo las sollicitaciones dinámicas externas, esto con la finalidad de determinar los valores de frecuencias en las que los esfuerzos y desplazamientos se disparan de manera significativa que puedan causar daños a la estructura, a este fenómeno se le denomina *Resonancia Mecánica*.

#### 3.2.1 Modo Natural de Vibración

La dinámica estructural clásica analiza los vibradores elásticos lineales apartados que de la posición de equilibrio por una perturbación momentánea, inician un movimiento vibratorio armónico, es decir que la deformación de la estructura en un instante cualquiera se reproduce idénticamente luego de un lapso fijo: el período del movimiento. También establece que ese movimiento se puede considerar resultante de la superposición de movimientos armónicos simples (senoidales), cada uno con un período y una forma característicos y que el número de movimientos simples es igual al número de grados de libertad del sistema. Cada uno de esos movimientos simples es un “modo natural de vibración” y el período correspondiente es un “período natural”.

Cuando hay amortiguamiento (pequeño) estas consideraciones son válidas con la salvedad de que el movimiento no se repite idénticamente al cabo de un período sino que la forma es semejante porque la amplitud del movimiento disminuye exponencialmente. *El modo natural de vibración de período más largo se llama “Modo fundamental”* o primer modo, por el hecho que es el primero que aparece en la mayoría de los métodos de análisis y que generalmente da una descripción bastante buena del comportamiento de las construcciones corrientes sometidas a terremotos.

Es necesario llamar la atención sobre el hecho que se considera a sistemas linealmente elásticos y con amortiguamiento de tipo viscoso (proporcional a la velocidad). Las estructuras no son linealmente elásticas y las causas de disipación de energía son muy variadas. Algunas son de carácter viscoso pero las más importantes son de otro tipo:

Plastificación, frotamiento, etc. Se podría concluir que las estructuras reales no tienen períodos propios en sentido estricto. Sin embargo, cuando el movimiento del suelo excita la estructura, el estado de esta se puede **representar** por un vibrador lineal con características apropiadas y de ese vibrador se podrán obtener los modos naturales para emplearlos en la representación del comportamiento de la construcción real.

En síntesis, el estudio de los modos de vibración de un sistema, que se llama **Análisis Modal**, permite obtener el período y la forma de cada modo. Por forma del modo se entiende la **relación** de las amplitudes de desplazamiento de los distintos grados de libertad. También se puede obtener el **factor de participación modal** que físicamente representa la energía contenida en el modo cuando la excitación es senoidal unitaria, es el “valor de escala” que mide la importancia del modo en el intercambio total de energía del vibrador complejo.

### **3.2.2 Resonancia**

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo, capaz de vibrar, es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico de dicho cuerpo. En estas circunstancias el cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza. Este efecto puede ser destructivo en algunos materiales rígidos, como el vaso que se rompe cuando una soprano canta y alcanza y sostiene la frecuencia de resonancia del mismo. Por la misma razón, no se permite el paso por puentes de tropas marcando el paso, ya que pueden entrar en resonancia y derrumbarse.

Una forma de poner de manifiesto este fenómeno, consiste en tomar dos diapasones capaces de emitir un sonido de la misma frecuencia y colocados próximos el uno del otro, cuando se hace vibrar uno, el otro emite, de manera espontánea, el mismo sonido, debido a que las ondas sonoras generadas por el primero, presionan a través del aire al segundo. La frecuencia natural de resonancia de un sólido rígido se determina según las leyes de la dinámica de los pequeños movimientos

### **3.2.3 Usos del Análisis Modal**

Las frecuencias naturales y los modos de forma son parámetros fundamentales cuando la estructura o sistema se encuentra bajo cargas dinámicas. Estas, son requisito indispensable cuando uno requiere hacer un análisis de espectros a un análisis de superposición en estado transitorio o bajo cargas armónicas.

Es posible generar análisis modal con estructuras pre-esforzadas, otra característica útil es la simetría cíclica modal, que le permite hacer el cálculo de las frecuencias naturales y modos de forma de una estructura simétrica donde apenas una porción de ella se modela. El presente análisis es simulado en la plataforma Ansys Inc, versión 11.

Como se verá más adelante, este análisis en el estudio sísmico sirve para poder realizar la superposición modal espectral, esta consiste en superponer el espectro de aceleraciones a los valores de frecuencias naturales que hacen susceptible a la estructura del contenedor del reactor nuclear para así calcular la respuesta dinámica total pasando por sus frecuencias de resonancia hasta llegar a los espectros que caracterizaran el movimiento sísmico.

### **3.2.4 Procedimiento Para Generar el Análisis Numérico Modal**

El análisis modal consiste de cuatro principales pasos:

1. Construcción de la geometría
2. Aplicar las condiciones de frontera y obtener la solución
3. Hacer la expansión de los modos
4. Revisar los resultados

#### **3.2.4.1 Construcción del Modelo CAD [3.10].**

Cuando se construye un modelo, se debe recordar lo siguiente:

- Únicamente comportamiento lineal es válido en el análisis modal. Si se especifica alguna no linealidad, esta será tratada como lineal. Por ejemplo si se incluyen elementos de contacto, sus rigideces son calculadas con base en su estado inicial más nunca en su cambio.
- Las características de los materiales pueden ser lineales, isotrópicas, ortotrópicas y constantes o dependientes de su temperatura. Se debe definir módulo de elasticidad (EX) (o bien llamada también la rigidez mecánica) y la densidad (DENS) (o masa de alguna forma dicha) para la generación del análisis modal. Debe recordarse de nuevo, que las propiedades de no linealidad son despreciadas para este análisis. Si se aplica amortiguamiento a la estructura, se debe definir las constantes reales al sistema.

#### **3.2.4.2 Aplicar las Condiciones de Frontera y Obtener la Solución**

En este paso se define el tipo de análisis y las opciones del mismo, se aplican las condiciones de frontera que sujetaran al contenedor del reactor, se aplican las opciones del caso de carga, como son número de frecuencias naturales a extraer y si es necesario se pueden pedir las frecuencias en un rango de valores determinado, en este caso se requieren los primeros modos de vibración y se inicia la solución del elemento finito para la obtención de las frecuencias naturales.

#### **3.2.4.3 Expansión de los Modos**

En el sentido más determinante, el termino expansión significa *expandir la solución reducida de la configuración completa de los grados de libertad*, La solución reducida usualmente está en términos de los grados de libertad. En el análisis modal, sin embargo, nosotros usamos el término para escribir el archivo de resultados de los modos de forma de la estructura. Esto es la Expansión de los Modos y no aplica únicamente a modo reducido de forma [3.10].

### 3.3 Análisis Espectral

Un análisis espectral es aquel donde los resultados de un análisis modal son usados con un espectro para calcular los desplazamientos y esfuerzos en el modelo. Este es principalmente usado en un análisis tiempo-historia para determinar la respuesta de la estructura a cargas aleatorias o condiciones de carga dependiente del tiempo tales condiciones enfocadas a la sacudida de un terremoto, que es el fin del presente trabajo. He de aquí el motivo por el cual se seleccionó este método de análisis numérico.

#### 3.3.1 Tipos de Espectros en el Análisis Numérico

El espectro es una gráfica de varios valores de espectros contra frecuencia que captura la intensidad y el contenido de la frecuencia de la carga tiempo historia. Tres tipos de espectros están disponibles.

- Espectro de respuesta
  - Espectro de respuesta de un solo punto
  - Espectro de respuesta de multipuntos
- Método de análisis de diseño dinámico

#### 3.3.2 Espectro de Respuesta de un Solo Punto

En un análisis de espectro de respuesta de un solo punto, se especifica una curva de espectro de respuesta (o familia de curvas) en una configuración de puntos en el modelo, se menciona que se aplican a todos los soportes del modelo como se muestra en la Fig 3.4a. en este sentido, el presente trabajo se enfoca a este tipo de espectro de respuesta ya que la contención del reactor únicamente tiene una zona de empotre, por lo tanto el espectro solo se aplica a un punto de la estructura del contenedor.

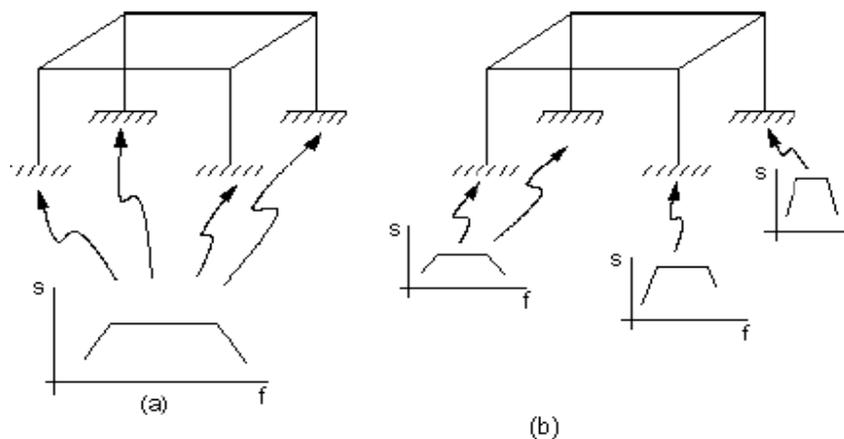


Figura 3.4 a) Espectro de respuesta en un solo punto, b) Espectro de respuesta de multipuntos

### **3.3.3 Espectro de Respuesta de Multipuntos**

En un análisis de espectro de respuesta de multipuntos, se especifica diferentes curvas de espectros de respuesta en diferentes configuraciones de puntos, como se muestra en la figura 3.4b, Con esto se delimitan diferentes condiciones de espectros en cada punto seleccionado. [3.11].

### **3.3.4 Método de Análisis de Diseño Dinámico**

El método de análisis de diseño dinámico es una técnica usada para evaluar la resistencia al impacto de equipo de embarcaciones. La técnica esencialmente es un análisis de espectro de respuesta en que el espectro es obtenido de una serie de ecuaciones empíricas y tablas de diseño de impacto proporcionadas por el laboratorio de investigación de la naval U.S, NRL-1396. Este método no es posible usarlo en el presente trabajo, ya que está enfocado para la obtención de resultados para elementos que estén trabajando a cargas de impacto.

### **3.3.5 Procedimiento Para el Análisis Numérico Espectral**

El procedimiento para generar un análisis de respuesta espectral consiste de seis principales pasos.

1. Construcción del modelo de elementos finitos
2. Obtener la solución modal
3. Obtener la solución espectral
4. Expandir los modos naturales
5. Combinar los modos naturales
6. Revisar los resultados

La solución modal requiere el cálculo de los modos de forma y las frecuencias naturales ya que es un método de superposición y deben estar disponibles para calcular la solución espectral. También, realizando la solución del espectro delante de los modos de expansión, se puede expandir únicamente los modos más significativos que contribuyen a la solución final.

### **3.3.6 Obtención de la Solución Espectral**

El análisis modal debe estar disponible, Para generar la solución espectral para calcular la respuesta a estas solicitaciones.

1. Se debe definir el tipo de análisis, para el caso se debe de especificar un espectro, como se mencionó con anterioridad, el espectro puede ser un espectro de desplazamiento, velocidad o aceleración

2. Se elige la opción de espectro de respuesta de un solo punto
3. Algo importante es elegir el número de modos para poder cubrir el rango de frecuencias que atraviesan por el espectro. La exactitud del análisis depende del número de modos usados. Un número largo de frecuencias dará un alto rango de exactitud, ahora bien, se debe aplicar un comando llamado SPOPT si se requiere calcular los esfuerzos en la estructura.
4. Especifique las opciones de pasos de carga como la dirección de la excitación de la base. Para el presente trabajo se generan excitaciones en las direcciones X,Y para generar una simulación oscilatoria del sismo, también se generará una excitación en el eje de las Z para simular el movimiento trepidatorio de la contención del reactor.

### **3.3.7 Expansión de los Modos Naturales de Vibración**

Se menciona que se deben de expandir los modos sin importar que método de solución se esté generando, ya sea Block Lanczos, Subespacios o método de extracción reducida.

Se debe recordar los siguientes puntos.

1. Únicamente los modos más significativos serán expandidos si así se desea
2. La expansión de los modos son utilizados en la combinación de los modos, he de aquí la importancia de seleccionar que modos serán expandidos.
3. Para fines del trabajo se desean calcular los esfuerzos generados por el espectro de respuesta, así que se desean sean disponibles después de la solución numérica.

### **3.3.8 Combinación de los Modos Naturales de Vibración**

Para generar la combinación de los modos se debe asegurar que métodos son apropiados, para tal efecto se presenta a continuación un listado de los existentes en la actualidad, ello con el fin de abrir más el panorama al lector del presente trabajo, y así mismo poder realizar en el futuro un estudio más exhaustivo.

Por lo tanto, se tienen 4 maneras para generar la combinación de los modos, que son las siguientes:

1. Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados
2. Combinación cuadrática completa
3. Doble suma
4. Agrupado

Los métodos de combinación, se fundamentan en tres formas de representación, espectro de desplazamientos, espectro de velocidades o espectro de aceleración.

El método de combinación, determina como la respuesta modal de la estructura responde a la combinación misma con el espectro.

- Ahora bien cuando nosotros escogemos el desplazamiento como el tipo de respuesta los desplazamientos y esfuerzos son combinados
- Cuando se escoge la velocidad como el tipo de respuesta, la velocidad y esfuerzos son combinados para cada modo en la combinación de modos.
- Así mismo, cuando se soluciona la aceleración como el tipo de respuesta, la aceleración y esfuerzos son combinados para cada modo en la combinación de modos.

En este trabajo se considera el **Método de la Raíz Media Cuadrada de la Suma de los Cuadrados**, Este es el método más simple, el más usado y el más racional (y no necesariamente conservador), donde las respuestas modales se suman usando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados. Las tensiones se calculan siempre usando valores RMS ("*Raíz Media Cuadrada*") [3.12].

Después de generar el paso mostrado en el apartado 3.3.8, se procede a hacer el análisis y evaluación de los resultados obtenidos para cada una de las excitaciones a las que fue sometida la contención del reactor, debemos tener cuidado en saber manipular cada uno de los resultados que vamos a obtener, como así mismo poder manipularlos para llegar a los resultados obtenidos.

### **3.4 Análisis Numérico de la Contención Primaria de un Reactor Nuclear**

Se enfoca en primera instancia al cálculo de las frecuencias naturales del sistema, esto para determinar las más representativas y que harán que la contención sea susceptible de ellas, esto para evitar que se presente resonancia mecánica y así mismo ver las zonas donde existen los mayores desplazamientos de la estructura.

Para fines de análisis al caso de estudio, el equipo de cómputo a emplear tiene las siguientes características:

- Procesador AMD Turión™ 64X2 Mobile, Technology TL-60 a una velocidad de 2.00 GHz y 2.0 GB en memoria RAM
- Disco Duro de 250 GB
- Paquete de Elemento Finito Ansys Classic y Ansys Workbench V11 para Windows XP e Inventor Profesional 2010 Autodesk Inc.

Cabe destacar que estas propiedades de computo fueron bastante eficientes, pero es de comentarse que, una computadora con mayor memoria RAM o ya sea una Estación de Trabajo permitirían mejores tiempos de solución de los análisis calculados en el presente trabajo. La ventaja que se tuvo, es que se hizo el cálculo del dominio completo sin tomar en cuenta la propiedad simétrica que se tiene en la contención del reactor, esto con el equipo de cómputo mencionado en el párrafo anterior. Los tiempos aproximados que se tuvieron en cada análisis variaron entre 25 y 30 minutos.

### **3.4.1 Descripción del Modelo Computacional de la Contención del Reactor Nuclear tipo BWR**

La contención del reactor está compuesta principalmente por una estructura cilíndrica-cónica, dividida en dos partes, la parte superior que tiene la forma cónica se le llama pozo seco y la parte inferior donde está la forma cilíndrica se le llama pozo húmedo.

La estructura tiene una altura de 42.19 metros, un radio interior en la parte superior de la estructura cónica de 4.274 metros, un radio interior de la estructura cilíndrica de aproximadamente 11.55 metros, el espesor de la pared de concreto es de 1.5 metros, así mismo la contención del reactor en su interior está cubierta por placas de acero firmemente soldadas entre sí y ancladas al concreto, dicha cubierta es conocida como "Liner" y asegura una mayor hermeticidad a la contención, es importante hacer notar que para el análisis, no existe un deslizamiento de un material con el otro, pero si se considera en el análisis de elemento finito que están en *contacto*, el espesor del "Liner" es de aproximadamente 9.5 mm en la parte cónica y cilíndrica.

En la figura 3.5 se muestran el plano de la estructura de concreto, en la Figura 3.6, el plano del Liner y en la figura 3.7, el ensamble del Liner y estructura de concreto.

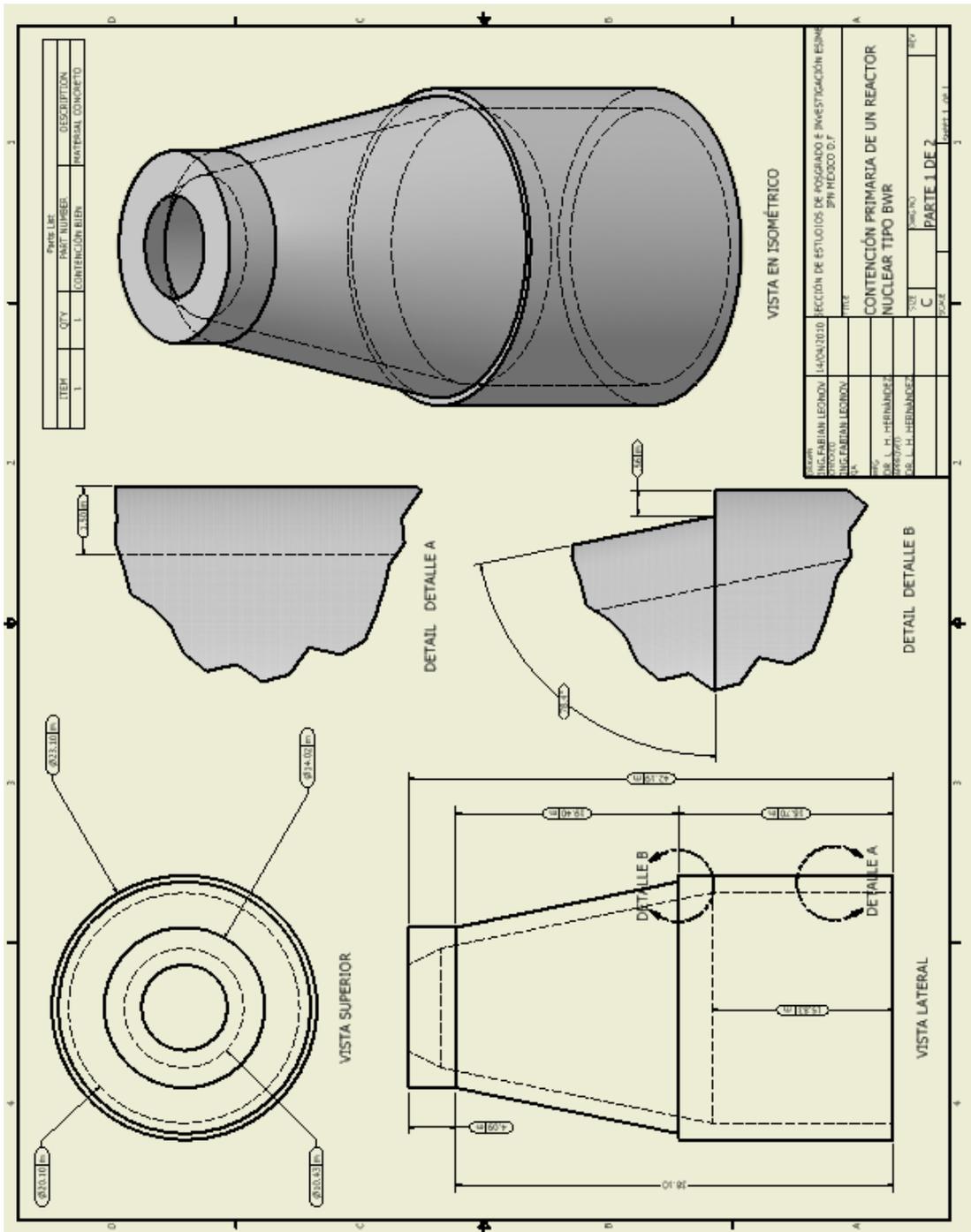


Figura 3.5 Estructura de Concreto

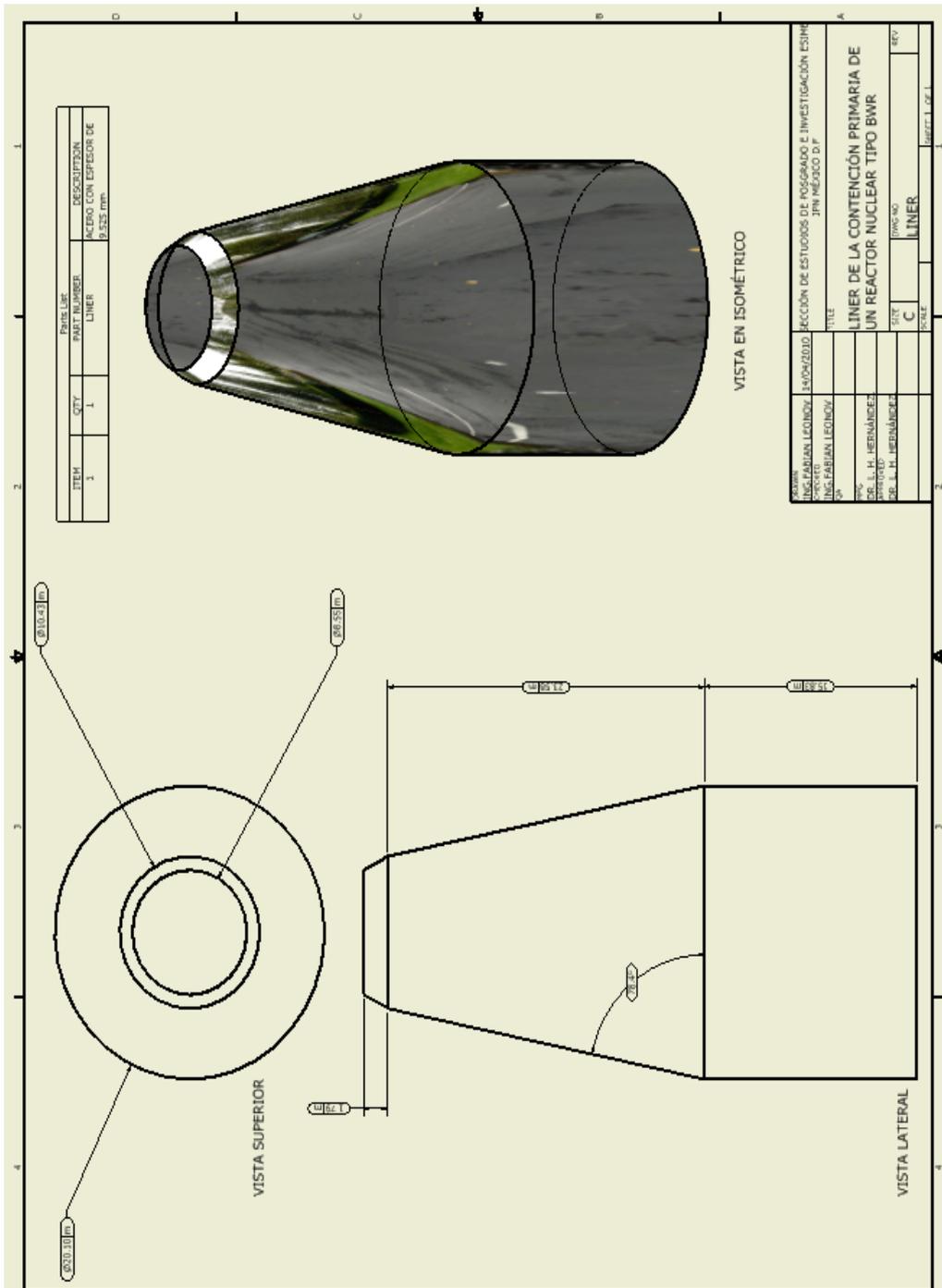


Figura 3.6 Estructura del Liner



*Figura 3.7 Contención del Reactor Nuclear*

### **3.4.2 Propiedades Mecánicas de la Contención del Reactor**

Las propiedades consideradas para el presente análisis se recopilaron en base a la información proporcionada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), para el presente trabajo se requiere del modulo de elasticidad del acero, relación de Poisson, resistencia a la compresión y la densidad.

Gracias a que se considera un contacto entre la estructura de concreto y el Liner es posible hacer una mejor simplificación del caso de estudio.

Como se mencionó con anterioridad el cálculo de frecuencias naturales y análisis de espectros son de naturaleza elástica, es conveniente recordar que el contacto es de naturaleza no lineal, para fines del trabajo y gracias a la teoría del elemento finito se puede clasificar el contacto solo para caso inicial sin propagar una especie de impacto.

- Placa de acero continua (Liner)

La placa de acero interna que se muestra en la figura 3.7, tiene un espesor de aproximadamente 9.95 mm. En la tabla 3.1 se muestran las propiedades mecánicas.

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ESTRUCTURAL	TEMPERATURA °C
Modulo de elasticidad $E_s$ (GPa)	206
Relación de Poisson $\mu$	0.3
Esfuerzo de Fluencia $\sigma_Y$ (MPa)	217.9
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	7850

**Tabla 3.1 Propiedades Mecánicas del Liner para el Analisis Numérico Fuente: Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.**

➤ Estructura de Concreto

La estructura de concreto mostrada en la figura 3.5 cuenta con las siguientes propiedades mecánicas mostradas en la tabla 3.2.

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO	TEMPERATURA °C
Modulo de elasticidad $E_s$ (GPa)	27.7
Relación de Poisson $\mu$	0.24
Resistencia a la Compresión $\sigma_c$ (MPa)	34.32
Densidad	2400 Kg/m <sup>3</sup>

**Tabla 3.2 Propiedades Mecánicas de la Estructura de Concreto empleadas para el Analisis Numérico Fuente: Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.**

### 3.4.3 Consideraciones para el análisis

Se considera lo siguiente para realizar el análisis de la contención del reactor

- Los materiales no presentan ninguna imperfección sobre la estructura de concreto ni el Liner, es decir, las penetraciones de tuberías y equipos que se encuentran en la estructura completa.
- Se consideraran espectros de aceleración con valores de 0.5g, 0.4g y 0.3g en las direcciones X,Y y Z respectivamente, como se indica en la **1.5.2.1**
- El tipo de cargas aplicadas es de naturaleza dinámica
- Se considera que la radiación no es un factor determinante para que la estructura de la contención envejezca, por lo tanto no se supone fragilización de los materiales
- La contención del reactor es simétrica, esto puede permitir que se particione el dominio de estudio y debido a que también es axisimétrica se pudiera plantear solo una porción del mismo, pero gracias a que se tiene el equipo de computo disponible podemos hacer la

simulación del dominio completo para poder revisar los resultados y formas deformadas con mas certeza.

### **3.5 Procedimiento para la Generación del Análisis Modal Espectral**

Esta consiste de varios pasos que se mostraran a continuación para llevar un orden y secuencia de manera adecuada:

1. Se debe hacer la selección de los tipos de elementos a considerar para asignarlos al concreto y Liner, para el concreto se utiliza el elemento llamado SOLID65 y para el Liner se utiliza el elemento llamado SHELL41 [3.9].
2. Se define el espesor de la placa de acero Liner con el elemento SHELL41, mediante una constante real que nos pide Ansys, con esto se simula que la placa está alojada en el interior del concreto.
3. Se dan de alta las propiedades de los materiales, en este caso son dos materiales uno para el concreto y otro para el Liner.
4. Se exportó el ensamble generado en Inventor Professional 2010 al paquete computacional Ansys.
5. Se genera la malla de cada uno de los elementos estructurales
6. Se genera un par de contacto entre el Liner y la contención de concreto para simular la unión entre ellos, este es un contacto deslizante
7. Se asignan las condiciones de frontera
8. Se pide un nuevo análisis, en este caso se pide una **extracción de frecuencias naturales**
9. Se le agregan las opciones al tipo de análisis
10. Solución, donde se obtiene la solución reducida de las frecuencias naturales
11. Se añade otro tipo de análisis, en este caso se asigna un análisis espectral
12. Se pide una análisis de espectro de respuesta de un solo punto
13. Se asigna el espectro de aceleración a las condiciones de frontera asi como la dirección del mismo y el valor del espectro
14. Solución, en este paso no se tiene todavía una solución del sistema
15. Se pide un nuevo análisis, en este caso se pide la **expansión de las frecuencias naturales**
16. Solución, se obtiene la solución completa de las frecuencias naturales basándose en todos sus grados de libertad, lo que no se logra con la **extracción** y también los desplazamientos son calculados a sus diferentes frecuencias de resonancia
17. Se añade de nuevo un análisis espectral y a continuación se hace la **combinación modal-espectral**
18. Solución, aquí se obtienen los esfuerzos requeridos bajo las condiciones sísmicas simuladas
19. Revisión de resultados
20. Repetir del paso 11 al 20 para distintos valores de espectro de aceleración

#### **3.5.1 Malla de la Contención del Reactor Nuclear**

En la figura 3.8, se muestra, el arreglo de la estructura de concreto y el Liner con el tipo de malla a utilizar, y asimismo como se comentó con anterioridad este consta de un par de contacto entre las mismas para así simular la unión perfecta entre ellas.

La generación de la malla de elementos finitos, se considera adecuada, ya que, en el cálculo de las frecuencias naturales, se realizaron las iteraciones necesarias con distintas densidades de malla, logrando así, una convergencia entre los resultados numéricos entre cada caso de análisis.

En este trabajo se reporta que el número de elementos finitos es de 107331 y que el método de malla fue un mapeado con barrido circular, usando elementos de segundo orden para una mayor exactitud.



*Figura 3.8 Generación de la Malla de Elemento Finito de la Contención del Reactor Nuclear*

### **3.5.2 Condiciones de Frontera de la Contención del Reactor Nuclear**

Las Condiciones de Frontera de la Contención del Reactor se ven mostradas en la figura 3.9, se restringe de manera simétrica en todas las direcciones, por lo que el movimiento en la base es nulo, por lo tanto se tienen restricciones en UX, UY, Y UZ para los desplazamientos, y para el presente trabajo se consideran los movimientos radiales o rotacionales libres RX, RY y RZ.

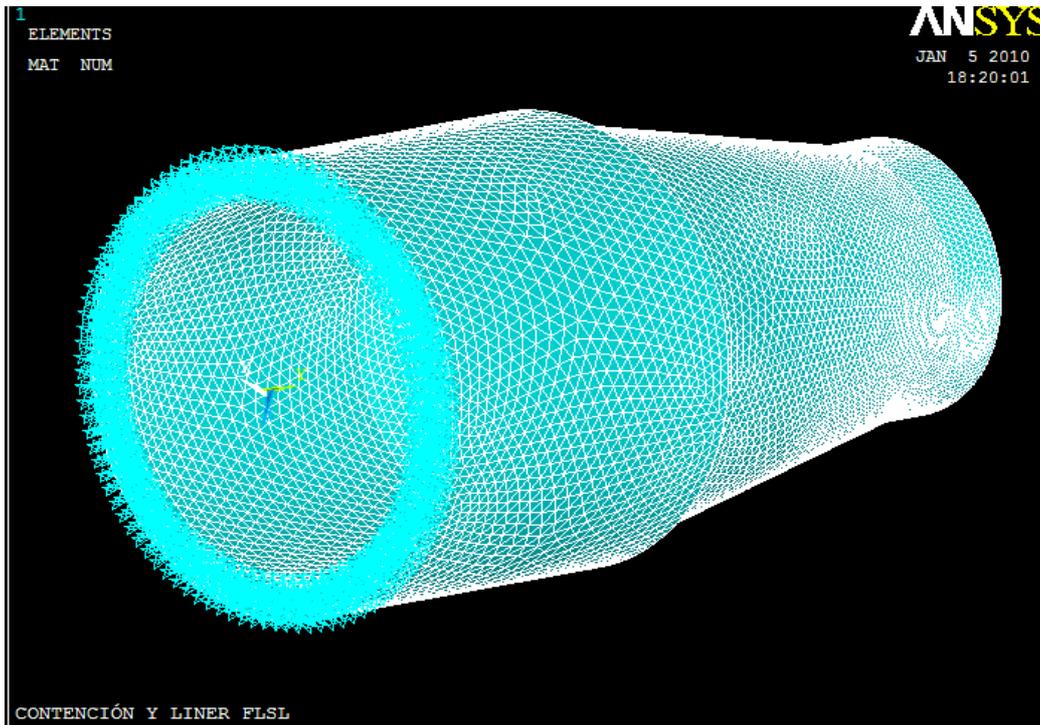


Figura 3.9 Condiciones de Frontera de la Contención del Reactor Nuclear (Empotre Total)

### 3.5.3 Espectro de Aceleración en las Condiciones de Frontera

Aquí se muestra, como se añade el espectro de aceleración en las condiciones de frontera o en la base, para simular el movimiento sísmico de la contención del reactor en una cierta dirección (la deseada) como se ve en las figuras 3.10 y 3.11. **Anexo A, B y C.**

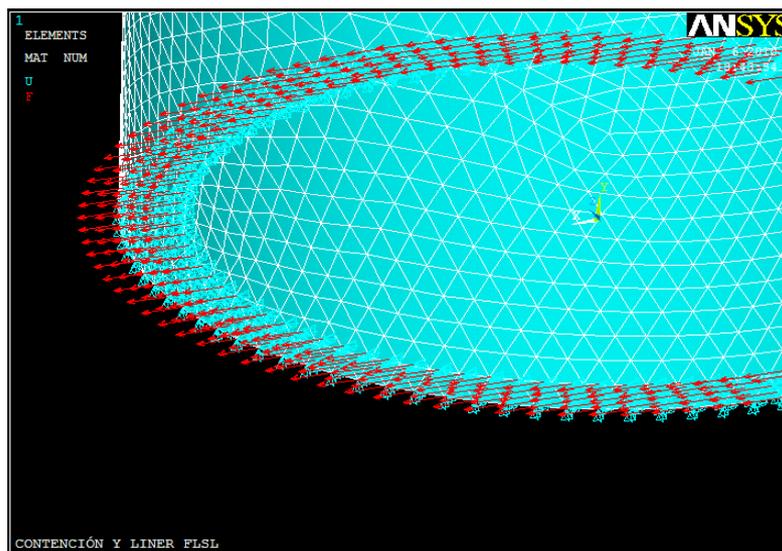
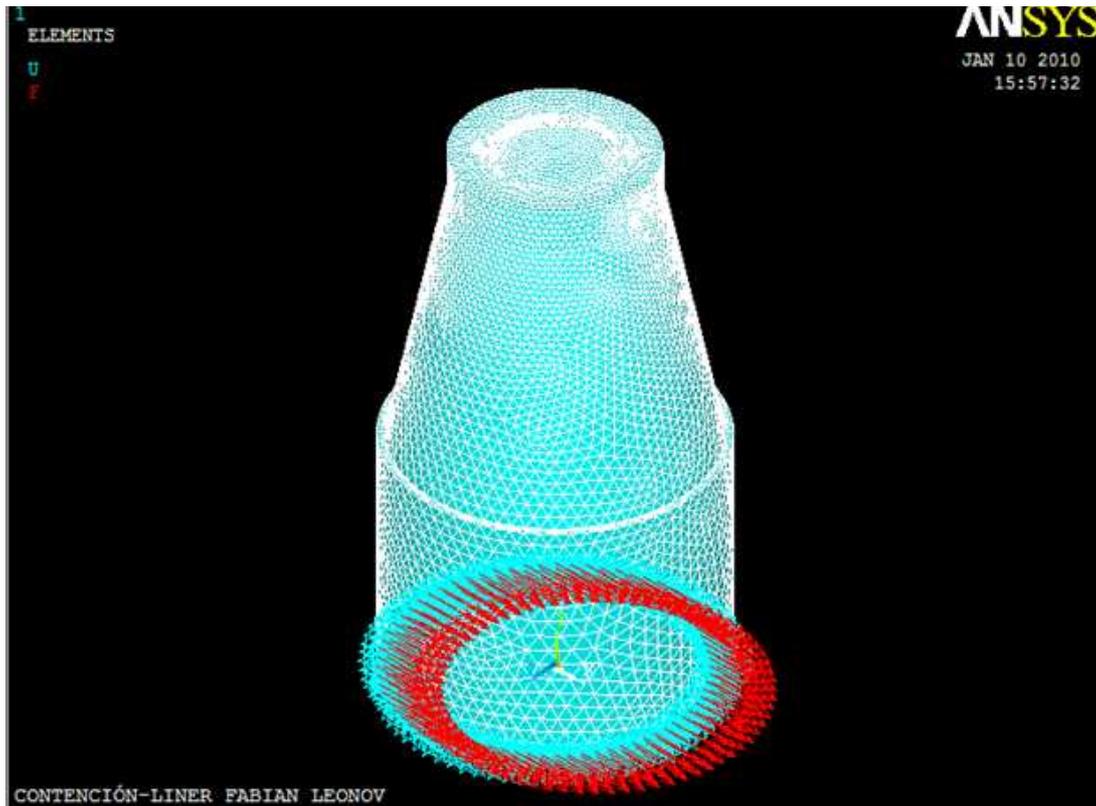


Figura 3.10 Espectro de aceleración de la Contención del Reactor



*Figura 3.11 Espectro de aceleración de la Contención del Reactor para una dirección (ISO)*

### 3.6 Sumario

Una vez de haber definido los conceptos de espectro de aceleración, velocidad, desplazamiento y de asociar cada uno de ellos a la metodología a emplear en el análisis de elemento finito que serán evaluado en la plataforma Ansys Inc., y por otra lado dar, los elementos conceptuales más específicos de espectros en Ansys y métodos de combinación Modal-Espectral que son los aspectos fundamentales de este capítulo. Se tiene de esta forma, la pauta para seguir con las simulaciones de la Contención del Reactor bajo las distintas sollicitaciones ya comentadas en el capítulo I y asimismo generar distintos escenarios a los que se sujetará el edificio contenedor.

Por consiguiente, en el capítulo IV se hace un estudio minucioso de los resultados numéricos arrojados de cada simulación generada, para así evaluarlos y determinar las condiciones de seguridad e integridad estructural del contenedor primario bajo distintos movimientos en su base y con esto tomar las medidas pertinentes en un futuro basandonos en las determinaciones tomadas en el capítulo.

### 3.7 Referencias

- [3.1] **Clough, R. W., and Penzien, J.**, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [3.2] **Bioton, M. A.**, “Theory of Elastic Systems under Transient Loading with an Application to Earthquake Proof Buildings”, *Proceedings, National Academy of Sciences*, 1932, pp. 262-268.
- [3.3] **Housner, G. W.**, “Calculating the Response of an Oscillator to Arbitrary Ground Motion”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 31, 1941, pp. 143-149.
- [3.4] **Veletsos, A. S., and Newmark, N. M.**, “Response Spectra for Single-Degree-of-Freedom Elastic and Inelastic Systems”, *Report No. RTD-TDR-63-3096, Vol III, Air Force Weapons Laboratory, Albuquerque, N. Mex., June 1964.*
- [3.5] **Newmark, N. M., and Hall, W. J.**, *Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkely, Calif., 1982, pp. 29-37.*
- [3.6] **Anonymous**, *El Centro, 1940 Grand Motion*, <http://www.ftpnisee.ce.berkeley.edu.mx>, published by A. K. Chopra, in Internet.
- [3.7] **Shigley, J.E, Mischke C. R**, *Diseño en Ingeniería Mecánica, Sexta Edición, Ed. Mc Graw Hill año 2005*
- [3.8] **Recuperado de:** <http://www.arqhys.com/peso-unitario-concreto.html>
- [3.9] **Análisis de Esfuerzos de la Contención Primaria tipo Mark II de un Reactor Nuclear de Agua en Ebullición BWR**, Ing. Noel moreno Cuahquetzi, ESIME IPN México Distrito Federa, 2002
- [3.10] **ANSYS Structural Analysis Guide**, November 2004, ANSYS, Inc. is, ISO 9001: 2000 Company.
- [3.11] **Bolt, B. A.** (1999). “*Earthquakes*”, W. H Freeman And Company, Fourth Edition, New York
- [3.12] **Prato C. A, Ceballos M. A, Pinto F.** *Método Modal Espectral*, año 2009, España.



# CAPÍTULO IV

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

---

*En este capítulo, se hace énfasis a la evaluación y resultados de la metodología aplicada al análisis de la contención del reactor, aquí se muestran los resultados numéricos así como las imágenes de cada uno de ellos, Estos para determinar si la estructura está dentro de los límites permitidos de integridad estructural.*

---

#### 4.1 Cálculo de las Frecuencias Naturales de la Contención del Reactor Nuclear tipo BWR

El análisis realizado en el presente trabajo, muestra los resultados de las simulaciones generadas a una Contención de un Reactor Nuclear tipo BWR, En primera instancia los resultados del cálculo de las frecuencias naturales para así proceder a excitar a la contención en su base con un espectro de aceleración en distintas direcciones y con diferentes valores de aceleración. Esto permite para poder caracterizar a la estructura completa en su fase final con un análisis Modal-Espectral y así obtener la respuesta real de la estructura obteniendo resultados de desplazamientos y esfuerzos para cada frecuencia natural calculada y su espectro simultáneamente.

##### 4.1.1 Resultados de las Frecuencias Naturales

Se procedió a calcular 15 frecuencias naturales esto ya que las estructuras de gran altura, tienen su modo fundamental a baja frecuencia y a partir de la primera, se asignan otras más para hacer la superposición modal espectral, cabe destacar que entre más frecuencias se combinen con el espectro más certeros serán los resultados del análisis.

En la tabla 4.1, se muestran los valores en hertz de las 5 frecuencias naturales calculadas en la primera fase del análisis numérico, se tiene la certeza que estas son suficientes para delimitar el problema.

Número de Frecuencia	Valor de la frecuencia (Hz)
1	7.17980
2	7.18000
3	12.3720
4	12.3723
5	17.6840

**Tabla 4.1 Frecuencias Naturales de la Contención del Reactor Nuclear tipo BWR**

Asimismo para reportar los primeros resultados que serán de gran interés en el análisis, se hará una lista de valores de desplazamientos en los ejes "X", "Y" y "Z" para cada una de las frecuencias naturales calculadas, ver tabla 4.2.

Estos desplazamientos se ven evaluados en la zona más alejada de las condiciones de frontera especificadas, ya que, es ahí donde se presentan los máximos.

Cabe destacar que este tipo de análisis solo reporta desplazamientos, por lo que, únicamente se mostraran ellos, se requieren para caracterizar en cualquier momento cual es el efecto de esas frecuencias en posibles excitaciones externas futuras en la contención del reactor.

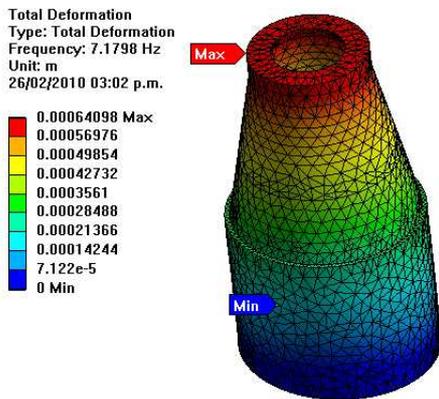
Frecuencia	Desplazamiento en X (mm)	Desplazamiento en Y (mm)	Desplazamiento en Z (mm)	Desplazamiento Máximo (mm)
1	0.634730	0.121210	-0.017926	<b>0.64194</b>
2	0.017831	0.121240	0.634840	<b>0.64207</b>
3	0.515800	-0.126440	0.515310	<b>0.62839</b>
4	-0.608600	-0.125750	0.612470	<b>0.62867</b>

5	-0.461740	-0.000276	0.462030	<b>0.46208</b>
6	0.635080	0.318790	-0.026414	<b>0.70011</b>
7	0.026521	0.319520	0.638840	<b>0.70309</b>
8	0.095896	0.516730	0.091601	<b>0.51680</b>
9	0.766220	-0.152640	0.766410	<b>0.77145</b>
10	0.618140	-0.152380	0.617960	<b>0.76383</b>
11	0.588630	0.135550	0.655240	<b>0.65881</b>
12	0.640740	-0.135970	-0.595930	<b>0.65695</b>
13	0.955730	-0.229210	0.952310	<b>0.95915</b>
14	0.771290	0.227450	0.771810	<b>0.96135</b>
15	0.687520	-0.183780	-0.669840	<b>0.71282</b>

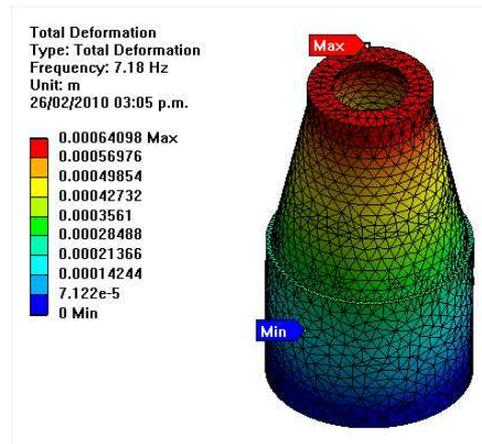
**Tabla 4.2 Desplazamientos de la Contención del Reactor Nuclear que pertenecen a cada Frecuencia Natural**

En la tabla 4.1, se muestra, que el modo natural 1 y 2, presentan valores similares, esto es porque en vibraciones mecánicas, cuando se tienen geometrías totalmente simétricas y axisimétricas, se tiende a tener los modos naturales ortogonales, esto quiere decir que existen dos modos o hasta cuatro con frecuencias casi iguales pero con diferentes direcciones en los desplazamientos, estas son contrarias en cada modo.

A continuación se muestran en las Fig 4.1 a 4.5 los modos de forma de cada una de las frecuencias calculadas en el presente análisis, con sus respectivos valores de frecuencia. Cabe destacar que la orientación de cada imagen es la misma, esto para ver el efecto que tienen cada una de las frecuencias naturales.



**Fig 4.1 Modo 1 > 7.1798 Hz**



**Fig 4.2 Modo 2 > 7.18 Hz**

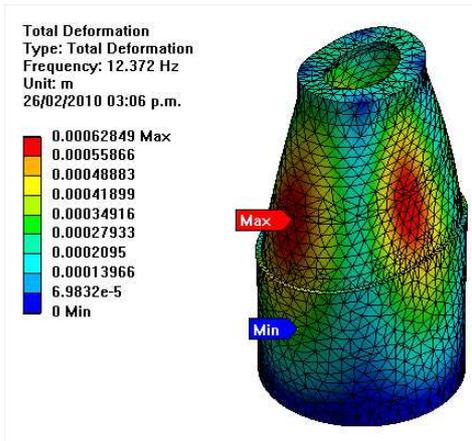


Fig 4.3 Modo 3 > 12.372 Hz

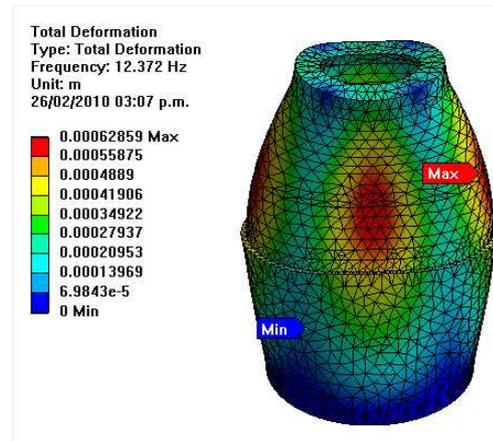


Fig 4.4 Modo 4 > 12.373 Hz

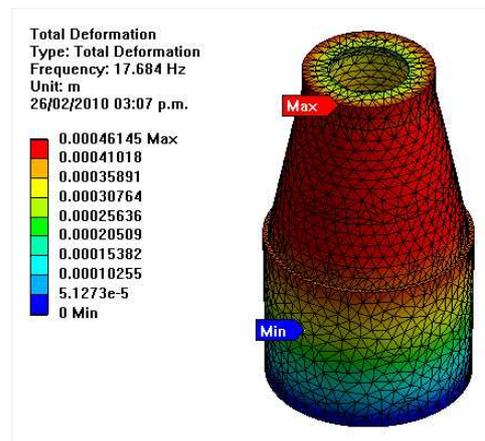


Fig 4.5 Modo 5 > 17.684 Hz

## 4.2 Análisis Espectral a la Contención del Reactor Nuclear Tipo BWR

Como se mencionó en el capítulo III, después de hacer el cálculo de las frecuencias naturales a la Contención del Reactor, se debe realizar el análisis de espectros para calcular la respuesta a distintas sollicitaciones dinámicas.

### 4.2.1 Análisis de resultados de la Contención del Reactor Nuclear

En este apartado se dan los resultados obtenidos en un análisis de espectros en la dirección X, Y y Z con un valor de 0.5g, 0.4g y 0.3g, respectivamente que caracterizará a la estructura de la contención del reactor.

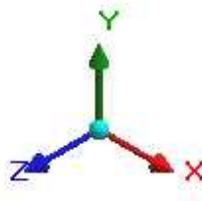
Se muestran los máximos y mínimos esfuerzos normales correspondientes a cada evento al que estará sujeta la Contención del Reactor, esto con la finalidad de prever en el material frágil

(concreto) su posible falla, este trabajo no reportará esfuerzos de Von Mises, ya que es despreciable el espesor de Liner con respecto al del concreto, por lo tanto los esfuerzos presentados en este último no representan daño alguno, ya que el Liner solo funge como protector radiactivo de la contención.

Además, en este trabajo se desarrolló utilizando el tipo de respuesta de un solo punto visto en la sección **3.3.2**, y para combinar los modos, se utilizó el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la sección **3.3.8**, considerando un amortiguamiento del 5% que es normalmente utilizado en estructuras de concreto reforzado, basados en pruebas experimentales para caracterizar este fenómeno **[4.5]**.

En las figuras 4.7 a 4.15 se muestran los esfuerzos de la estructura de la contención del reactor nuclear tipo BWR, asimismo solo se ven las figuras donde los esfuerzos son máximos, y también se caracterizan los modos de forma respectivos a cada uno de los sismos simulados y sus respectivos espectros de aceleración.

Las figuras 4.7 a 4.15 se referencian en base al siguiente eje coordenado mostrado en la figura 4.6, para así poder ver las direcciones de los esfuerzos presentes en cada imagen.



*Fig 4.6 Eje Coordenado*

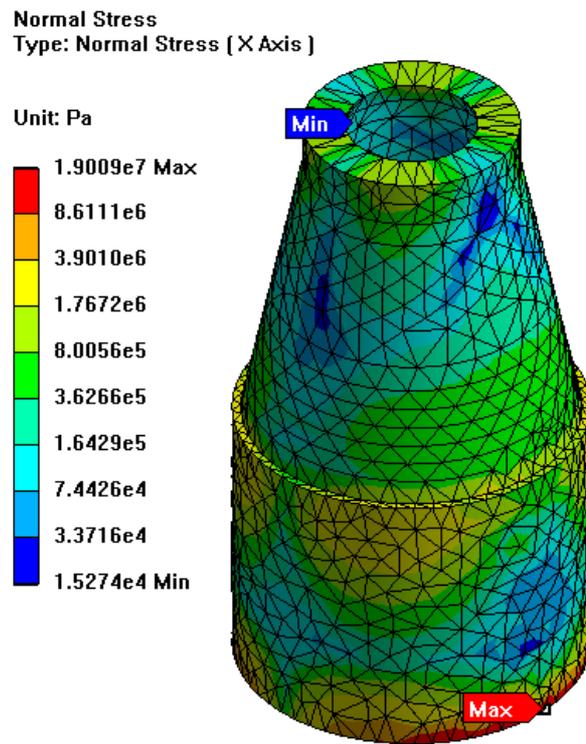


Fig 4.7 Excitación de la Estructura con 0.5g 19.00 MPa Excitación en “X”

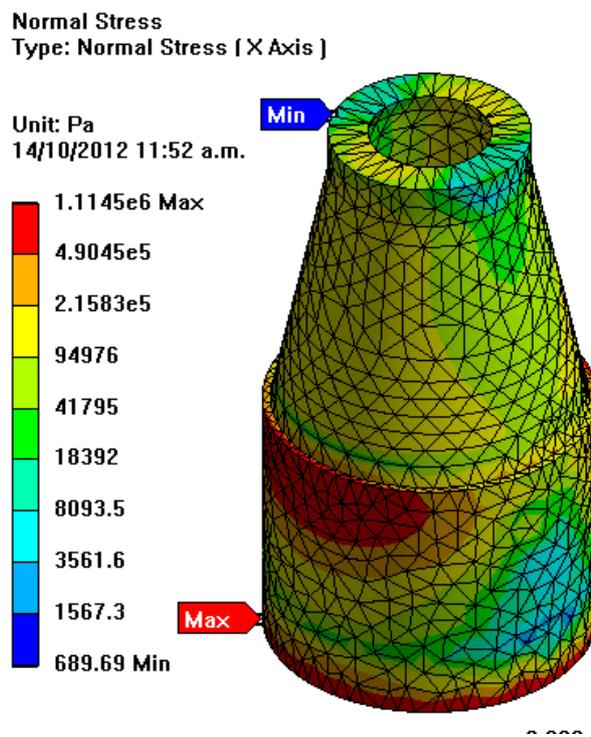


Fig 4.8 Excitación de la Estructura con 0.5g 11.14 MPa Excitación en “Y”

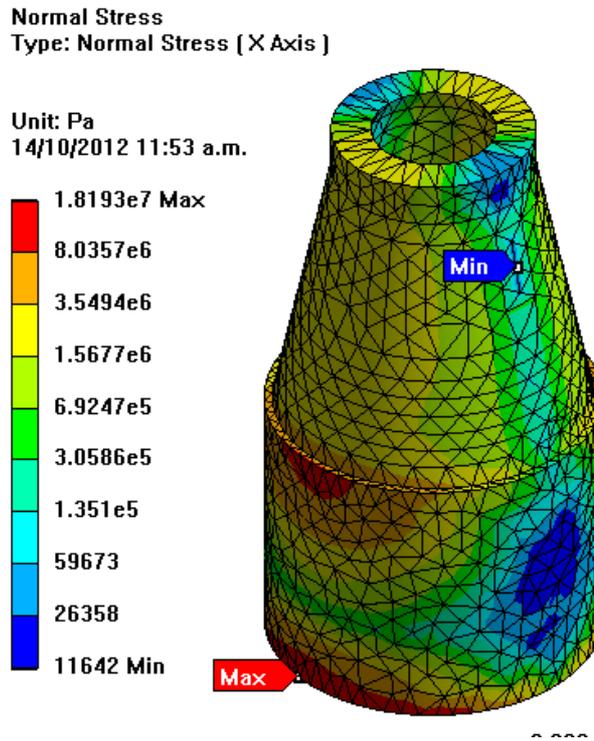


Fig 4.9 Excitación de la Estructura con 0.5g 18.19 MPa Excitación en “Z”

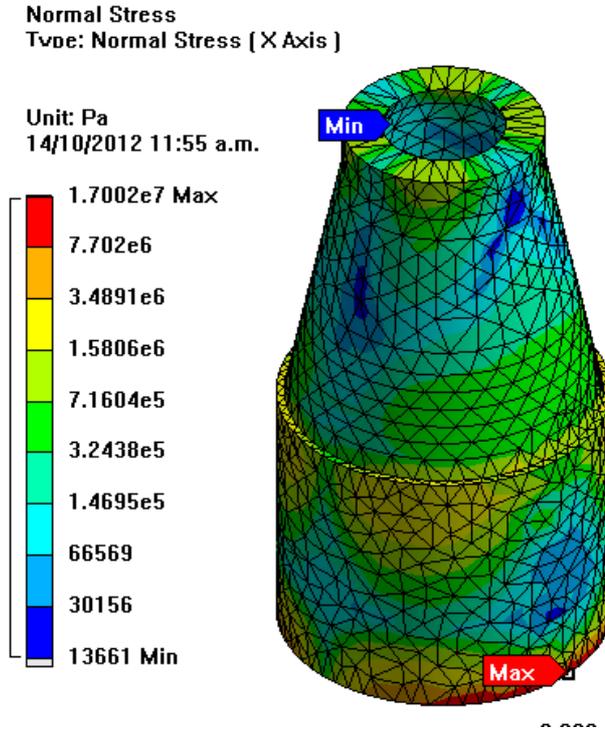


Fig 4.10 Excitación de la Estructura con 0.4g, 17.00 MPa Excitación en “X”

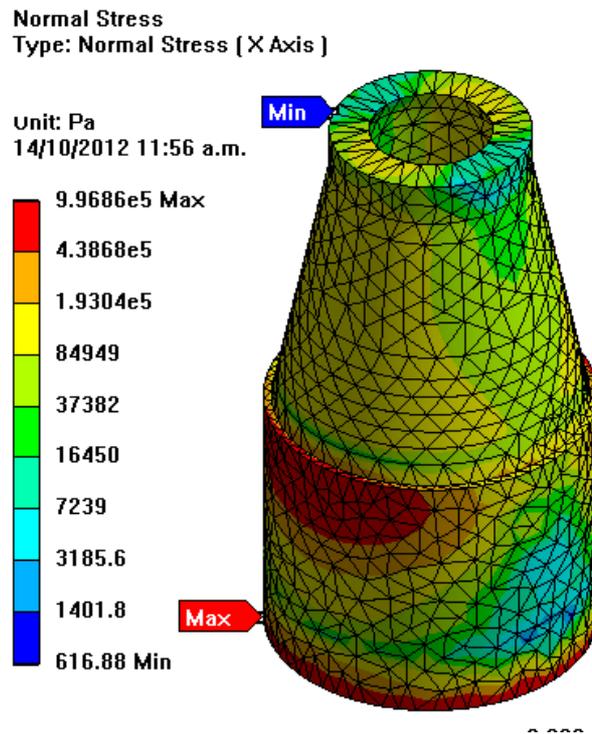


Fig 4.11 Excitación de la Estructura con 0.4g, 0.9968 MPa Excitación en “Y”

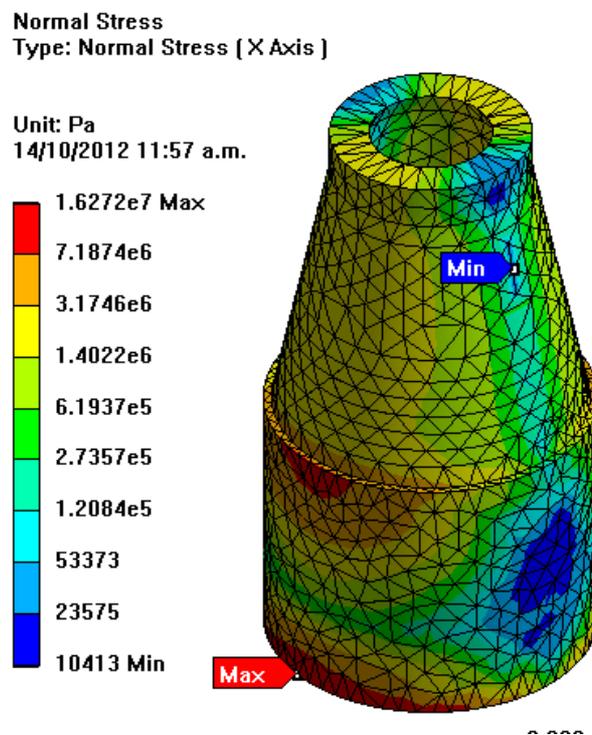


Fig 4.12 Excitación de la Estructura con 0.4g, 16.27 MPa Excitación en “Z”

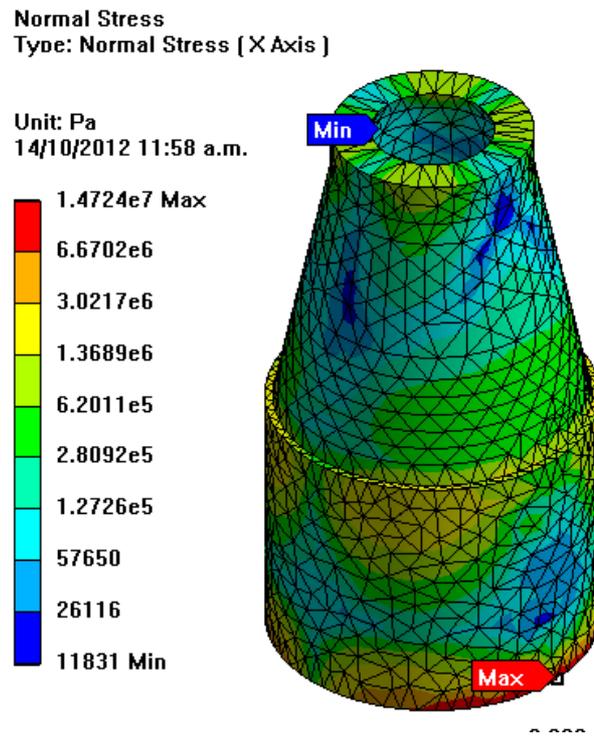


Fig 4.13 Excitación de la Estructura con 0.3g, 35.36 MPa Excitación en “X”

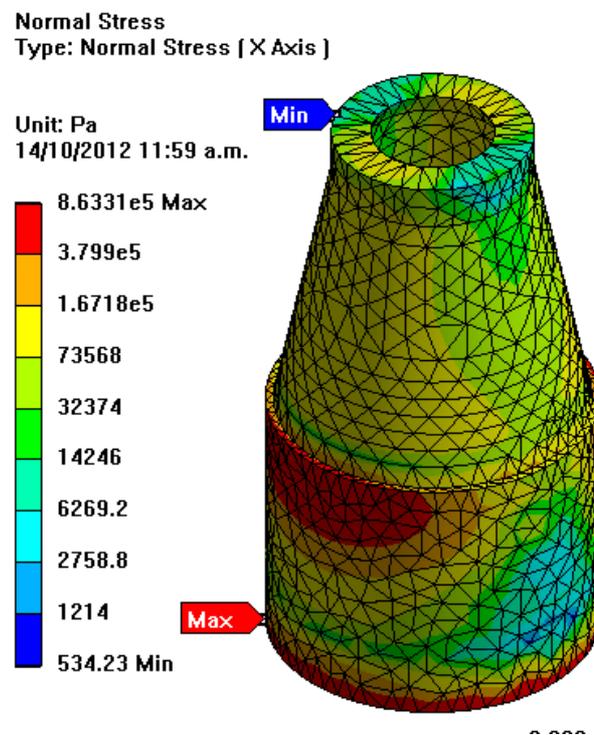


Fig 4.14 Excitación de la Estructura con 0.3g, 0.863 MPa Excitación en “Y”

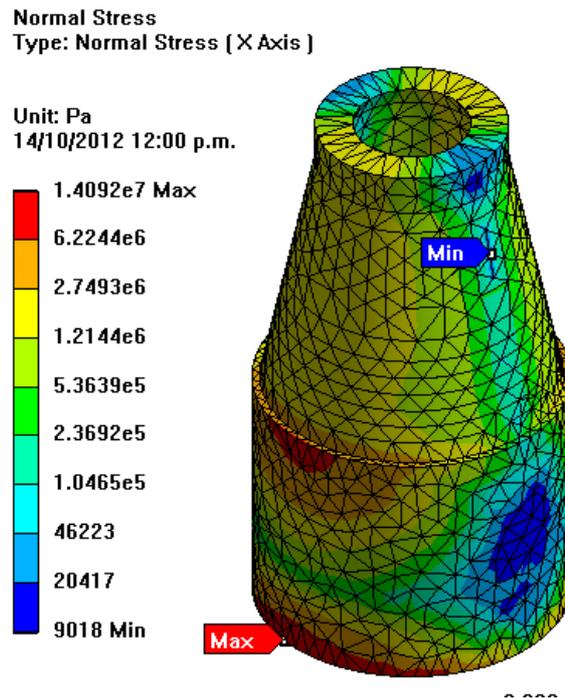


Fig 4.15 Excitación de la Estructura con 0.3g, 14.00 MPa Excitación en “Z”

#### 4.3 Análisis de Resultados

En esta sección se muestran los resultados de los análisis de elementos finitos a los que se sujeto la contención del reactor, recordemos que es del tipo dinámico Modal-Espectral por tal motivo se efectuaron en primera instancia el Análisis de Frecuencias Naturales a la contención para así saber qué frecuencias hacen susceptible a la estructura para entrar en resonancia, asimismo para completar este trabajo se procedió a hacer el cálculo modal-espectral de la estructura sometiéndola a valores de 0.5g, 0.4g y 0.3g en los ejes X,Y y Z respectivamente, las tablas 4.3 a 4.5 muestran estos valores y los esfuerzos normales principales calculados para cada caso.

EJE DE EXCITACIÓN	ESFUERZO NORMAL PRINCIPAL (MPa)	ESPECTRO DE ACELERACIÓN (% Gravedad)
“X”	19.00	0.5g
“Y”	1.11	0.5g
“Z”	18.19	0.5g

Tabla 4.3 Esfuerzos normales principales para 0.5g

EJE DE EXCITACIÓN	ESFUERZO NORMAL PRINCIPAL (MPa)	ESPECTRO DE ACELERACIÓN (% Gravedad)
“X”	17.00	0.4g
“Y”	0.996	0.4g
“Z”	16.27	0.4g

Tabla 4.4 Esfuerzos normales principales para 0.4g

EJE DE EXCITACIÓN	ESFUERZO NORMAL PRINCIPAL (MPa)	ESPECTRO DE ACELERACIÓN (% Gravedad)
"X"	14.72	0.3g
"Y"	0.863	0.3g
"Z"	14.09	0.3g

**Tabla 4.5 Esfuerzos normales principales para 0.3g**

El análisis modal en sus modos de forma refleja que las zonas más alejadas del empotre de la contención son las que sufren los máximos desplazamientos, esto es fácil de deducir ya que uno de los principales aspectos que afecta la rigidez de un edificio como el del contenedor es que entre más altura tiende a ser más flexible y por lo tanto presenta generalmente frecuencias de baja intensidad comparados con estructuras de baja altura, ver figura 4.16, ahora bien, también analizando dicha cuestión como se denota en las figuras extraídas del análisis espectral se puede apreciar que los esfuerzos normales se presentan en la zona de empotre.



**Fig 4.16 rigidez afectada por la altura [4.1]**

En tabla 4.3, se somete a la estructura de la contención a 0.5g en el eje X, podemos ver que a este valor los esfuerzos no sobrepasan la resistencia a la compresión del concreto, cabe destacar que este análisis se generó considerando un contacto entre la contención y el Liner simultáneamente, por lo tanto toda se considera como un continuo, para esto la estructura del contenedor a esta excitación no fallaría en su parte de concreto, esto quiere decir que no hay grietas ni falla inminente que haga llegar a su colapso, asimismo gracias a que la estructura del contenedor es simétrica los esfuerzos en las direcciones "X" y "Z" son los mismos, solo cambia la ubicación del esfuerzo máximo que a cada uno le corresponde en función del eje de aplicación, también se aprecia que los esfuerzos disminuyen considerablemente en la dirección "Y", esto es porque, la contención del reactor no tiene elementos en voladizo que generen brazos de palanca y provoquen cargas de torsión que provengan serios daños a la estructura, con esto se justifica el hecho de que el espectro en esta dirección solo se estudia en la presencia de momentos torsionantes. Por lo tanto, como se verá en cada caso de estudio, los resultados de las aceleraciones en "X" y "Z" siempre serán valores grandes comparándolos con los de la aceleración en "Y". Cabe destacar que se simulan casos de movimientos oscilatorios ("X" y "Z") y trepidatorios ("Y").

En la tabla 4.5, se tiene una excitación de 0.4g, vemos que su esfuerzo máximo de igual manera no sobrepasa la resistencia a la compresión del concreto por lo tanto está excitación no es dañina para el contenedor primario.

En la tabla 4.6 donde la aplicación del espectro de aceleración fue de 0.3 g, los resultados mostrados por ende serán menores a los mencionados con anterioridad, por lo tanto no tenemos problema alguno.

Los espectros de 0.5g, 0.4g y 0.3g no generan en la estructura del contenedor un estado de falla, gracias a que estas aceleraciones no enfatizan valores arriba de la resistencia del concreto. Es recomendable obtener un historial de aceleraciones máximas reportadas en la zona donde se encuentra el contenedor del reactor nuclear para así comparar con los resultados obtenidos.

#### **4.4 Referencias**

- [4.1] Recuperado de: <http://www.itc.nl/external/unescorapca/AmenazaSismica.html>
- [4.2] Ansys Elements, *Reference Release 11.0, August 2008*
- [4.3] Kurt G. *“Manual de Formulas Técnicas”, Alfaomega, 19ª. Edición 2005*
- [4.4] Murray R. Spiegel, *“Manual de Formulas y Tablas Matemáticas”, Serie Schaum`s, Mc Graw-Hill, 2007*
- [4.5] Soto Torres L.M, *Amortiguamiento en Estructuras de Concreto Reforzado, Julio de 2001*

## **CONCLUSIONES:**

El hacer un análisis de esfuerzos dinámicos generados por un sismo no es una tarea fácil, sobretodo si la estructura es de geometría compleja, como es el caso de la contención del reactor aquí analizado. En el caso de las pruebas experimentales, se requeriría una mesa que soporte por lo menos una carga aproximada al peso del Liner y la estructura de concreto, además de las fuerzas inerciales que estas masas generarían al ser excitadas, esto requiere de una gran cantidad de recursos, lo cual limita la factibilidad, por lo tanto, el camino idóneo es la parte numérica.

De manera alternativa, este trabajo se ve apoyado por el análisis numérico usando el método del elemento finito.

Debe destacarse que la complejidad de los presentes análisis numéricos es alta, ya que por un lado, el tiempo de preproceso y solución requiere de grandes cantidades de tiempo, consecuentemente el tema requiere de bastantes conocimientos de mecánica de materiales, vibraciones mecánicas, ciencia de materiales, ingeniería sísmica y diseño en ingeniería mecánica, por lo que el lector debe familiarizarse con los términos y las teorías aquí presentadas.

Asímismo, se debe tener en cuenta que el presente trabajo fue desarrollado con tres plataformas, dos de ellas, son programas de análisis numérico usando el método del elemento finito como son Ansys y Abaqus y el otro, es Autodesk Inventor Professional 2009, que es de modelado de sólidos y los dibujos de ingeniería.

La generación de la geometría del Liner y la contención del reactor se realizo en el programa Inventor, y gracias a que este trabaja bastantes extensiones para hacer su exportación a otro programa se selecciono una extensión llamada .SAT, está es un modelador geométrico llamado ACIS, que posee una arquitectura abierta y orientada a objetos, en programación "C", lo cual permite generar modelamiento de sólidos con gran robustez tomando en cuenta topologías con variedad de formas y permite que el programa Abaqus y Ansys hagan un intercambio de sólidos complejos, tomando en cuenta también si están ensamblados o son partes únicas. Por lo tanto, se hace el preprocesamiento de la malla y condiciones de contacto en la plataforma Abaqus, para después guardar el archivo con extensión .INP, que será utilizado e importado desde Ansys con la tarea llamada "Link to Abaqus input", este es un archivo de entrada que transforma el preproceso de Abaqus a Ansys para dar solución al problema numérico, es importante destacar que esto es un trabajo complejo, así de esta manera, el lector debe tener conocimientos avanzados de los programas en cuestión.

Los resultados obtenidos se consideran de bastante exactitud, a pesar de que no se hicieron simplificaciones importantes, se debe tener en cuenta, que una correlación numérico experimental podría dar un resultad más satisfactorio, por un lado, se justifica que se trabajo con el termino convergencia, está permite llevar al error a un valor bastante bajo, y se ve presente en el preproceso mostrado en la generación de la malla de elemento finito, y por el otro, se han venido considerando el arreglo de varillas helicoidales, las cuales son parte de la contención del reactor nuclear y las condiciones de contacto sin fricción que se presentan en la unión existente entre el contenedor-Liner y contenedor-varillas, de igual manera, se considera generar el análisis del continuo completo, ya que, no es conveniente hacer simetría para estas simulaciones, por que

los modos de forma requieren ver los desplazamientos en todas las direcciones a las distintas frecuencias calculadas, lo cual, no se apreciaría formalmente haciendo estas simplificaciones.

Con esto se concluye que, las formas de falla que se presentan en la contención del reactor se ven con énfasis en la parte de concreto de la contención, por lo que el Liner, solo es una chapa metálica, que su función primordial es asegurar un alto nivel de estanqueidad de las radiaciones que emite el reactor y para las zonas que tengan contacto con el agua, de esta manera se justifica que los resultados numéricos estén enfocados al concreto, Así de esta manera la Falla probable se ve caracterizada por la del tipo *Frágil*, esta se ve apoyada por la teoría del máximo esfuerzo normal aplicado a la estructura, para así hacer la comparación con las resistencias de los materiales, las cuales fueron proporcionadas por la comisión nacional de seguridad nuclear y salvaguardias.

De las figuras que muestran los esfuerzos a los que se sujeta la contención del reactor bajo cada escenario sísmico, se puede ver, que los puntos críticos en todos los casos de estudio, están dentro de los límites de las condiciones de frontera del mismo, por lo que los puntos a analizar después de una sacudida que se presentará en el futuro ya se tienen totalmente detectados y de esta manera, tomar las determinaciones pertinentes bajo una inspección visual.

El presente trabajo, proporciona resultados suficientemente satisfactorios ya que, como se menciona con anterioridad el porcentaje de error es despreciable y como bien se sabe, la técnica numérica presentada aquí, tiene una auge cada vez mayor en la ingeniería.

De manera general, se tiene la certeza con los resultados dados, que la estructura del contenedor primario no se ve afectada en ninguno de los casos aquí mostrados, y es importante recordar que se utilizó el código de construcciones de la Comisión Federal de Electricidad, la cual permite delimitar que casos son especiales y que pudieran generar un daño estructural en la contención, debe destacarse que este trabajo maneja una aceleración máxima de 0.5g y que está es una sacudida de bastante magnitud, por lo que, los resultados plantean el hecho de que aun y con esas condiciones la integridad estructural no se ve afectada, debe recordarse que a esta aceleración también se tiene un factor de seguridad aproximadamente de 2, por lo que las condiciones en 0.4g y 0.3g, proporcionan factores de seguridad más grandes, y así de esta forma, se tiene la seguridad de será óptimo el contenedor bajo los escenarios mostrados.

### ***Recomendaciones Para Trabajos Futuros***

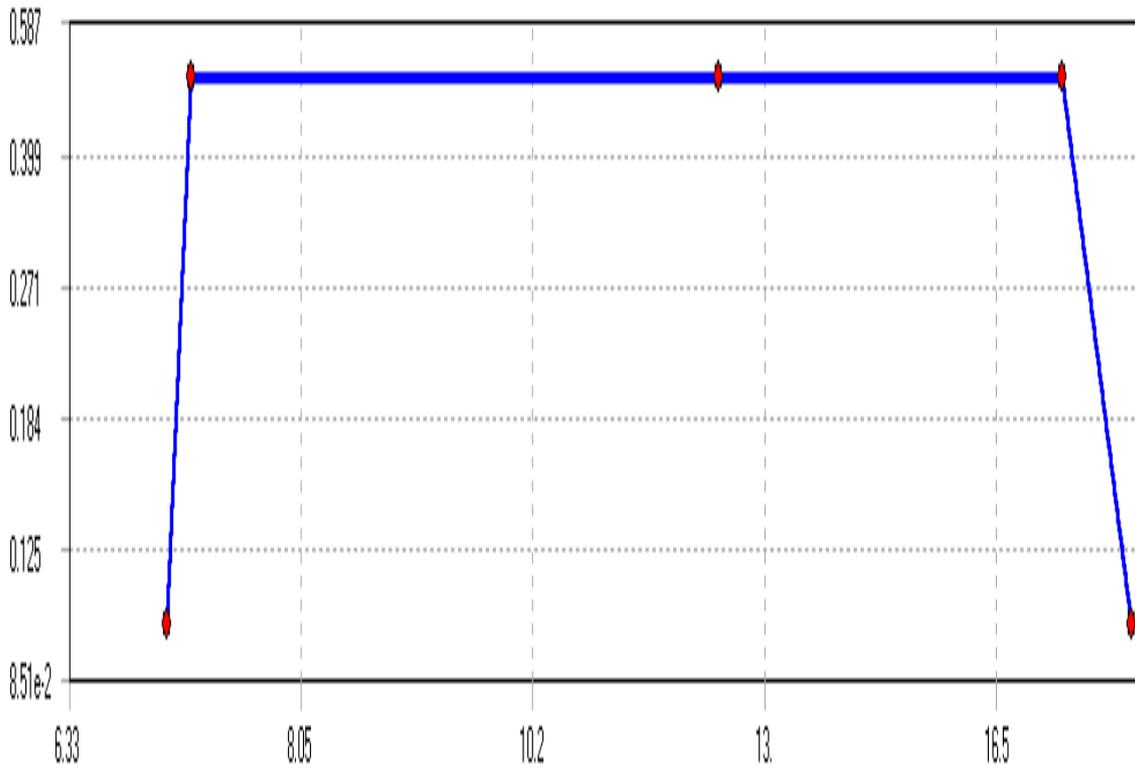
En el presente trabajo, se ha generado un análisis modal espectral a una estructura que consta de dos materiales, por un lado se habla de concreto, que tiene las propiedades de ser no elástico, no lineal, ortotrópico y no continuo, en donde los esfuerzos que generan su falla son los esfuerzos normales máximos principales, ya que este material es de naturaleza frágil. Por otra parte, se tiene un acero estructural el cual tiene propiedades elásticas, continuas, isotrópicas y este presenta la falla a causa de esfuerzos cortantes gracias a su condición dúctil. Estos dos materiales, llevaron a suponer que ninguno de ellos presenta defectos internos como sería el tener microgrietas debidas a cargas de fatiga o cargas externas en función del tiempo como es el caso de las vibraciones mecánicas.

Para fines de recomendaciones del presente trabajo, se propone hacer un estudio de Mecánica de Fractura y envejecimiento considerando las probables grietas que existan, esto para la estructura de concreto y para la parte de acero estructural, así como también prever estos cálculos para la posible fragilización de la estructura y como está se comportará bajo condiciones dinámicas.

Otro caso importante a realizar en el análisis, es considerar los refuerzos de la parte de concreto, ya que como se mencionó con anterioridad, este trabajo es de gran complejidad y requiere de una solución y un preproceso que abarcará grandes cantidades de tiempo, por lo tanto modelar estos y las condiciones de contacto ayudaría a cumplir el objetivo.

Se recomienda también hacer un análisis de espectro de densidad de potencia, con datos recopilados de pruebas experimentales, este análisis es de naturaleza probabilística y de dominio aleatorio, para obtener la respuesta de la estructura a estas condiciones reales

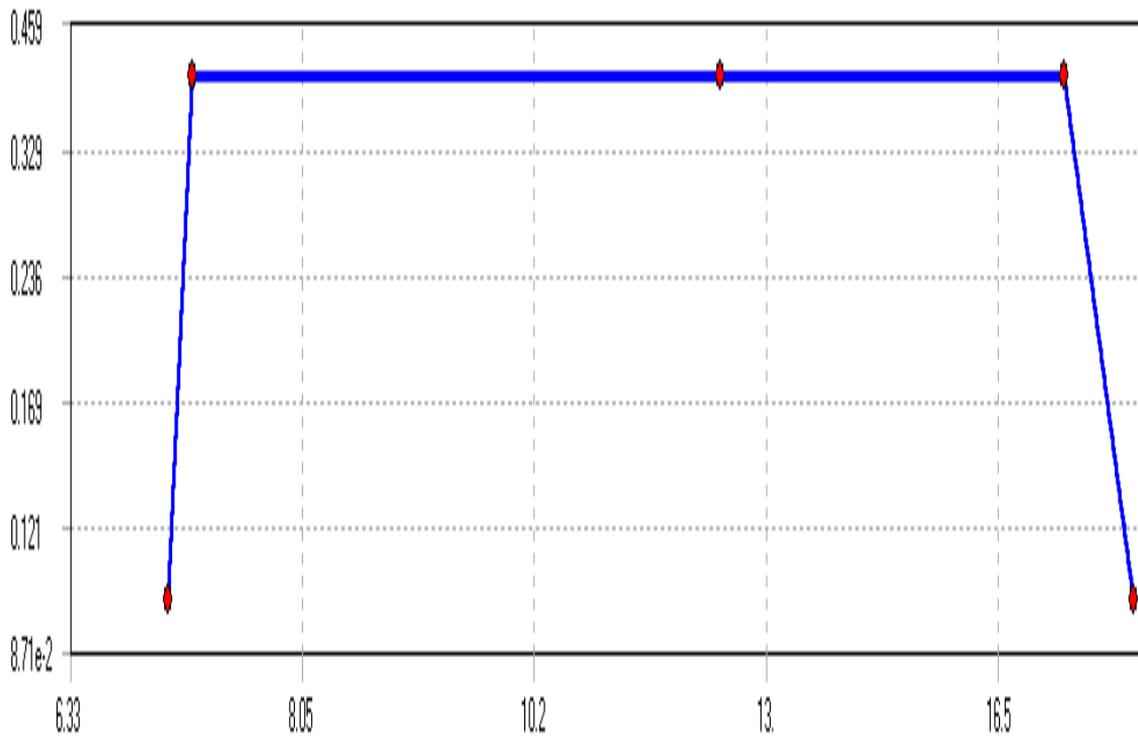
**ANEXO A**



Espectro de respuesta dinámica aceleración VS frecuencias

<b>Número</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>% de aceleracion</b>
1	7	0.1
2	7.17980	0.5
3	7.18000	0.5
4	12.3720	0.5
5	12.3723	0.5
6	17.6840	0.5
7	19	0.1

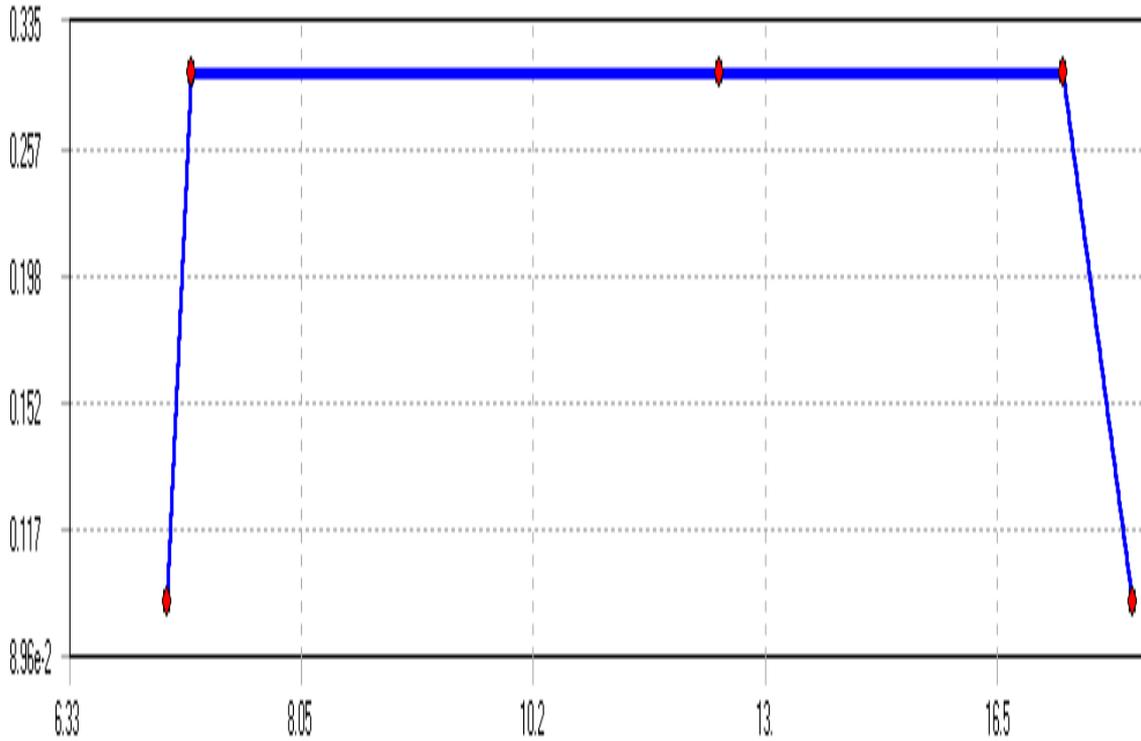
**ANEXO B**



Espectro de respuesta dinámica aceleración VS frecuencias

Número	Frecuencia	% de aceleracion
1	7	0.1
2	7.17980	0.4
3	7.18000	0.4
4	12.3720	0.4
5	12.3723	0.4
6	17.6840	0.4
7	19	0.1

ANEXO C



Espectro de respuesta dinámica aceleración VS frecuencias

Número	Frecuencia (Hz)	% de aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )
1	7	0.1
2	7.17980	0.3
3	7.18000	0.3
4	12.3720	0.3
5	12.3723	0.3
6	17.6840	0.3
7	19	0.1